



FÍSICA 12

PEARSON

J. D. Wilson • A. J. Buffa • B. Lou

www.FreeLibros.me

Múltiplos y prefijos de unidades métricas*

| Múltiplo | Prefijo (y abreviatura) |
|-------------------|-------------------------|
| 10 ²⁴ | yota- (Y) |
| 10 ²¹ | zeta- (Z) |
| 10 ¹⁸ | exa- (E) |
| 10 ¹⁵ | peta- (P) |
| 10 ¹² | tera- (T) |
| 10 ⁹ | giga- (G) |
| 10 ⁶ | mega- (M) |
| 10 ³ | kilo- (k) |
| 10 ² | hecto- (h) |
| 10 | deca- (da) |
| 10 ⁻¹ | deci- (d) |
| 10 ⁻² | centi- (c) |
| 10 ⁻³ | mili- (m) |
| 10 ⁻⁶ | micro- (μ) |
| 10 ⁻⁹ | nano- (n) |
| 10 ⁻¹² | pico- (p) |
| 10 ⁻¹⁵ | femto- (f) |
| 10 ⁻¹⁸ | ato- (a) |
| 10 ⁻²¹ | zepto- (z) |
| 10 ⁻²⁴ | yocto- (y) |

*Por ejemplo, 1 gramo (g) multiplicado por 1000 (10³) es 1 kilogramo (kg); 1 gramo multiplicado por 1/1000 (10⁻³) es 1 miligramo (mg).

Fórmula cuadrática

Si $ax^2 + bx + c = 0$, entonces

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Relaciones trigonométricas

Definiciones de funciones trigonométricas

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{y}{r} \quad \operatorname{cos} \theta = \frac{x}{r} \quad \operatorname{tan} \theta = \frac{\operatorname{sen} \theta}{\operatorname{cos} \theta} = \frac{y}{x}$$

| θ° (rad) | sen θ | cos θ | tan θ |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0° (0) | 0 | 1 | 0 |
| 30° ($\pi/6$) | 0.500 | $\sqrt{3}/2 \approx 0.866$ | $\sqrt{3}/3 \approx 0.577$ |
| 45° ($\pi/4$) | $\sqrt{2}/2 \approx 0.707$ | $\sqrt{2}/2 \approx 0.707$ | 1.00 |
| 60° ($\pi/3$) | $\sqrt{3}/2 \approx 0.866$ | 0.500 | $\sqrt{3} \approx 1.73$ |
| 90° ($\pi/2$) | 1 | 0 | ∞ |

Unidades base del SI

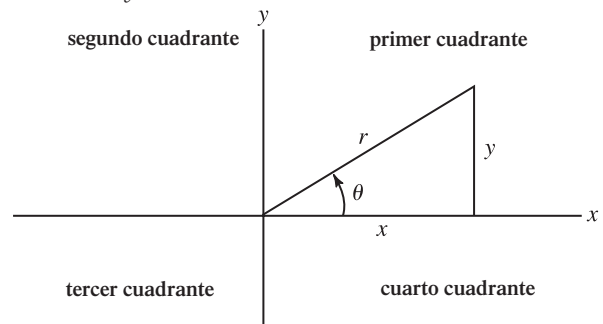
| Cantidad física | Nombre de la unidad | Símbolo |
|-----------------------|---------------------|---------|
| Longitud | metro | m |
| Masa | kilogramo | kg |
| Tiempo | segundo | s |
| Corriente eléctrica | ampere | A |
| Temperatura | kelvin | K |
| Cantidad de sustancia | mol | mol |
| Intensidad luminosa | candela | cd |

Algunas unidades derivadas del SI

| Cantidad física | Nombre de la unidad | Símbolo | Unidad del SI |
|-----------------------|---------------------|----------|--|
| Frecuencia | hertz | Hz | s ⁻² |
| Energía | joule | J | kg·m ² /s ² |
| Fuerza | newton | N | kg·m/s ² |
| Presión | pascal | Pa | kg/(m·s ²) |
| Potencia | watt | W | kg·m ² /s ³ |
| Carga eléctrica | coulomb | C | A·s |
| Potencial eléctrico | volt | V | kg·m ² /(A·s ³) |
| Resistencia eléctrica | ohm | Ω | kg·m ² /(A ² ·s ³) |
| Capacitancia | farad | F | A ² ·s ⁴ /(kg·m ²) |
| Inductancia | henry | H | kg·m ² /(A ² ·s ²) |
| Campo magnético | tesla | T | kg/(A·s ²) |

Teorema de Pitágoras (triángulo rectángulo)

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$



Ley de cosenos

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

Ley de los senos

$$\frac{a}{\operatorname{sen} A} = \frac{b}{\operatorname{sen} B} = \frac{c}{\operatorname{sen} C}$$

(para cualquier triángulo plano con ángulos A, B y C, y lados opuestos a, b y c)

Datos físicos*

| Cantidad | Símbolo | Valor aproximado |
|---|------------------------|---|
| Constante de gravitación universal | G | $6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ |
| Aceleración de la gravedad (valor generalmente aceptado en la superficie terrestre) | g | $9.80 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ cm/s}^2 = 32.2 \text{ ft/s}^2$ |
| Rapidez de la luz | c | $3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 3.00 \times 10^{10} \text{ cm/s} = 1.86 \times 10^5 \text{ mi/s}$ |
| Constante de Boltzmann | k_B | $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ |
| Número de Avogadro | N_A | $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ |
| Constante de los gases | $R = N_A k_B$ | $8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K}) = 1.99 \text{ cal}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ |
| Constante de la ley de Coulomb | $k = 1/4\pi\epsilon_0$ | $9.00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ |
| Carga del electrón | e | $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ |
| Permitividad del espacio libre | ϵ_0 | $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$ |
| Permeabilidad del espacio libre | μ_0 | $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A} = 1.26 \times 10^{-6} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ |
| Unidad de masa atómica | u | $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \leftrightarrow 931 \text{ MeV}$ |
| Constante de Planck | h | $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ |
| | $\hbar = h/2\pi$ | $1.05 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ |
| Masa del electrón | m_e | $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5.49 \times 10^{-4} \text{ u} \leftrightarrow 0.511 \text{ MeV}$ |
| Masa del protón | m_p | $1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.007276 \text{ u} \leftrightarrow 938.27 \text{ MeV}$ |
| Masa del neutrón | m_n | $1.67493 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 1.008665 \text{ u} \leftrightarrow 939.57 \text{ MeV}$ |
| Radio de Bohr del átomo de hidrógeno | r_1 | 0.053 nm |

*Valores de referencia del National Institute of Standards (NIST) para constantes, unidades e incertidumbre.

Datos del Sistema Solar*

| | |
|--|--|
| Radio ecuatorial de la Tierra | $6.378 \times 10^3 \text{ km} = 3963 \text{ mi}$ |
| Radio polar de la Tierra | $6.357 \times 10^3 \text{ km} = 3950 \text{ mi}$ |
| | Promedio: $6.4 \times 10^3 \text{ km}$ (para cálculos generales) |
| Masa de la Tierra | $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ |
| Diámetro de la Luna | $3500 \text{ km} \approx 2160 \text{ mi}$ |
| Masa de la Luna | $7.4 \times 10^{22} \text{ kg} \approx \frac{1}{81}$ de la masa de la Tierra |
| Distancia promedio entre la Luna y la Tierra | $3.8 \times 10^5 \text{ km} = 2.4 \times 10^5 \text{ mi}$ |
| Diámetro del Sol | $1.4 \times 10^6 \text{ km} \approx 864\,000 \text{ mi}$ |
| Masa del Sol | $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ |
| Distancia promedio entre la Tierra y el Sol | $1.5 \times 10^8 \text{ km} = 93 \times 10^6 \text{ mi}$ |

*Véase el apéndice III para datos adicionales sobre los planetas.

Símbolos matemáticos

| | |
|------------|----------------------------|
| = | es igual a |
| ≠ | no es igual a |
| ≈ | es aproximadamente igual a |
| ~ | aproximadamente |
| ∝ | es proporcional a |
| > | es mayor que |
| ≥ | es mayor o igual que |
| ≫ | es mucho mayor que |
| < | es menor que |
| ≤ | es menor o igual que |
| ≪ | es mucho menor que |
| ± | más o menos |
| ∓ | menos o más |
| \bar{x} | valor promedio de x |
| Δx | cambio en x |
| $ x $ | valor absoluto de x |
| Σ | suma de |
| ∞ | infinito |

El alfabeto griego

| | | | | | |
|---------|-----------|------------|---------|----------|------------|
| Alfa | A | α | Nu | N | ν |
| Beta | B | β | Xi | Ξ | ξ |
| Gamma | Γ | γ | Ómicron | O | o |
| Delta | Δ | δ | Pi | Π | π |
| Épsilon | E | ϵ | Rho | P | ρ |
| Zeta | Z | ζ | Sigma | Σ | σ |
| Eta | H | η | Tau | T | τ |
| Theta | Θ | θ | Úpsilon | Y | υ |
| Iota | I | ι | Phi | Φ | ϕ |
| Kappa | K | κ | Chi | X | χ |
| Lambda | Λ | λ | Psi | Ψ | ψ |
| Mu | M | μ | Omega | Ω | ω |

FÍSICA 12

FÍSICA 12

Jerry D. Wilson

*Lander University
Greenwood, SC*

Anthony J. Buffa

*California Polytechnic State University
San Luis Obispo, CA*

Bo Lou

*Ferris State University
Big Rapids, MI*

TRADUCCIÓN

Ma. de Lourdes Amador Araujo
Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Alberto Lima Sánchez
Preparatoria de la Universidad La Salle

Agradecimiento especial por la adaptación de esta obra a

Abel Pérez Rodríguez

*Profesor Tutor de Física Olimpiadas Nacionales e Iberoamericanas
Panamá*

Prentice Hall

México • Argentina • Brasil • Colombia • Costa Rica • Chile • Ecuador
España • Guatemala • Panamá • Perú • Puerto Rico • Uruguay • Venezuela

www.FreeLibros.me

Datos de catalogación bibliográfica

WILSON, JERRY; ANTHONY J. BUFFA, BO LOU

Física 12.

Primera edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2011

ISBN: 978-607-32-0397-5

Área: Ciencias

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 336

Authorized of the adaptation translation from the English language edition entitled *College Physics*, 6th Edition, by Jerry D. Wilson, Anthony J. Buffa and Bo Lou, published by Pearson Education, Inc. publishing as PRENTICE HALL, Copyright © 2007.

Original ISBN 978-013-149-579-1

Translation ISBN 978-970-261-693-1

All rights reserved

Este libro es una adaptación autorizada de la edición original titulado: *College Physics*, 6^a Edición, por Jerry D. Wilson, Anthony J. Buffa y Bo Lou, publicado por Pearson Education, Inc., publicado como PRENTICE HALL, Copyright © 2007.

ISBN Original 978-013-149-579-1

ISBN Traducción 978-970-261-693-1

Todos los derechos reservados

Editor: Ma. Elena Zahar Arellano
maria.zahar@pearson.com

Editor de desarrollo: Araceli Calderón Salas

Supervisor de producción: Enrique Trejo Hernández

PRIMERA EDICIÓN, 2011

D.R. © 2011 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Atacomulco 500-5º Piso

Industrial Atoto

53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. núm. 1031.

Prentice Hall es marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN 978-607-32-0397-5

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 14 13 12 11

Prentice Hall
es una marca de

PEARSON

www.pearsoneducacion.net

ISBN 978-607-32-0397-5

www.FreeLibros.me

PREFACIO

La organización del presente texto se realizó tomando en consideración los contenidos y programas vigentes de física, de los cursos regulares correspondientes al 12 grado impartido en los cursos de bachillerato de secundaria. Los capítulos: Cargas, fuerzas y campos eléctricos; Potencial eléctrico, energía y capacitancia; Corriente eléctrica y resistencia; Circuitos eléctricos básicos; Magnetismo; Inducción y ondas electromagnéticas; Reflexión y refracción de la luz; Espejos y lentes, así como el de La visión y los instrumentos ópticos, mantienen en sus temas la coherencia y continuidad indispensables para un mejor entendimiento de los mismos.

También se consideraron, en todo momento, las múltiples ventajas y recursos que presenta la actual edición como son: Hechos de física, que motivan al estudiante en el inicio de cada capítulo con datos e información histórica de relevancia para los temas; ejemplos conceptuales, trabajados e integrados; resúmenes visuales y ejercicios de refuerzo, que apoyan el aprendizaje mediante dibujos y los procedimientos sugeridos en la resolución de problemas; estos últimos constituyen una parte imprescindible al momento de verificar si se han comprendido los conceptos y principios de la física. Esta organización es de gran ayuda al docente y también facilita el estudio por parte del estudiante debido a la exposición didáctica y pedagógica del texto.

Es importante destacar que en el texto se utiliza el punto en lugar de la coma para separar la parte entera del decimal de las diferentes magnitudes, lo cual es aceptado por el Sistema Internacional de Unidades aunque en nuestros países se utiliza más la coma.

Por último, queremos expresar que este libro tiene como finalidad primordial servir de texto al curso básico de ciencias físicas que se imparte en el último grado del bachillerato en ciencias, por lo que podrá ser utilizado por profesores y estudiantes en todos los colegios e institutos donde se dicta esta disciplina.

Abel Pérez R.

CONTENIDO

PARTE 1: Electromagnetismo 1

1 CARGAS, FUERZAS Y CAMPOS ELÉCTRICOS 3

- 1.1 Carga eléctrica 4
- 1.2 Carga electrostática 6
- 1.3 Fuerza eléctrica 10
- 1.4 Campo eléctrico 15

APRENDER DIBUJANDO: Uso del principio de superposición para determinar la dirección del campo eléctrico 16

APRENDER DIBUJANDO: Trazado de líneas eléctricas de fuerza 19

A FONDO: 1.1 Relámpagos y pararrayos 21

A FONDO: 1.2 Campos eléctricos en las fuerzas poliacas y en la naturaleza: armas paralizantes y peces eléctricos 22

1.5 Conductores y campos eléctricos 24

*1.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo 26

Repaso del capítulo 27 **Ejercicios** 28

2 POTENCIAL ELÉCTRICO, ENERGÍA Y CAPACITANCIA 34

2.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico 35

APRENDER DIBUJANDO: ΔV es independiente del punto de referencia 36

2.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico 41

APRENDER DIBUJANDO: Relación gráfica entre líneas de campo eléctrico y equipotenciales 45

2.3 Capacitancia 47

A FONDO: 2.1 Potencial eléctrico y transmisión de señales nerviosas 50

2.4 Dieléctricos 50

2.5 Condensadores en serie y en paralelo 55

Repaso del capítulo 59 **Ejercicios** 60

3 CORRIENTE ELÉCTRICA Y RESISTENCIA 66

3.1 Baterías y corriente directa 67

APRENDER DIBUJANDO: Dibujo de circuitos 69

3.2 Corriente y velocidad de deriva 69

3.3 Resistencia y ley de Ohm 71

A FONDO: 3.1 La "biogeneración" de alto voltaje 73

A FONDO: 3.2 Análisis de impedancia bioeléctrica (AIB) 76

3.4 Potencia eléctrica 78

Repaso del capítulo 83 **Ejercicios** 84

4 CIRCUITOS ELÉCTRICOS BÁSICOS 89

4.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo 90

4.2 Circuitos de múltiples mallas y reglas de Kirchhoff 97

APRENDER DIBUJANDO: Diagramas de Kirchhoff: una interpretación gráfica del teorema de la malla de Kirchhoff 100

4.3 Circuitos RC 102

4.4 Amperímetros y voltímetros 105

A FONDO: 4.1 Aplicaciones de los circuitos RC a la cardiología 106

4.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica 109

A FONDO: 4.2 Electricidad y seguridad personal 112

Repaso del capítulo 113 **Ejercicios** 114



5 MAGNETISMO 121

5.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético 122

5.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética 124

5.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos 127

5.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica 130

5.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos 133

5.6 Electromagnetismo: la fuente de los campos magnéticos 135

5.7 Materiales magnéticos 139

A FONDO: 5.1 La fuerza magnética en la medicina del futuro 140

*5.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre 142

A FONDO: 5.2 El magnetismo en la naturaleza 143

Repaso del capítulo 145 **Ejercicios** 146

6 INDUCCIÓN Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 154

6.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz 155

6.2 Generadores eléctricos y contra fem 161

A FONDO: 6.1 La inducción electromagnética en el trabajo: linternas y antiterrorismo 162

A FONDO: 6.2 Inducción electromagnética en acción: pasatiempos y transportación 164

6.3 Transformadores y transmisión de energía 166

6.4 Ondas electromagnéticas 170

Repaso del capítulo 177 **Ejercicios** 177

PARTE 2: Óptica e instrumentos ópticos 185

7 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ 187

7.1 Frentes de onda y rayos 188

7.2 Reflexión 189

7.3 Refracción 190

APRENDER DIBUJANDO: Trazado de los rayos reflejados 190

A FONDO: 7.1 Una noche oscura y lluviosa 191

A FONDO: 7.2 Las lentes "perfectas" y el índice negativo de refracción 197

7.4 Reflexión interna total y fibras ópticas 199

A FONDO: 7.3 Aplicaciones médicas de las fibras ópticas 202

7.5 Dispersión 203

A FONDO: 7.4 El arco iris 204

Repaso del capítulo 205 **Ejercicios** 206



8 ESPEJOS Y LENTES 211

8.1 Espejos planos 212

8.2 Espejos esféricos 214

A FONDO: 8.1 Todo se hace con espejos 215

APRENDER DIBUJANDO: Diagramas de rayos para un espejo (véase el ejemplo 8.2) 216

8.3 Lentes 222

APRENDER DIBUJANDO: Diagrama de rayos para lentes (véase el ejemplo 8.5) 225

A FONDO: 8.2 Lentes de Fresnel 230

8.4 La ecuación del fabricante de lentes 232

*8.5 Aberraciones de las lentes 234

Repaso del capítulo 235 **Ejercicios** 236



9 ÓPTICA FÍSICA: LA NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ 242

9.1 El experimento de Young de la doble rendija 243

9.2 Interferencia en películas delgadas 246

A FONDO: 9.1 Lentes no reflectantes 250

9.3 Difracción 250

9.4 Polarización 257

APRENDER DIBUJANDO: Tres polarizadores (véase el Ejemplo integrado 9.6) 260

*9.5 Dispersión atmosférica de la luz 264

A FONDO: 9.2 Las pantallas de cristal líquido y la luz polarizada 265

A FONDO: 9.3 Biopsia óptica 267

Repaso del capítulo 267 **Ejercicios** 268

10 LA VISIÓN Y LOS INSTRUMENTOS ÓPTICOS 274

10.1 El ojo humano 275

A FONDO: 10.1 Corrección de la córnea y cirugía 279

10.2 Microscopios 281

10.3 Telescopios 285

10.4 Difracción y resolución 289

A FONDO: 10.2 Telescopios para radiación no visible 290

*10.5 Color 292

Repaso del capítulo 295 **Ejercicios** 296

Respuestas a los ejercicios de refuerzo R-301

Respuestas a los ejercicios con número impar R-305

Electromagnetismo

CARGAS, FUERZAS Y CAMPOS ELÉCTRICOS

| | |
|--|----|
| 1.1 Carga eléctrica | 4 |
| 1.2 Carga electrostática | 6 |
| 1.3 Fuerza eléctrica | 10 |
| 1.4 Campo eléctrico | 15 |
| 1.5 Conductores y campos eléctricos | 24 |
| *1.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo | 26 |

HECHOS DE FÍSICA

- Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), un científico francés y el descubridor de la ley de la fuerza entre objetos cargados, tuvo una carrera muy diversificada: hizo contribuciones significativas a la reforma hospitalaria, la limpieza de la red de suministro de agua de París, el magnetismo terrestre, la ingeniería de suelos y la construcción de fuertes, estas dos últimas mientras sirvió en el ejército.
- La pistola paralizante Taser, que utilizan los cuerpos de seguridad pública, funciona generando una gran separación de carga eléctrica y aplicándola a diferentes partes del cuerpo; el arma interrumpe las señales eléctricas normales y provoca inmovilidad temporal. La pistola paralizante necesita hacer contacto físico con el cuerpo con sus dos electrodos, y el choque actúa incluso a través de ropa gruesa. Una versión de la Taser a larga distancia funciona disparando electrodos punzantes que permanecen unidos a la pistola mediante cables.
- La anguila eléctrica (que puede llegar a medir hasta 1.82 m de largo y que en realidad es un pez) actúa eléctricamente de manera similar a una pistola Taser. Más del 80% del cuerpo de la anguila corresponde a la cola; sus órganos vitales están localizados detrás de su pequeña cabeza. Con el campo eléctrico que crea es capaz de localizar y paralizar a sus presas antes de comérselas.
- Los purificadores de aire domésticos utilizan la fuerza eléctrica para reducir el polvo, bacterias y otras partículas en el aire. La fuerza eléctrica remueve los electrones de los contaminantes, convirtiéndolos en partículas con carga positiva. Estas partículas son atraídas hacia placas con carga negativa, donde permanecen hasta que se retiran manualmente. Cuando funcionan de forma adecuada, estos purificadores logran reducir el nivel de partículas en más del 99 por ciento.



Pocos procesos naturales liberan tanta cantidad de energía en una fracción de segundo como un relámpago. Sin embargo, poca gente ha experimentado su tremenda potencia a corta distancia; sólo unos cuantos cientos de personas son alcanzadas por relámpagos cada año en Estados Unidos.

Quizá le sorprenda saber que casi ha tenido una experiencia similar, por lo menos desde el punto de vista de la física. ¿Alguna vez ha caminado en un cuarto alfombrado y luego ha recibido una pequeña descarga al tratar de tocar la perilla metálica de una puerta? Aunque la escala es diferente, los procesos físicos implicados (una descarga de electricidad estática) son los mismos que se presentan en el hecho de ser alcanzado por un relámpago (digamos que se trata de un mini relámpago).

En ocasiones, la electricidad tiene efectos dramáticos, como cuando se produce un cortocircuito en los tomacorrientes o cuando los relámpagos dejan sentir su fuerza. Sabemos que la electricidad es peligrosa, pero también que puede ser “domesticada”. En el hogar o en la oficina, su utilidad se da por sentada. De hecho, nuestra dependencia de la energía eléctrica sólo se hace evidente cuando de pronto “se va la luz”, recordándonos de forma dramática el papel que juega en nuestra vida diaria. Sin embargo, hace menos de un siglo no había líneas de transmisión que cruzaran el país, ni alumbrado ni aparatos eléctricos: en resumen, ninguna de las aplicaciones de la electricidad que existen en la actualidad en nuestro entorno.

Sabemos ahora que la electricidad y el magnetismo están relacionados (véase el capítulo 6). En conjunto, se les llama “fuerza electromagnética”, la cual constituye una de las cuatro fuerzas fundamentales en la naturaleza. (La gravedad [capítulo 5 de *Física 11*] y dos tipos de fuerzas nucleares [fuerte y débil] son las otras tres.) Aquí comenzamos por estudiar la fuerza eléctrica y sus propiedades. Más adelante (en el capítulo 6), se vincularán la fuerza eléctrica y la magnética.

1.1 Carga eléctrica

OBJETIVOS: a) Distinguir entre los dos tipos de carga eléctrica, b) enunciar la ley de carga-fuerza que opera entre objetos cargados y c) comprender y usar la ley de conservación de la carga.

¿Qué es la *electricidad*? Tal vez la respuesta más simple es que la electricidad es un término genérico que describe los fenómenos asociados con la electricidad doméstica. Pero, en realidad y sobre todo, implica el estudio de la interacción entre objetos *eléctricamente cargados*. Para demostrar esto, nuestro estudio empezará con la situación más simple, la de la *electrostática*, es decir, cuando los objetos eléctricamente cargados están *en reposo*.

Al igual que la masa, la **carga eléctrica** es una propiedad fundamental de la materia. La carga eléctrica está asociada con partículas que constituyen el átomo: el electrón y el protón. El simplista modelo del sistema solar del átomo, mostrado en la ◀ figura 1.1, se asemeja en su estructura a los planetas que giran alrededor del Sol. Los *electrones* se consideran como partículas en órbita alrededor de un núcleo, que contiene la mayoría de la masa del átomo en la forma de *protones* y partículas eléctricamente neutras llamadas *neutrones*. Como vimos en la sección 5.5 de *Física 11*, la fuerza centrípeta que mantiene a los planetas en órbita alrededor del Sol es suministrada por la gravedad. De manera similar, la fuerza que mantiene los electrones en órbita alrededor del núcleo es la fuerza eléctrica. Sin embargo, hay distinciones importantes entre las fuerzas gravitacionales y eléctricas.

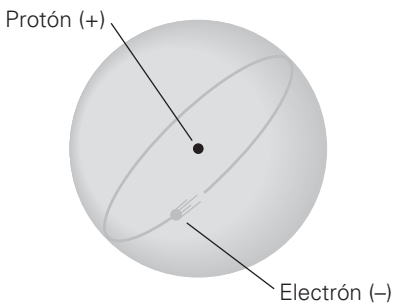
Una distinción básica es que sólo hay un tipo de masa en la naturaleza, y se sabe que las fuerzas gravitacionales son sólo atractivas. Sin embargo, la carga eléctrica existe en dos tipos, distinguidas por la nominación de positiva (+) y negativa (-). Los protones llevan una carga positiva, y los electrones llevan una carga negativa. Las diferentes combinaciones de los dos tipos de carga producen fuerzas eléctricas atractivas o repulsivas.

Las direcciones de las fuerzas eléctricas cuando las cargas interactúan entre sí están dadas por el siguiente principio, llamado **ley de las cargas** o **ley de carga-fuerza**:

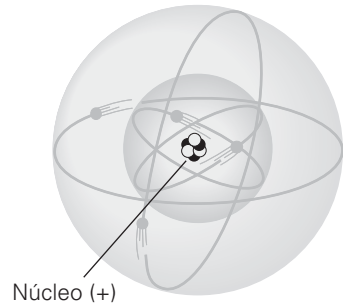
Cargas iguales se repelen y cargas desiguales se atraen.

Esto es, dos partículas cargadas negativamente o dos partículas cargadas positivamente se repelen entre sí, mientras que partículas con cargas contrarias se atraen entre sí (▶ figura 1.2). Las fuerzas repulsiva y atractiva son iguales y opuestas, y actúan sobre objetos diferentes, de acuerdo con la tercera ley de Newton (acción-reacción).

La carga sobre un electrón y aquella sobre un protón son iguales en magnitud, pero contrarias en signo. La magnitud de la carga sobre un electrón se abrevia como e y es la unidad de carga fundamental, ya que es la carga más pequeña observada en la naturaleza.* La unidad SI de carga es el **coulomb (C)**, llamada así en honor del físico francés Charles A. Coulomb (1736-1806), quien descubrió una relación entre fuerza eléctrica y carga (sección 1.3). Las cargas y masas del electrón, protón y neutrón se indican en la



a) Átomo de hidrógeno

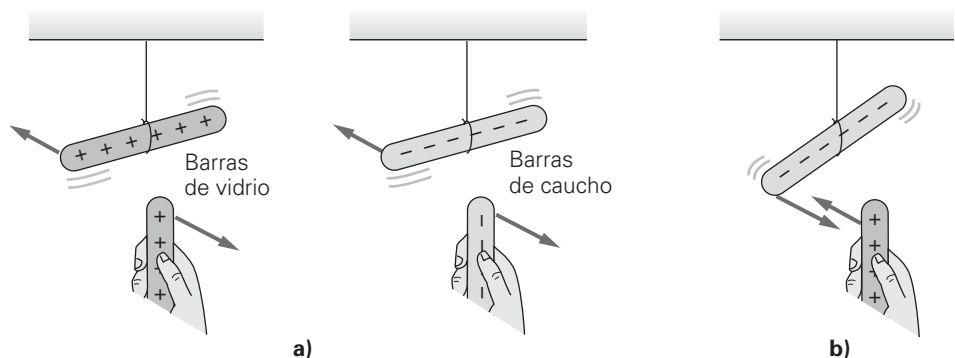


b) Átomo de berilio

▲ **FIGURA 1.1** Modelo simplificado de átomos El llamado modelo de sistema solar de a) un átomo de hidrógeno y b) un átomo de berilio considera a los electrones (con carga negativa) orbitando el núcleo (con carga positiva), en forma análoga a como los planetas giran alrededor del Sol. La estructura electrónica de los átomos es en realidad mucho más complicada que esto.

Nota: recuerde el análisis de la tercera ley de Newton en la sección 2.4 de *Física 11*.

▶ **FIGURA 1.2** La ley de carga-fuerza o ley de cargas a) Cargas iguales se repelen, b) Cargas desiguales se atraen.



*Los protones, al igual que los neutrones y otras partículas, están constituidos por partículas llamadas *quarks*, que tienen cargas de $\pm \frac{1}{3}$ y $\pm \frac{2}{3}$ de la carga del electrón. Se tiene evidencia experimental de la existencia de quarks dentro del núcleo, pero no se han detectado quarks libres. La teoría actual implica que la detección directa de los quarks es imposible.

TABLA 1.1 Partículas subatómicas y sus cargas eléctricas

| Partícula | Carga eléctrica* | Masa* |
|-----------|------------------------------------|--|
| Electrón | $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ | $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ |
| Protón | $+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ | $m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ |
| Neutrón | 0 | $m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$ |

* Aunque los valores están dados con cuatro cifras significativas, usaremos sólo dos o tres cifras en nuestros cálculos.

tabla 1.1, donde vemos que $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Nuestro símbolo general para carga será q o Q . Así, la carga sobre un electrón se escribe como $q_e = -e = -1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ y sobre un protón es $q_p = +e = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Con frecuencia usamos varios términos cuando analizamos objetos cargados. Decir que un objeto tiene una **carga neta** significa que el objeto tiene un exceso de cargas positivas o negativas. (Sin embargo, es común preguntar sobre la “carga” de un objeto, cuando en realidad nos referimos a la carga neta.) Como veremos en la sección 1.2, la carga en exceso comúnmente se produce por una transferencia de electrones, *no* de protones. (Los protones están ligados al núcleo y, en las situaciones más comunes, no salen de él.) Por ejemplo, si un objeto tiene una carga (neta) de $+1.6 \times 10^{-18} \text{ C}$, entonces se han removido electrones de él. Específicamente, tiene una deficiencia de 10 electrones, ya que $10 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.6 \times 10^{-18} \text{ C}$. Esto es, el número total de electrones en el objeto ya no cancela por completo la carga positiva de todos los protones, lo que da por resultado una carga neta positiva. En un nivel atómico, algunos de los átomos que constituyen el objeto serían deficientes en electrones. Los átomos cargados positivamente se llaman *iones positivos*. Los átomos con un exceso de electrones se llaman *iones negativos*.

Como la carga sobre el electrón es una minúscula fracción de un coulomb, un objeto que tiene una carga neta de un coulomb de carga neta rara vez se ve en situaciones cotidianas. Por lo tanto, es común expresar las cantidades de carga usando *microcoulombs* (μC o 10^{-6} C), *nanocoulombs* (nC o 10^{-9} C) y *picocoulombs* (pC o 10^{-12} C).

Puesto que la carga eléctrica (neta) sobre un objeto es el resultado de una deficiencia o de un exceso de electrones, siempre debe ser un múltiplo entero de la carga sobre un electrón. Un signo más o un signo menos indicará si el objeto tiene una deficiencia o un exceso de electrones, respectivamente. Así, para la carga (neta) de un objeto, podemos escribir

$$q = \pm ne \quad (1.1)$$

Unidad SI de carga: coulomb (C)

donde $n = 1, 2, 3, \dots$. Algunas veces decimos que la carga está “cuantizada”, lo que significa que ésta se presenta sólo en múltiplos enteros de la carga electrónica fundamental.

Al tratar con cualquier fenómeno eléctrico, otro importante principio es el de la **conservación de la carga**:

La carga neta de un sistema aislado permanece constante.

Esto es, la carga neta permanece constante, aunque puede ser diferente de cero. Suponga, por ejemplo, que un sistema consiste inicialmente en dos objetos eléctricamente neutros, y que un millón de electrones se transfieren de uno al otro. El objeto con los electrones agregados tendrá entonces una carga negativa neta, y el objeto con el número reducido de electrones tendrá una carga positiva neta de igual magnitud. (Véase el ejemplo 1.1.) Así, la carga neta del *sistema* permanece igual a cero. Si el universo se considera como un todo, la conservación de la carga significa que la carga neta *del universo* es constante.

Advierta que este principio no prohíbe la creación o destrucción de partículas cargadas. De hecho, los físicos han sabido desde hace mucho tiempo que es posible crear o destruir partículas cargadas en los niveles atómico y nuclear. Sin embargo, a causa de la conservación de la carga, las partículas son creadas o destruidas sólo en pares con cargas iguales y de signo contrario.

Ejemplo integrado 1.1 ■ Sobre la alfombra: conservación de la carga cuantizada

Usted arrastra los pies sobre un piso alfombrado en un día seco y la alfombra adquiere una carga positiva neta (para conocer detalles de este mecanismo, véase la sección 1.2). a) ¿Usted tendrá 1) una deficiencia o 2) un exceso de electrones? b) Si la carga adquirida tiene una magnitud de 2.15 nC, ¿cuántos electrones se transfirieron?

a) Razonamiento conceptual. a) Como la alfombra tiene una carga positiva neta, debe haber perdido electrones y usted debe haberlos ganado. Así, su carga es negativa, lo que indica un exceso de electrones, y la respuesta correcta es la 2.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Conociendo la carga en un electrón, es posible cuantificar el exceso de electrones. Expresé la carga en coulombs, y establezca qué debe encontrarse.

$$\begin{aligned} \text{Dado: } q_c &= +(2.15 \text{ nC}) \left(\frac{10^{-9} \text{ C}}{1 \text{ nC}} \right) & \text{Encuentre: } n, \text{ número de electrones} \\ &= +2.15 \times 10^{-9} \text{ C} & \text{transferidos} \\ q_e &= -1.60 \times 10^{-19} \text{ C (de la tabla 1.1)} \end{aligned}$$

La carga neta en usted es

$$q = -q_c = -2.15 \times 10^{-9} \text{ C}$$

Por lo tanto,

$$n = \frac{q}{q_e} = \frac{-2.15 \times 10^{-9} \text{ C}}{-1.60 \times 10^{-19} \text{ C/electrones}} = 1.34 \times 10^{10} \text{ electrones}$$

Como se observa, las cargas netas, en situaciones cotidianas, por lo general implican números enormes de electrones (aquí, más de 13 mil millones), porque la carga de cada electrón es muy pequeña.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si su masa es de 80 kg, ¿en qué porcentaje ha aumentado su masa a causa de los electrones en exceso? (Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo se incluyen al final del libro.)

1.2 Carga electrostática

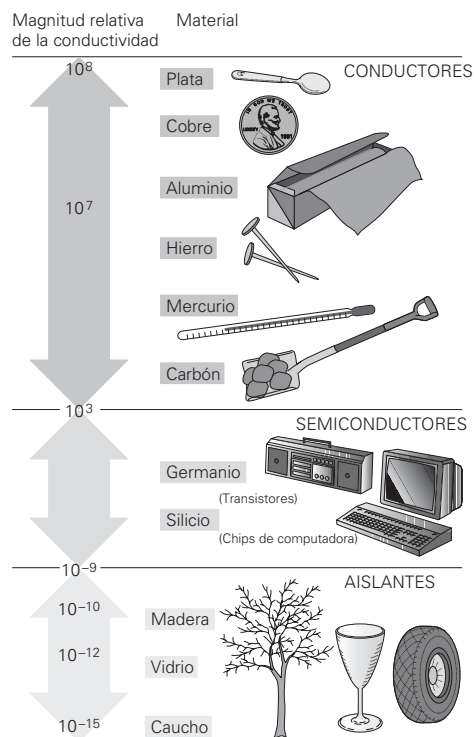
OBJETIVOS: a) Distinguir entre conductores y aislantes, b) explicar la operación del electroscoipo y c) distinguir entre carga por fricción, conducción, inducción y polarización.

La existencia de dos tipos de carga eléctrica (y, por lo tanto, de fuerzas eléctricas atractivas y repulsivas) se demuestra fácilmente. Antes de aprender cómo se hace esto, veamos la distinción entre conductores y aislantes eléctricos. Lo que distingue a esos amplios grupos de sustancias es su capacidad para conducir, o transmitir, cargas eléctricas. Algunos materiales, particularmente los metales, son buenos **conductores** de carga eléctrica. Otros, como el vidrio, el caucho y la mayoría de los plásticos, son **aislantes**, o malos conductores eléctricos. Una comparación de las magnitudes relativas de las conductividades de algunos materiales se presenta en la ► figura 1.3.

En los conductores, los electrones de *valencia* de los átomos —o electrones localizados en las órbitas más exteriores—, están débilmente ligados. Como resultado, es fácil removerlos del átomo y que se muevan en el conductor; incluso es posible que abandonen este último por completo. Esto es, los electrones de valencia no están permanentemente ligados a un átomo particular. Sin embargo, en los aislantes, incluso los electrones que están menos ligados, lo están tan fuertemente, que es difícil removerlos de sus átomos. Así, la carga no se mueve con facilidad, ni se puede remover fácilmente de un aislante.

Como muestra la figura 1.3, también existe una clase de materiales “intermedios”, llamados **semiconductores**. Su capacidad de conducir carga es intermedia entre la de los aislantes y los conductores. El movimiento de electrones en los semiconductores es mucho más difícil de describir que el simple enfoque para el electrón de valencia usado para aislantes y conductores. De hecho, los detalles de las propiedades de los semiconductores se comprenden sólo con la ayuda de la mecánica cuántica, que va más allá del alcance de este libro.

Sin embargo, es interesante notar que es posible ajustar la conductividad de los semiconductores agregando ciertos tipos de impurezas atómicas en concentraciones variables. Desde la década de los años 40, los científicos emprendieron investigaciones



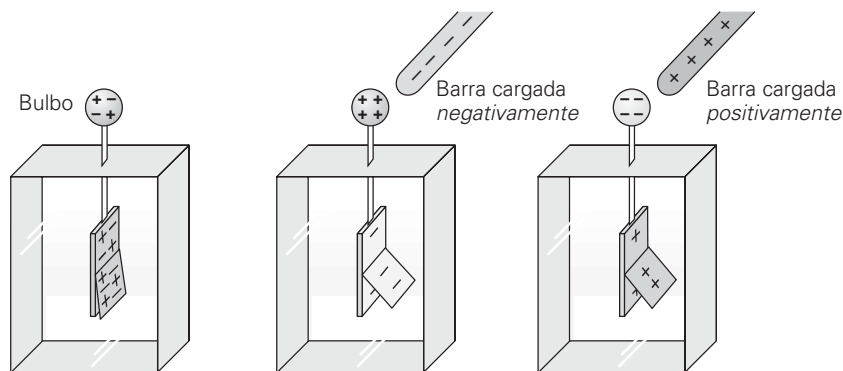
◀ **FIGURA 1.3** Conductores, semiconductores y aislantes. Una comparación de las magnitudes relativas de las conductividades eléctricas de varios materiales (el dibujo no está a escala).

sobre las propiedades de los semiconductores con el fin de crear aplicaciones para tales materiales. Los científicos usaron semiconductores para crear los transistores, luego circuitos de estado sólido y después los microchips para computadoras. El microchip es uno de los principales desarrollos responsables de la tecnología para computadoras de alta velocidad de que disponemos actualmente.

Ahora que ya sabemos un poco sobre conductores y aislantes, aprendamos sobre la manera de determinar el signo de la carga de un objeto. El *electroscopio* es uno de los dispositivos más sencillos usados para demostrar las características de la carga eléctrica (▼ figura 1.4). En su forma más simple, consiste en una barra metálica con un bulbo metálico en un extremo. La barra está unida a una pieza metálica sólida, de forma rectangular, que tiene unida una "hoja", generalmente hecha de oro o de aluminio. Este conjunto está aislado de su recipiente protector de vidrio por medio de un marco aislante. Cuando los objetos cargados se acercan al bulbo, los electrones en éste son atraídos o repelidos por tales objetos. Por ejemplo, si una barra negativamente cargada se acerca al bulbo, los electrones en el bulbo son repelidos, y el bulbo se queda con una carga positiva. Los electrones son conducidos al rectángulo metálico y a la hoja unida a él, que se separará, ya que tienen carga del mismo signo (figura 1.4b). De forma similar, si una barra cargada positivamente se acerca al bulbo, la hoja también se alejará. (¿Podría explicar por qué?)

Note que la carga neta sobre el electroscopio permanece igual a cero en estos casos. Puesto que el dispositivo está aislado, sólo se altera la *distribución* de carga. Sin

Nota: un electroscopio no cargado sólo detectará si un objeto está eléctricamente cargado. Si el electroscopio está cargado con un signo conocido, también podrá determinar el signo de la carga en el objeto.



a) El electroscopio neutro tiene cargas uniformemente distribuidas; la hoja está en posición vertical.

b) Las fuerzas electrostáticas hacen que la hoja se separe (sólo se muestra el exceso o carga neta).

◀ **FIGURA 1.4** El electroscopio. Este dispositivo sirve para determinar si un objeto está cargado eléctricamente. Cuando un objeto cargado se acerca al bulbo, la hoja se aleja de la pieza metálica.

embargo, es posible dar a un electroscopio (y a otros objetos) una carga neta por diferentes métodos, aunque todos implican una **carga electrostática**. Considere los siguientes procesos que generan carga electrostática.

Carga por fricción

Nota: desde un punto de vista externo, no es posible decir si la barra de caucho ganó cargas negativas o si la piel ganó cargas positivas. En otras palabras, mover electrones a la barra de caucho da por resultado la misma situación física que mover cargas positivas a la piel. Sin embargo, como el caucho es un aislante y sus electrones están fuertemente ligados, podríamos sospechar que la piel perdió electrones y que el caucho los ganó. En los sólidos, los protones —que están en el núcleo de los átomos— no se mueven; sólo los electrones lo hacen. Solamente es cuestión de saber qué material pierde electrones con mayor facilidad.

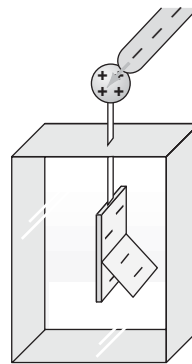
En el proceso de carga por fricción, al frotar ciertos materiales aislantes con tela o piel, resultan cargados eléctricamente mediante una transferencia de carga. Por ejemplo, si una barra de caucho duro se frota con piel, adquirirá una carga neta negativa; al frotar una barra de vidrio con seda, la barra adquirirá una carga neta positiva. Este proceso se llama **carga por fricción**. La transferencia de carga se debe al contacto entre los materiales, y la cantidad de carga transferida depende, como podría esperarse, de la naturaleza de los materiales implicados.

El ejemplo 1.1 fue realmente un ejemplo de carga por fricción, en el que usted recogió una carga neta de la alfombra. Si toca un objeto metálico, como la perilla de una puerta, es probable que sienta una chispa. Conforme su mano se aproxima, la perilla se carga positivamente y, por lo tanto, atrae los electrones de su mano. Conforme se desplazan, chocan con los átomos del aire y los excitan, emitiendo luz conforme pierden excitación (es decir, energía). Esta luz se ve como la chispa de un “mini relámpago” entre su mano y la perilla.

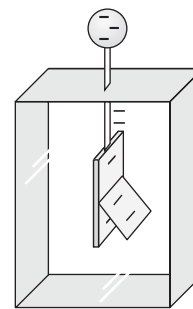
Carga por conducción (o contacto)

Al acercar una varilla cargada a un electroscopio, éste revelará que la varilla está cargada, pero no le indicará qué tipo de carga tiene esta última (positiva o negativa). Sin embargo, es posible determinar el signo de la carga si al electroscopio se le da primero un tipo conocido de carga (neta). Por ejemplo, los electrones pueden transferirse al electroscopio desde un objeto negativamente cargado, como se ilustra en la **figura 1.5a**.

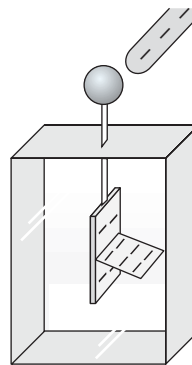
► **FIGURA 1.5 Carga por conducción** *a)* El electroscopio es neutro inicialmente (pero las cargas están separadas), cuando una varilla cargada se pone en contacto con el bulbo. *b)* La carga es transferida al electroscopio. *c)* Cuando una varilla de la misma carga se acerca al bulbo, la hoja se separa aún más. *d)* Cuando se acerca una varilla con carga opuesta, la hoja se colapsa.



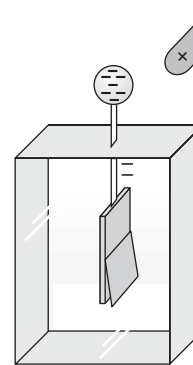
a) El electroscopio neutro se toca con una varilla con carga negativa.



b) Las cargas se transfieren al bulbo; el electroscopio tiene carga neta negativa.



c) La varilla cargada negativamente repele a los electrones; la hoja se separa más aún.



d) La varilla cargada positivamente atrae a los electrones; la hoja se colapsa.

Los electrones en la varilla se repelen entre sí, y algunos serán transferidos hacia el electroscopio. Advierta que la hoja está ahora permanentemente separada de la pieza de metal. En este caso, decimos que el electroscopio se ha **cargado por contacto o por conducción** (figura 1.5b). “Conducción” se refiere al flujo de carga durante el corto periodo en que los electrones son transferidos.

Si una varilla cargada negativamente se acerca al electroscopio, ahora con carga negativa, la hoja se separará aún más conforme más electrones son repelidos por el bulbo (figura 1.5c). Una varilla con carga contraria (positiva) causará que la hoja se colapse al atraer algunos electrones al bulbo y alejarlos del área de la hoja (figura 1.5d).

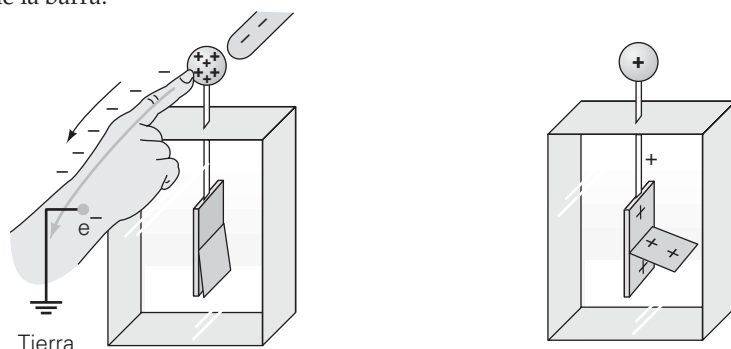
Carga por inducción

Usando una barra de caucho con carga negativa (cargada por fricción), cabe preguntar si es posible crear un electroscopio que esté positivamente cargado. La respuesta es sí, y hacerlo implica un proceso llamado **carga por inducción**. Comenzando con un electroscopio descargado, usted toca el bulbo con un dedo, lo que pone a tierra el electroscopio, esto es, ofrece una trayectoria por la cual los electrones pueden escapar del bulbo (▼ figura 1.6). Entonces, cuando una barra cargada negativamente se acerca al bulbo (pero sin tocarlo), la barra repele electrones del bulbo al dedo y hacia abajo a tierra (de ahí el término *tierra*). Retirar su dedo *mientras la barra cargada se mantiene cerca*, deja el electroscopio con una carga neta positiva. Esto se debe a que cuando se retira la barra, los electrones que viajan a la Tierra (es decir, al suelo) no tienen manera de regresar porque ha desaparecido el camino para ello.

Separación de carga por polarización

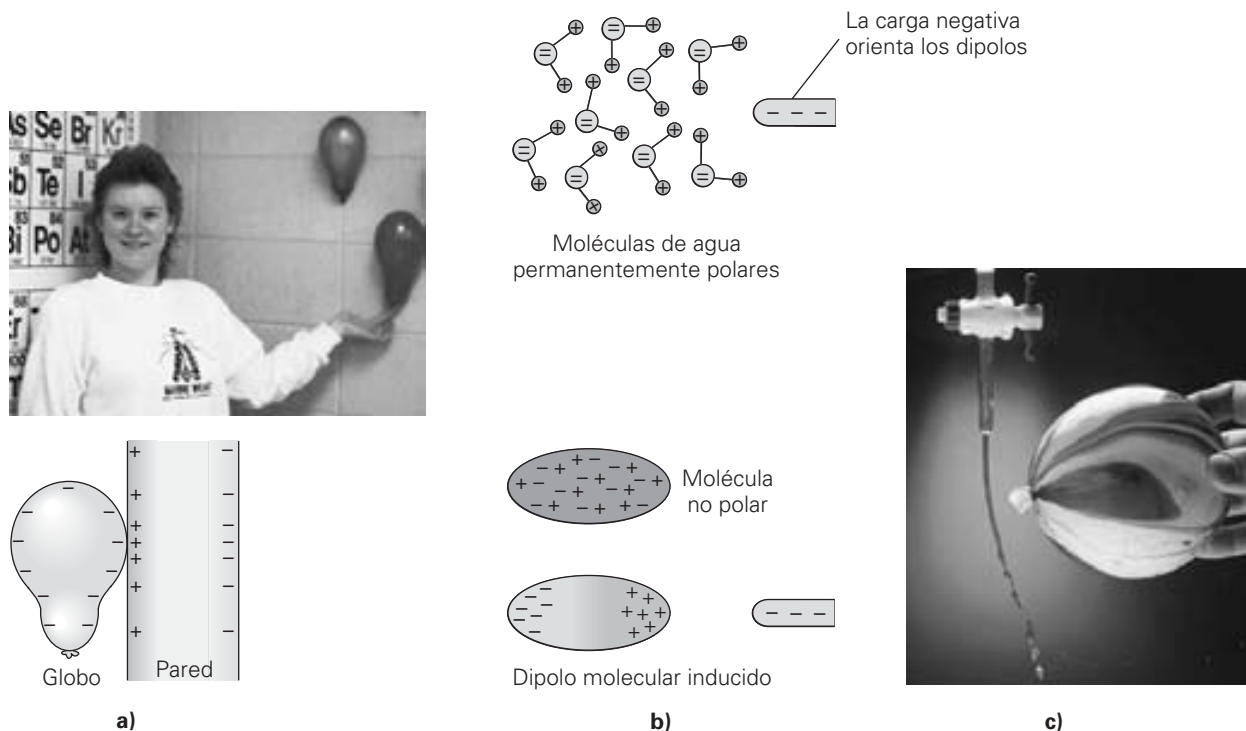
La carga por contacto y por inducción crean una carga neta mediante la remoción de carga de un objeto. Sin embargo, es posible que la carga se mueva *dentro del objeto* mientras la carga neta se mantiene en cero. En este caso, la inducción genera una **polarización**, o separación de la carga positiva y negativa. Si el objeto no es puesto a tierra, se volverá eléctricamente neutro, pero tendrá cantidades de carga en ambos extremos iguales pero de signo contrario. En esta situación, decimos que el objeto actúa como un **dipolo eléctrico** (véase la sección 1.4). En el nivel molecular, los dipolos eléctricos pueden ser permanentes; es decir, no necesitan tener cerca un objeto cargado para retener su separación de carga. Un buen ejemplo de esto es la molécula de agua. Ejemplos tanto de dipolos permanentes como de no permanentes, así como de las fuerzas que actúan sobre

▼ **FIGURA 1.6 Carga por inducción** a) Al tocar el bulbo con un dedo se forma una trayectoria hacia la tierra para la transferencia de carga. El símbolo e^- significa “electrón”. b) Cuando se retira el dedo, el electroscopio tiene una carga positiva neta, contraria a la de la barra.



a) Repelidos por la barra negativamente cargada, los electrones son transferidos a tierra a través de la mano.

b) Al retirar primero el dedo y luego la barra, el electroscopio queda positivamente cargado.



▲ **FIGURA 15.7 Polarización** *a)* Cuando los globos se cargan por fricción y se ponen en contacto con la pared, ésta se polariza. Esto es, se induce una carga de signo contrario sobre la superficie de la pared, a la que los globos se adhieren por la fuerza de la atracción electrostática. Los electrones en el globo no lo abandonan porque su material (el caucho) es un conductor deficiente. *b)* Algunas moléculas, como las del agua, son de naturaleza polar; esto es, tienen regiones separadas de carga positiva y negativa. Pero incluso algunas moléculas que no son normalmente de naturaleza dipolar pueden polarizarse temporalmente por la presencia de un objeto cargado cercano. La fuerza eléctrica induce una separación de carga y, en consecuencia, la aparición de dipolos moleculares temporales. *c)* Una corriente de agua se dobla hacia un globo cargado. El globo cargado simplemente atrae los extremos de las moléculas de agua, haciendo que la corriente se doble.

ellos se presentan en la ▲figura 1.7. Ahora seguramente comprende por qué cuando frota un globo con un suéter, el globo puede quedar adherido a una pared. El globo se carga por fricción, y el hecho de acercarlo a la pared polariza esta última. La carga de signo contrario en la superficie más cercana de la pared crea una fuerza atractiva neta.

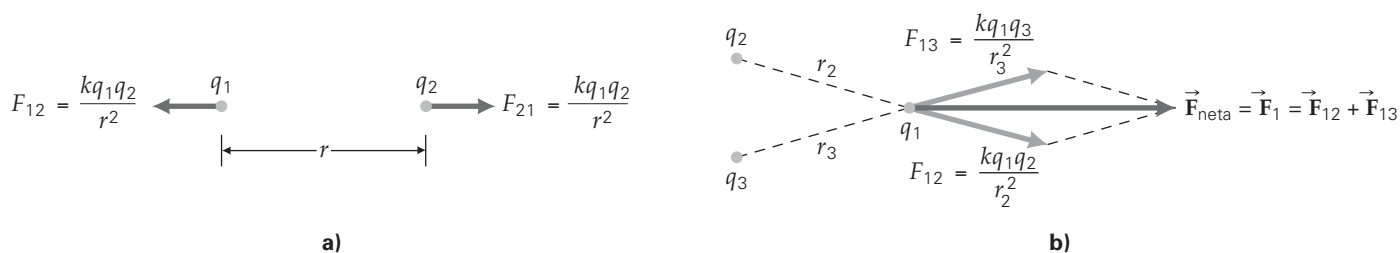
La carga electrostática en ocasiones resulta molesta —como cuando la adherencia estática ocasiona que la ropa y los papeles se adhieran entre sí— o incluso peligrosa —como cuando las descargas de chispas electrostáticas inician un incendio o causan una explosión en presencia de gas inflamable—. Para descargar la carga eléctrica, muchos camiones llevan cadenas de metal que cuelgan del chasis para que entren en contacto con la tierra. En las estaciones de gas hay letreros que advierten que hay que llenar los tanques de gas mientras éstos se encuentran sobre el suelo, no sobre la plataforma del camión ni sobre la superficie del portaequipaje del automóvil (¿por qué?).

Sin embargo, las cargas electrostáticas también resultan benéficas. Por ejemplo, el aire que respiramos es más limpio gracias a los precipitadores electrostáticos usados en las chimeneas. En esos dispositivos, las descargas eléctricas hacen que las partículas (productos secundarios de la quema de combustible) adquieran una carga neta. Entonces es posible retirar las partículas cargadas de los gases atrayéndolas a superficies eléctricamente cargadas. En menor escala, los purificadores de aire electrostático son accesibles para el hogar. (Véase la sección Hechos de física.)

1.3 Fuerza eléctrica

OBJETIVOS: *a)* Comprender la ley de Coulomb y *b)* usarla para calcular la fuerza eléctrica entre partículas cargadas.

Sabemos que las *direcciones* de las fuerzas eléctricas sobre cargas que interactúan están dadas por la ley carga-fuerza. Sin embargo, ¿qué sucede con sus *magnitudes*? Coulomb investigó esto y encontró que la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas “puntuales” (muy pequeñas) q_1 y q_2 depende directamente del producto de las cargas



▲ **FIGURA 1.8** La ley de Coulomb *a)* Las fuerzas electrostáticas que ejercen entre sí dos cargas puntuales son iguales y de signo contrario. *b)* Para una configuración de dos o más cargas puntuales, la fuerza sobre una carga particular es la suma vectorial de las fuerzas sobre ella que provocan todas las demás cargas. (Nota: en cada una de esas situaciones, todas las cargas son del mismo signo. ¿Cómo podemos decir que esto es cierto? ¿Puede decir cuáles son sus signos? ¿Cuál es la dirección de la fuerza sobre q_2 que se debe a q_3 ?)

e inversamente del cuadrado de la distancia entre ellas. Esto es, $F_e \propto q_1q_2/r^2$. (q es la magnitud de la carga; por lo tanto, q_1 significa la magnitud de q_1 .) Esta relación es matemáticamente similar a la de la fuerza gravitacional entre dos masas puntuales ($F_g \propto m_1m_2/r^2$); véase el capítulo 5 de *Física 11*.

Igual que las mediciones de Cavendish para determinar la constante de la gravitación universal G (sección 5.5 de *Física 11*), las mediciones de Coulomb dieron una constante de proporcionalidad, k , de manera que la fuerza eléctrica puede escribirse en forma de ecuación. Así, la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales se describe mediante una ecuación llamada **ley de Coulomb**:

$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (\text{sólo cargas puntuales, } q \text{ significa magnitud de la carga}) \quad (1.2)$$

Aquí, r es la distancia entre las cargas (▲ figura 1.8a) y k es una constante con un valor de

$$k = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

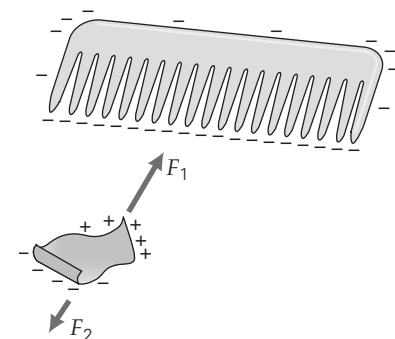
La ecuación 1.2 determina la fuerza entre dos partículas cargadas; pero, en muchos casos, tratamos con fuerzas entre más de dos cargas. En tal situación, la fuerza eléctrica neta sobre cualquier carga particular es la suma vectorial de las fuerzas sobre esa carga que provocan todas las otras cargas (figura 1.8b). Para hacer un repaso de la suma de vectores, utilizando fuerzas eléctricas, veremos los dos siguientes ejemplos.

Ejemplo conceptual 1.2 ■ Libre de carga: fuerzas eléctricas

Seguramente usted ha hecho esto. Al peinar el cabello seco con un peine de caucho, el peine adquiere una carga neta negativa. Entonces, el peine cargado podrá usarse para atraer y recoger pequeños trozos de papel *no cargado*. Esto parecería violar la ley de la fuerza de Coulomb. Como el papel no tiene carga neta, cabría esperar que no hubiera fuerza eléctrica sobre él. ¿Qué mecanismo de carga explica este fenómeno, y cómo lo explica? *a)* La conducción, *b)* la fricción o *c)* la polarización.

Razonamiento y respuesta. Como el peine no toca al papel, éste no se carga por conducción ni por fricción, porque estos dos mecanismos requieren del contacto. Entonces, la respuesta correcta es la *c*. Cuando el peine cargado está cerca del papel, éste se polariza (► figura 15.9). La clave para entender la atracción es notar que los extremos cargados del papel *no* están a la misma distancia del peine. El extremo positivo del papel está más cerca del peine que el extremo negativo. Como la fuerza eléctrica disminuye con la distancia, la atracción (\vec{F}_1) entre el peine y el extremo positivo del papel es mayor que la repulsión (\vec{F}_2) entre el peine y el extremo negativo del papel. Por lo tanto, después de sumar estas dos fuerzas vectorialmente, encontramos que la fuerza neta sobre el papel apunta hacia el peine, y si el papel es suficientemente ligero, se acelera en esa dirección.

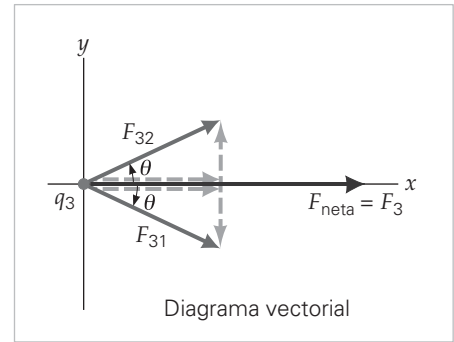
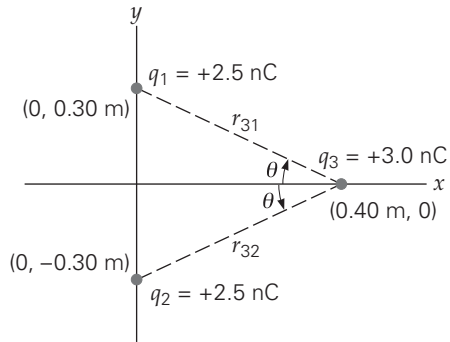
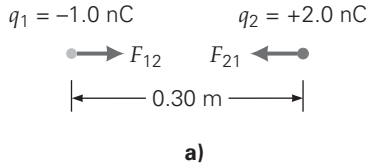
Ejercicio de refuerzo. ¿El fenómeno antes descrito le indica el signo de la carga sobre el peine? Explique por qué.



▲ **FIGURA 1.9** Peine y papel Véase el ejemplo conceptual 1.2.

Nota: la ley de Coulomb da la fuerza eléctrica, pero sólo entre cargas puntuales, no entre objetos con áreas cargadas que se extienden.

Nota: en los cálculos, consideraremos que k es exactamente igual a $9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ para fines de control de cifras significativas.



▲ FIGURA 1.10 Ley de Coulomb y fuerzas electrostáticas Véase el ejemplo 1.3.

Ejemplo 1.3 ■ Ley de Coulomb: suma vectorial en relación con la trigonometría

a) Dos cargas puntuales de -1.0 nC y $+2.0 \text{ nC}$ están separadas 0.30 m (▲figura 1.10a). ¿Cuál es la fuerza eléctrica sobre cada partícula? b) En la figura 1.10a se ilustra una configuración de tres cargas. ¿Cuál es la fuerza electrostática sobre q_3 ?

Razonamiento. Sumar fuerzas eléctricas no es diferente que sumar cualquier otro tipo de fuerzas. La única diferencia aquí es que usamos la ley de Coulomb para calcular sus magnitudes. Luego, sólo se trata de calcular componentes. a) Para las dos cargas puntuales, usamos la ley de Coulomb (ecuación 1.2), notando que las fuerzas son atractivas. (¿Por qué?) b) Aquí debemos usar componentes para sumar vectorialmente las dos fuerzas que actúan sobre q_3 que se deben a q_1 y q_2 . Podemos encontrar θ a partir de las distancias entre cargas. Este ángulo es necesario para calcular los componentes x y y de fuerza. (Véase la sugerencia para resolver problemas en la p. 13.)

Solución. Se listan los datos y se convierten nanocoulombs a coulombs:

Dado: a) $q_1 = -(1.0 \text{ nC}) \left(\frac{10^{-9} \text{ C}}{1 \text{ nC}} \right) = -1.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ **Encuentre:** a) \vec{F}_{12} y \vec{F}_{21}
 $q_2 = +(2.0 \text{ nC}) \left(\frac{10^{-9} \text{ C}}{1 \text{ nC}} \right) = +2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ b) \vec{F}_3

$r = 0.30 \text{ m}$

b) Los datos aparecen en la figura 1.10b. Convertimos las cargas a coulombs como en a.

a) La ecuación 1.2 da la magnitud de la fuerza que actúa sobre cada carga puntual:

$$F_{12} = F_{21} = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.0 \times 10^{-9} \text{ C})(2.0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.30 \text{ m})^2} = 0.20 \times 10^{-6} \text{ N} = 0.20 \mu\text{N}$$

Observe que la ley de Coulomb da sólo la magnitud de la fuerza. Sin embargo, como las cargas son de signo contrario, las fuerzas deben ser atractivas entre sí como es ilustra en la figura 1.10a.

b) Las fuerzas \vec{F}_{31} y \vec{F}_{32} deben sumarse vectorialmente, usando trigonometría y los componentes, para encontrar la fuerza neta. Como todas las cargas son positivas, las fuerzas son repulsivas, como se ilustra en el diagrama vectorial de la figura 1.10b. Como $q_1 = q_2$ y las cargas son equidistantes de q_3 , se infiere que \vec{F}_{31} y \vec{F}_{32} tienen igual magnitud.

Note en la figura que $r_{31} = r_{32} = 0.50 \text{ m}$. (¿Por qué?) Con datos de la figura, usamos de nuevo la ecuación 1.2:

$$F_{32} = \frac{kq_2q_3}{r_{32}^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(2.5 \times 10^{-9} \text{ C})(3.0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.50 \text{ m})^2} = 0.27 \times 10^{-6} \text{ N} = 0.27 \mu\text{N}$$

Tomando en cuenta las direcciones de \vec{F}_{31} y \vec{F}_{32} , vemos por simetría que los componentes y de los vectores se cancelan. Así, \vec{F}_3 (la fuerza neta sobre la carga q_3) actúa a lo largo del eje x positivo y tiene una magnitud de

$$F_3 = F_{31x} + F_{32x} = 2 F_{31x}$$

ya que $F_{31} = F_{32}$.

El ángulo θ se determina a partir de los triángulos; esto es, $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.30 \text{ m}}{0.40 \text{ m}}\right) = 37^\circ$.

Entonces, \vec{F}_3 tiene una magnitud de

$$\begin{aligned} F_3 &= 2 F_{31_x} = 2 F_{32} \cos \theta \\ &= 2(0.27 \mu\text{N}) \cos 37^\circ = 0.43 \mu\text{N} \end{aligned}$$

y actúa en la dirección x positiva (hacia la derecha).

Ejercicio de refuerzo. En el inciso b de este ejemplo, calcule la fuerza \vec{F}_1 sobre q_1 .

Las magnitudes de las cargas en el ejemplo 1.3 son típicas de cargas estáticas producidas por frotamiento; esto es, son diminutas. Así, las fuerzas implicadas son muy pequeñas para los estándares diarios, mucho más pequeñas que cualquier fuerza que hayamos estudiado hasta ahora. Sin embargo, en la escala atómica, incluso las fuerzas diminutas son capaces de producir enormes aceleraciones, porque las partículas (como los electrones y protones) tienen masas extremadamente pequeñas. Considere las respuestas en el ejemplo 1.4 en comparación con las respuestas en el ejemplo 1.3.

Sugerencia para resolver problemas

Los signos de las cargas pueden usarse explícitamente en la ecuación 1.2 con un valor positivo para F , para indicar una fuerza repulsiva, y un valor negativo para una fuerza atractiva. *Sin embargo, tal enfoque no se recomienda*, porque esta convención de signo sólo es útil en el caso de fuerzas unidimensionales, es decir, aquellas que tienen un solo componente, como en el ejemplo 1.3a. Cuando las fuerzas son bidimensionales, y tienen más de un componente, la ecuación 1.2 se usa para calcular la *magnitud* de la fuerza, considerando sólo la *magnitud* de las cargas (como en el ejemplo 1.3b). La ley de carga-fuerza se usa entonces para determinar la dirección de la fuerza entre cada par de cargas. (Elabore un bosquejo y marque en él los ángulos.) Finalmente calcule cada componente de fuerza usando trigonometría y combínelos apropiadamente. Este último enfoque será el que usaremos en este libro.

Ejemplo 1.4 ■ Dentro del núcleo: fuerzas electrostáticas repulsivas

a) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática repulsiva entre dos protones en un núcleo? Considere la distancia de centro a centro de los protones nucleares igual a $3.0 \times 10^{-15} \text{ m}$. b) Si los protones se liberan del reposo, ¿cuál es la magnitud de su aceleración inicial con respecto a la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la Tierra, g ?

Razonamiento. a) Debemos aplicar la ley de Coulomb para encontrar la fuerza repulsiva. b) Para encontrar la aceleración inicial, usamos la segunda ley de Newton ($F_{\text{neta}} = ma$).

Solución. Con las cantidades conocidas, tenemos lo siguiente:

Dado: $r = 3.00 \times 10^{-15} \text{ m}$ **Encuentre:** a) F_e (magnitud de la fuerza)
 $q_1 = q_2 = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (de la tabla 1.1)
 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (de la tabla 1.1) b) $\frac{a}{g}$ (magnitud de la aceleración comparada con g)

a) Usando la ley de Coulomb (ecuación 1.2), tenemos

$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{(3.00 \times 10^{-15} \text{ m})^2} = 25.6 \text{ N}$$

Esta fuerza es mucho mayor que la del ejemplo anterior y es equivalente al peso de un objeto con una masa de aproximadamente 2.5 kg. Entonces, con su pequeña masa, esperamos que el protón experimente una enorme aceleración.

b) Si esta fuerza actuara sola sobre un protón, produciría una aceleración de

$$a = \frac{F_e}{m_p} = \frac{25.6 \text{ N}}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 1.53 \times 10^{28} \text{ m/s}^2$$

Entonces

$$\frac{a}{g} = \frac{1.53 \times 10^{28} \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1.56 \times 10^{27}$$

(continúa en la siguiente página)

Esto es, $a \approx 10^{27} g$. El factor de 10^{27} es enorme. Para tener idea de qué tan grande es, si un átomo de uranio estuviera sujeto a esta aceleración, la fuerza neta requerida sería más o menos la misma que el peso de un oso polar (¡unos 450 kg!).

La mayoría de los átomos contienen más de dos protones en su núcleo. Con esas enormes fuerzas repulsivas, usted podría esperar que los núcleos se separaran. Como esto por lo general no ocurre, debe haber una fuerza atractiva más intensa que mantenga al núcleo unido. Ésta es la fuerza nuclear (o fuerte).

Ejercicio de refuerzo. Suponga que usted puede anclar un protón al suelo y que desea colocar otro directamente arriba del primero de manera que el segundo protón esté en equilibrio (esto es, que la fuerza de repulsión eléctrica que actúa sobre el segundo protón equilibre su peso). ¿Qué tan lejos deben estar uno de otro los protones?

Aunque hay una sorprendente similitud entre la forma matemática de las expresiones para las fuerzas eléctrica y gravitacional, hay una diferencia enorme en las intensidades relativas de las dos fuerzas, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1.5 ■ Dentro del átomo: fuerza eléctrica *versus* fuerza gravitacional

Determine la razón de la fuerza eléctrica y gravitacional entre un protón y un electrón. En otras palabras, ¿cuántas veces es mayor la fuerza eléctrica que la fuerza gravitacional?

Razonamiento. La distancia entre el protón y el electrón no se conoce. Sin embargo, la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional varían como el cuadrado inverso de la distancia, por lo que la distancia se cancela en una razón. Usando la ley de Coulomb y la ley de la gravitación de Newton (capítulo 5 de *Física 11*), es posible determinar la razón si se conocen las cargas, las masas y las constantes eléctrica y gravitacional apropiadas.

Solución. Se conocen las cargas y masas de las partículas (tabla 1.1), así como la constante eléctrica k y la constante gravitacional universal G .

$$\begin{array}{ll} \text{Dado:} & q_e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \\ & q_p = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \\ & m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ & m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{array} \qquad \text{Encuentre: } \frac{F_e}{F_g} \text{ (razón de fuerzas)}$$

Las expresiones para las fuerzas son

$$F_e = \frac{kq_e q_p}{r^2} \quad \text{y} \quad F_g = \frac{Gm_e m_p}{r^2}$$

Formando una razón de magnitudes para fines de comparación (y para cancelar r) se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{F_e}{F_g} &= \frac{kq_e q_p}{Gm_e m_p} \\ &= \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})} = 2.27 \times 10^{39} \end{aligned}$$

o

$$F_e = (2.27 \times 10^{39})F_g$$

La magnitud de la fuerza electrostática entre un protón y un electrón es más de 10^{39} veces mayor que la magnitud de la fuerza gravitacional. Mientras que un factor de 10^{39} es incomprensible para la mayoría, debería ser perfectamente claro que por este enorme valor, la fuerza gravitacional entre partículas cargadas generalmente se ignora en nuestro estudio de la electrostática.

Ejercicio de refuerzo. Con respecto a este ejemplo, demuestre que la gravedad es aún más insignificante comparada con la fuerza eléctrica repulsiva entre dos electrones. Explique por qué esto es así.

1.4 Campo eléctrico

OBJETIVOS: a) Comprender la definición del campo eléctrico y b) trazar líneas de campo eléctrico y calcular campos eléctricos para distribuciones simples de carga.

La fuerza eléctrica, como la fuerza gravitacional, es una fuerza con “acción a distancia”. Como el rango de la fuerza eléctrica es infinito ($F_e \propto 1/r^2$ y tiende a cero sólo si r tiende a infinito), una configuración particular de cargas tendrá un efecto sobre una carga adicional colocada en cualquier parte cercana.

La idea de una fuerza que actúa a través del espacio fue difícil de aceptar por los primeros investigadores, y entonces se introdujo el concepto más moderno de *campo de fuerza* o simplemente campo. Un *campo eléctrico* se concibe como rodeando todo conjunto de cargas. Así, el campo eléctrico representa el *efecto físico* de una configuración particular de cargas sobre el espacio cercano. El campo es la manera de representar lo que es diferente acerca del espacio cercano por la presencia de las cargas. El concepto nos permite pensar en cargas que interactúan con el campo eléctrico creado por otras cargas, y no directamente con otras cargas “a cierta distancia”. La idea central del concepto del campo eléctrico es la siguiente: una configuración de cargas crea un campo eléctrico en el espacio cercano. Si en este campo eléctrico se coloca otra carga, el *campo* ejercerá una fuerza eléctrica sobre ella. Por lo tanto:

Las cargas crean campos, y éstos, a su vez, ejercen fuerzas sobre otras cargas.

Un campo eléctrico es un *campo vectorial* (tiene dirección y magnitud), lo que nos permite determinar la fuerza ejercida (incluida la dirección) sobre una carga en una posición particular en el espacio. *Sin embargo, el campo eléctrico no es una fuerza.* La magnitud (o intensidad) del campo eléctrico se define como la fuerza ejercida por carga unitaria. Determinar la fuerza de un campo eléctrico puede imaginarse teóricamente utilizando el siguiente procedimiento. Coloque una pequeña carga (llamada *carga de prueba*) en un punto de interés. Mida la fuerza que actúa sobre la carga de prueba, divida entre la cantidad de carga, y encuentre así la fuerza que se ejercería *por coulomb*. Luego imagine que se retira la carga de prueba. La fuerza desaparece (¿por qué?), pero el campo permanece, porque es generado por las cargas cercanas, que permanecen. Cuando el campo eléctrico se determina en muchos puntos, tenemos un “mapa” de la fuerza de campo eléctrico, pero no de su dirección. Así que la descripción es incompleta.

Puesto que la dirección del campo eléctrico se especifica mediante la dirección de la fuerza sobre la carga de prueba, depende de si la carga de prueba es positiva o negativa. La convención de signos es que se usa una *carga de prueba positiva* (q_+) para medir la dirección del campo eléctrico (véase la ► figura 1.11). Esto es,

La dirección del campo eléctrico es en la dirección de la fuerza que experimenta una carga de prueba positiva.

Una vez que se conocen la magnitud y dirección del campo eléctrico que genera una configuración de cargas, es posible ignorar las cargas “fuente” y hablar sólo en términos del campo que éstas han generado. Este procedimiento de visualizar las interacciones eléctricas entre las cargas a menudo facilita los cálculos.

El **campo eléctrico** \vec{E} en cualquier punto se define como sigue

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{en } q_+}}{q_+} \quad (1.3)$$

Unidad SI del campo eléctrico: newton/coulomb (N/C)

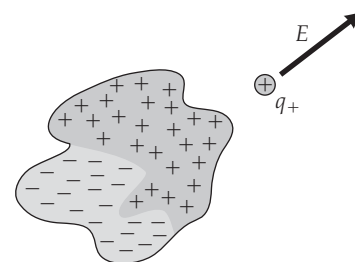
La dirección de \vec{E} es en la dirección de la fuerza sobre una pequeña carga de prueba *positiva* en ese punto.

Para el caso especial de una carga puntual, podemos usar la ley de fuerza de Coulomb. Para determinar la magnitud del campo eléctrico que se debe a una carga puntual a una distancia r de esa carga puntual, se utiliza la ecuación 1.3:

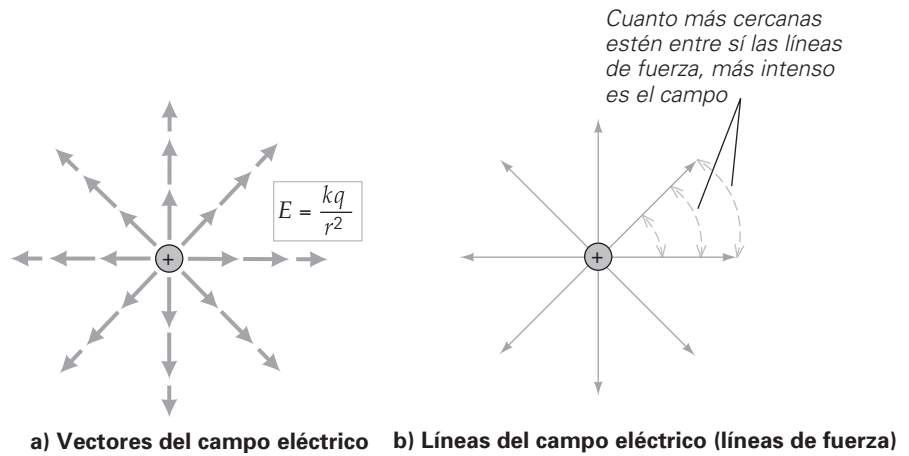
$$E = \frac{F_{\text{en } q_+}}{q_+} = \frac{(kq_+q_+/r^2)}{q_+} = \frac{kq}{r^2}$$

Nota: las cargas generan un campo eléctrico, que actúa sobre otras cargas colocadas en ese campo.

Nota: una *carga de prueba* (q_+) es pequeña y positiva.



▲ **FIGURA 1.11** Dirección del campo eléctrico Por convención, la dirección del campo eléctrico \vec{E} es la misma que la de la fuerza que experimenta por una carga de prueba imaginaria (positiva). Para ver la dirección, hay que preguntarse en qué dirección se acelera la carga de prueba si se libera. Aquí, el “sistema de cargas” produce un campo eléctrico (neto) hacia arriba y hacia la derecha en el lugar de la carga de prueba. En esta configuración particular, ¿podría explicar esta dirección observando los signos y lugares de las cargas en el sistema?



▲ **FIGURA 1.12** Campo eléctrico *a)* El campo eléctrico se aleja de una carga puntual positiva, en el sentido en que una fuerza sería ejercida sobre una pequeña carga de prueba positiva. La magnitud del campo (la longitud de los vectores) disminuye conforme aumenta la distancia desde la carga, lo que refleja la relación de distancia de cuadrado inverso, característica del campo producido por una carga puntual. *b)* En este caso simple, los vectores se conectan fácilmente para dar un patrón de líneas de campo eléctrico de una carga puntual positiva.

Esto es,

$$E = \frac{kq}{r^2} \quad (\text{magnitud del campo eléctrico provocado por la carga puntual } q) \quad (1.4)$$

Es importante notar que en la obtención de la ecuación 1.4, q_+ se cancela. Esto debe suceder siempre, porque el campo es producido por las otras cargas, *no* por la carga de prueba q_+ .

Algunos vectores de campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva se ilustran en la ▲figura 1.12a. Note que sus direcciones están *alejándose de la carga positiva*, porque una carga de prueba positiva sentiría una fuerza en esta dirección. Advierta también que la magnitud del campo (la longitud de la flecha) disminuye conforme la distancia r aumenta.

Si hay más de una carga generando un campo eléctrico, entonces el campo eléctrico total o neto en cualquier punto se encuentra usando el **principio de superposición para campos eléctricos**, que se enuncia como sigue.

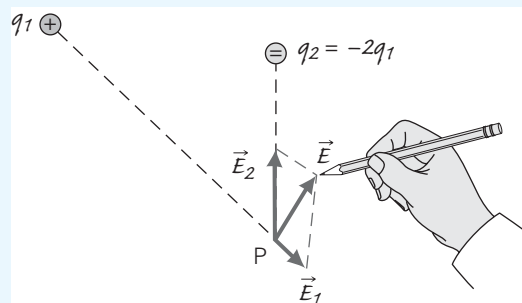
Para una configuración de cargas, el campo eléctrico total o neto en cualquier punto es la suma vectorial de los campos eléctricos que se deben a las cargas individuales.

El uso de este principio se ilustra en los siguientes dos ejemplos, y una manera de determinar cualitativamente la dirección del campo eléctrico de un grupo de cargas se muestra en la sección Aprender dibujando referente al uso del principio de superposición para determinar la dirección del campo eléctrico.

APRENDER DIBUJANDO

USO DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN PARA DETERMINAR LA DIRECCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

Para determinar la dirección del campo eléctrico en cualquier punto P , simplemente dibuje los vector de los campos eléctricos individuales y súmelos, tomando en cuenta sus magnitudes relativas, si es posible. En la situación específica mostrada aquí, \vec{E}_1 es mucho más pequeño que \vec{E}_2 por los factores de distancia y carga. ¿Puede explicar por qué \vec{E}_2 , si se dibuja con precisión, sería aproximadamente ocho veces más largo que \vec{E}_1 ? El paso final sería completar la suma vectorial.



Ejemplo 1.6 ■ Campos eléctricos en una dimensión: campo cero por superposición

Dos cargas puntuales se encuentran sobre el eje x , como se ilustra en la ►figura 1.13. Identifique todos los lugares en el eje donde el campo eléctrico es cero.

Razonamiento. Cada carga puntual genera su propio campo. Por el principio de superposición, el campo eléctrico es la suma vectorial de los dos campos. Estamos buscando los lugares donde estos campos son iguales pero opuestos, de manera que se cancelen y den un campo eléctrico (*total o neto*) de cero.

Solución. Comenzamos por especificar el lugar a localizar como una distancia x a partir de q_1 (que se ubica en $x = 0$) y por convertir las cargas de microcoulombs a coulombs, como es costumbre.

Dado: $d = 0.60$ m (distancia entre las cargas) **Encontrar:** x [el lugar o lugares donde E es cero]
 $q_1 = +1.5 \mu\text{C} = +1.5 \times 10^{-6}$ C
 $q_2 = +6.0 \mu\text{C} = +6.0 \times 10^{-6}$ C

Como ambas cargas son positivas, sus campos apuntan hacia la derecha en todos los lugares a la derecha de q_2 . Por consiguiente, los campos no se cancelan en esa región. De manera similar, a la izquierda de q_1 , ambos campos apuntan hacia la izquierda y no se cancelan. La única posibilidad de cancelación se da *entre* las cargas. En esa región, los dos campos se cancelarán si sus magnitudes son iguales, porque están en direcciones opuestas. Al igualar las magnitudes y despejar x :

$$E_1 = E_2 \quad \text{o} \quad \frac{kq_1}{x^2} = \frac{kq_2}{(d-x)^2}$$

Al reordenar esta expresión y cancelar la constante k , se obtiene

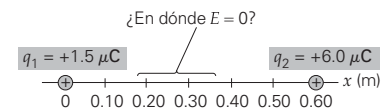
$$\frac{1}{x^2} = \frac{(q_2/q_1)}{(d-x)^2}$$

Con $q_2/q_1 = 4$, se saca la raíz cuadrada de ambos lados:

$$\sqrt{\frac{1}{x^2}} = \sqrt{\frac{q_2/q_1}{(d-x)^2}} = \sqrt{\frac{4}{(d-x)^2}} \quad \text{o} \quad \frac{1}{x} = \frac{2}{d-x}$$

Al resolver, $x = d/3 = 0.60 \text{ m}/3 = 0.20 \text{ m}$. (¿Por qué no utilizamos la raíz cuadrada negativa? Inténtelo.) El hecho de que el resultado esté más cerca de q_1 tiene sentido desde el punto de vista físico. Como q_2 es la carga más grande, para que los dos campos sean iguales en magnitud, el lugar debe estar más cerca de q_1 .

Ejercicio de refuerzo. Repita este ejemplo, cambiando el signo de la carga de la derecha.

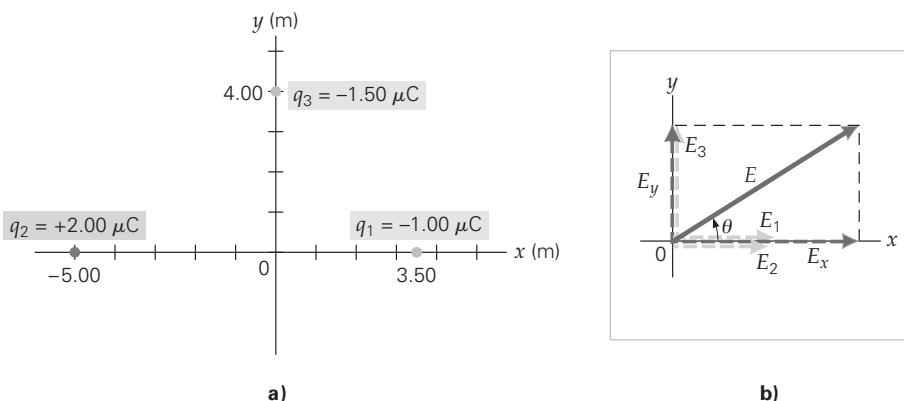


▲ FIGURA 1.13 Campo eléctrico en una dimensión Véase el ejemplo 1.6.

Nota: campo eléctrico total:
 $\vec{E} = \sum \vec{E}_i$.

Ejemplo integrado 1.7 ■ Campos eléctricos en dos dimensiones: uso de componentes vectoriales y superposición

La ►figura 1.14a muestra una configuración de tres cargas puntuales. **a)** ¿En qué cuadrante está el campo eléctrico? 1) en el primer cuadrante, 2) en el segundo cuadrante o 3) en el tercer cuadrante. Explique su razonamiento, usando el principio de superposición. **b)** Calcule la magnitud y dirección del campo eléctrico en el origen que se debe a esta configuración de cargas.



(continúa en la siguiente página)

◀ FIGURA 1.14 Determinación del campo eléctrico Véase el Ejemplo integrado 1.7.

a) Razonamiento conceptual. En general, el campo eléctrico apunta hacia cargas puntuales negativas y desde cargas puntuales positivas. Por lo tanto, \vec{E}_1 y \vec{E}_2 apuntan en el sentido x positivo y \vec{E}_3 apunta a lo largo del eje y positivo. Como el campo eléctrico es la suma de esos vectores, sus dos componentes son positivos. Por lo tanto, \vec{E} debe estar en el primer cuadrante (figura 1.14b). Así, la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Las direcciones de los campos eléctricos individuales se muestran en el inciso *a*. De acuerdo con el principio de superposición, se requiere sumar los campos vectorialmente para encontrar el campo eléctrico ($\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$).

Al listar los datos y convertir las cargas a coulombs, tenemos:

$$\begin{array}{ll} \text{Dado: } q_1 = -1.00 \mu\text{C} = -1.00 \times 10^{-6} \text{ C} & \text{Encuentre: } \vec{E} \text{ (campo eléctrico total en el} \\ q_2 = +2.00 \mu\text{C} = +2.00 \times 10^{-6} \text{ C} & \text{origen)} \\ q_3 = -1.50 \mu\text{C} = -1.50 \times 10^{-6} \text{ C} & \\ r_1 = 3.50 \text{ m} & \\ r_2 = 5.00 \text{ m} & \\ r_3 = 4.00 \text{ m} & \end{array}$$

A partir del diagrama, E_y se debe enteramente a \vec{E}_3 y E_x es la suma de las magnitudes de \vec{E}_1 y \vec{E}_2 . Para calcular las magnitudes de los tres campos que forman el campo total, se emplea la ecuación 1.4. Estas magnitudes son

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3.50 \text{ m})^2} = 7.35 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(2.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(5.00 \text{ m})^2} = 7.20 \times 10^2 \text{ N/C}$$

$$E_3 = \frac{kq_3}{r_3^2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.50 \times 10^{-6} \text{ C})}{(4.00 \text{ m})^2} = 8.44 \times 10^2 \text{ N/C}$$

Las magnitudes de los componentes x y y del campo total son

$$E_x = E_1 + E_2 = +7.35 \times 10^2 \text{ N/C} + 7.20 \times 10^2 \text{ N/C} = +1.46 \times 10^3 \text{ N/C}$$

y

$$E_y = E_3 = +8.44 \times 10^2 \text{ N/C}$$

En forma de componentes,

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} = (1.46 \times 10^3 \text{ N/C})\hat{x} + (8.44 \times 10^2 \text{ N/C})\hat{y}$$

Usted debería demostrar que, en forma magnitud-ángulo, esto es

$$E = 1.69 \times 10^3 \text{ N/C en } \theta = 30.0^\circ \text{ (}\theta \text{ está en el primer cuadrante respecto al eje } x \text{ positivo)}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que q_1 se movió al origen. Encuentre el campo eléctrico en su posición anterior.

Líneas eléctricas de fuerza

Una manera conveniente de representar *gráficamente* el patrón del campo eléctrico es usando *líneas eléctricas de fuerza* o **líneas de campo eléctrico**. Para comenzar, considere los vectores de campo eléctrico cerca de una carga puntual positiva, como en la figura 1.12a. Los vectores están "conectados" en la figura 1.12b. Esto permite construir el *patrón de las líneas de campo eléctrico* generado por una carga puntual. Observe que el campo eléctrico es más intenso (su separación disminuye) conforme nos acercamos a la carga. También note que en cualquier punto sobre una línea de campo, la *dirección* del campo eléctrico es tangente a la línea. (Las líneas por lo regular tienen flechas unidas a ellas que indican la dirección general del campo.) Debe quedar claro que las líneas de campo eléctrico no pueden cruzarse. Si lo hicieran, esto significaría que en el lugar de cruce habría dos direcciones para la fuerza sobre una carga colocada ahí, lo cual sería un resultado no razonable desde el punto de vista de la física.

Las reglas generales para dibujar e interpretar líneas de campo eléctrico son las siguientes:

1. Cuanto más cerca están las líneas de campo, más intenso es el campo eléctrico.
2. En cualquier punto, la dirección del campo eléctrico es tangente a las líneas de campo.
3. Las líneas de campo eléctrico empiezan en cargas positivas y terminan en cargas negativas.
4. El número de líneas que salen o entran a una carga es proporcional a la magnitud de ésta.
5. Las líneas de campo eléctrico nunca se cruzan.

Estas reglas nos permiten hacer un “mapa” del patrón de líneas eléctricas de fuerza para varias configuraciones de carga. (Véase la sección Aprender dibujando referente al trazado de líneas eléctricas de fuerza en esta página.)

Apliquemos ahora esas reglas y el principio de superposición para hacer un mapa del patrón de líneas de campo eléctrico que genera un *dipolo eléctrico* en el ejemplo 1.8. Un **dipolo eléctrico** consiste en dos cargas eléctricas (o “polos”, como se conocían anteriormente), iguales pero de signo contrario. Si bien la carga neta sobre el dipolo es cero, éste genera un campo eléctrico porque las cargas están separadas. Si no estuvieran separadas, sus campos se cancelarían en todos los lugares.

Además de aprender cómo determinar las líneas de campo eléctrico, es importante estudiar los dipolos, porque se presentan en la naturaleza. Por ejemplo, los dipolos eléctricos sirven como un modelo para las moléculas polarizadas importantes, como la molécula de agua. (Véase la figura 1.7.) También consulte la sección A fondo 1.2 sobre los campos eléctricos en las fuerzas poliacas y en la naturaleza: armas paralizantes y peces eléctricos, en la p. 22.

Ejemplo 1.8 ■ Construcción del patrón del campo eléctrico de un dipolo

Usando el principio de superposición y las reglas de las líneas de campo eléctrico, construya una línea típica de campo eléctrico para un dipolo eléctrico.

Razonamiento. La construcción implica la suma vectorial de los campos eléctricos individuales desde los dos extremos opuestos del dipolo.

Solución.

Dado: un dipolo eléctrico de dos cargas iguales y opuestas separadas una distancia d

Encuentre: una línea típica de campo eléctrico

En la figura ▼ 1.15a se ilustra un dipolo eléctrico. Para seguirle la pista a los dos campos, llamemos a la carga positiva q_+ y a la carga negativa q_- . Sus campos individuales, \vec{E}_+ y \vec{E}_- , se designarán con los mismos subíndices.

Como los campos eléctricos (y también las líneas de campo) comienzan en cargas positivas, comencemos en el punto A, cerca de la carga q_+ . Como este punto está mucho más cerca de q_+ , se infiere que $E_+ > E_-$. Sabemos que \vec{E}_+ siempre apunta alejándose de q_+ y que \vec{E}_- siempre apunta hacia q_- . Tomando esto en cuenta, estamos en condiciones de dibujar cualitativamente los dos campos en A. El método del paralelogramo determina su suma vectorial: el campo eléctrico en A.

Como tratamos de hacer un mapa de la línea de campo eléctrico, la dirección general del campo eléctrico en A señala aproximadamente a nuestro nuevo punto, B. En B, se tiene una magnitud reducida (¿por qué?) y un ligero cambio direccional tanto en \vec{E}_+ como en \vec{E}_- . Por ahora usted debería ver cómo se determinan los campos en C y en D. El punto D es especial porque está sobre la bisectriz perpendicular del eje dipolar (la línea que conecta las dos cargas). El campo eléctrico apunta hacia abajo en cualquier parte sobre esta línea. Usted debe continuar la construcción en los puntos E, F y G.

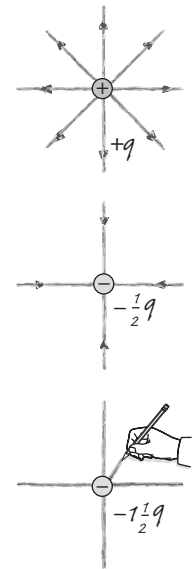
Por último, para construir la línea de campo eléctrico, comencemos en el extremo positivo del dipolo, porque las líneas de campo salen de ese extremo. Como los vectores de campo eléctrico son tangentes a las líneas de campo, dibujamos la línea para satisfacer este requisito. [Usted debe poder trazar las otras líneas y comprender el patrón completo del campo dipolar que se ilustra en la figura 1.15b.]

Ejercicio de refuerzo. Usando los procedimientos de este ejemplo, construya las líneas de campo que comienzan a) justo arriba de la carga positiva, b) justo abajo de la carga negativa y c) justo abajo de la carga positiva.

APRENDER DIBUJANDO

Trazado de líneas eléctricas de fuerza

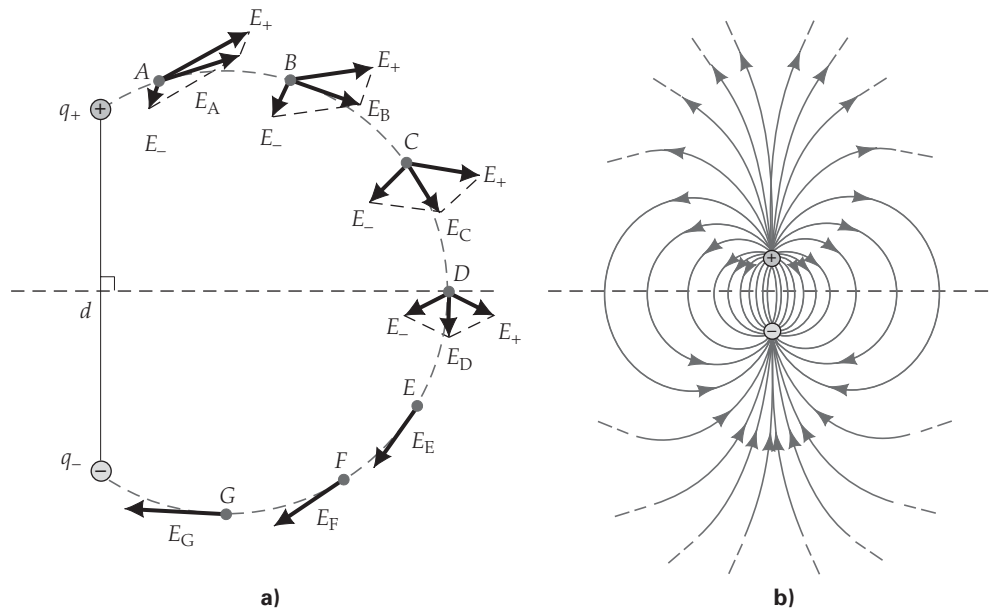
Trazo de líneas eléctricas de fuerza



¿Cuántas líneas deberían dibujarse para $-1\frac{1}{2}q$, y cuáles deberían ser sus direcciones?

Nota: recuerde que el nombre “líneas eléctricas de fuerza” es un término equivocado. Estas líneas de campo representan el campo eléctrico, no la fuerza eléctrica.

► **FIGURA 1.15** Mapa del campo eléctrico provocado por un dipolo
 a) Se muestra la construcción de una línea de campo eléctrico de un dipolo. El campo eléctrico es la suma vectorial de los dos campos producidos por los dos extremos del dipolo. (Véase el ejemplo 1.8 para más detalles.) b) El campo total del dipolo eléctrico se determina siguiendo el procedimiento del inciso a en otros puntos cerca del dipolo.



La figura 1.16a muestra el uso del principio de superposición para construir las líneas de campo eléctrico que genera una sola placa grande cargada. Note que el campo apunta perpendicularmente alejándose de la placa en ambos lados. La figura 1.16b muestra el resultado si la placa tiene carga negativa, la única diferencia es la dirección del campo. Ahora estamos en condiciones de encontrar el campo entre dos placas con cargas espaciadas y contrarias. El resultado es el patrón de la figura 1.16c. A causa de la cancelación de los componentes horizontales del campo (mientras nos mantenemos alejados de las orillas de la placa), el campo eléctrico es uniforme y apunta de la carga positiva a la negativa. (Piense en la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva colocada entre las placas.)

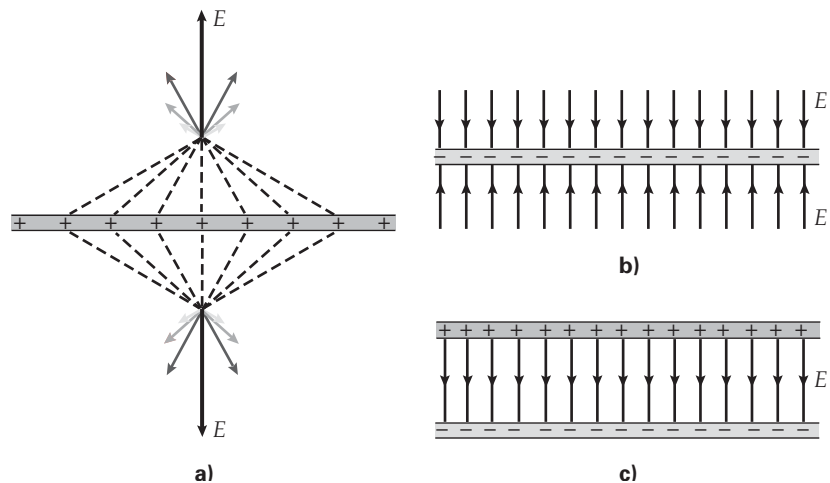
La obtención de la expresión matemática para la magnitud del campo eléctrico entre dos placas está más allá del alcance de este libro. Sin embargo, el resultado es

$$E = \frac{4\pi kQ}{A} \quad (\text{campo eléctrico entre placas paralelas}) \quad (1.5)$$

donde Q es la magnitud de la carga total sobre una de las placas y A es el área de una placa. Las placas paralelas son comunes en aplicaciones electrónicas. Por ejemplo, en el capítulo 2 veremos que un importante elemento de los circuitos eléctricos es un dispositivo llamado *condensador* (o *capacitor*), que, en su forma más simple, es precisamente un conjunto de placas paralelas. Los condensadores juegan un papel crucial en dispositivos que salvan vidas, tales como los *desfibriladores del corazón*, como veremos en el capítulo 2.

Los relámpagos que van de una nube a la tierra se consideran aproximadamente como un sistema de placas paralelas muy cercanas entre sí como en el siguiente ejemplo. (Véase la sección A fondo sobre el tema de relámpagos y pararrayos en la siguiente página.)

► **FIGURA 1.16** Campo eléctrico provocado por placas paralelas muy grandes
 a) Sobre una placa cargada positivamente, el campo eléctrico neto apunta hacia arriba. Aquí, los componentes horizontales de los campos eléctricos de varios lugares sobre la placa se cancelan. Debajo de la placa, \vec{E} apunta hacia abajo.
 b) Para una placa con carga negativa, el sentido del campo eléctrico (mostrado en ambos lados de la placa) se invierte.
 c) La superposición de los campos de ambas placas da por resultado una cancelación fuera de las placas y en un campo aproximadamente uniforme entre ellas.



A FONDO 1.1 RELÁMPAGOS Y PARARRAYOS

Aunque la liberación violenta de energía eléctrica en forma de relámpagos es un suceso común, aún tenemos mucho que aprender acerca de cómo se forman. Sabemos que durante la formación de un cumulonimbo, o nube de tormenta, ocurre una separación de carga. No se comprende por completo cómo es que se realiza la separación de carga, pero es un fenómeno que debe estar asociado con el rápido movimiento vertical del aire y la humedad dentro de las nubes de tormenta. Cualquiera que sea el mecanismo, la nube adquiere diferentes cargas en distintas regiones y, por lo general, en la parte inferior hay carga negativa.

Como resultado, se induce una carga contraria en la superficie terrestre (figura 1a). En algún momento, el relámpago reduce esta diferencia de carga ionizando el aire y permitiendo que exista un flujo de carga entre la nube y la tierra. Sin embargo, el aire es un buen aislante, de manera que el campo eléctrico debe ser muy fuerte para que la ionización ocurra. (Véase el ejemplo 1.9 para una estimación cuantitativa de la carga en una nube.)

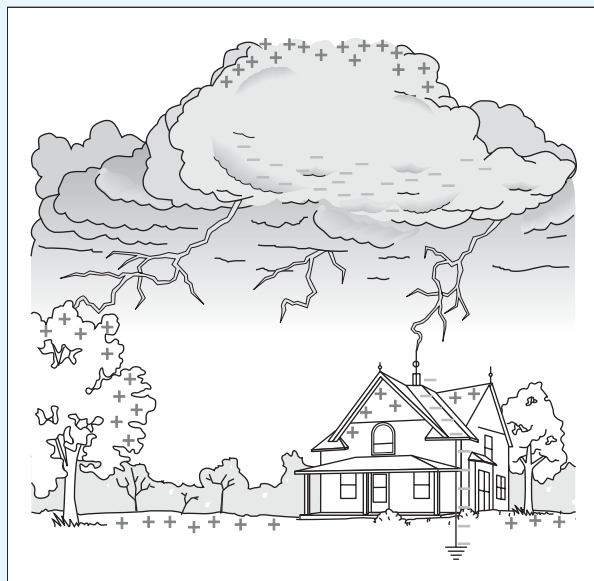
La mayor parte de los relámpagos ocurren enteramente dentro de la nube (descargas intranube) en donde no pueden verse directamente. Sin embargo, las descargas visibles ocurren entre dos nubes (descargas de nube a nube) y entre la nube y la Tierra (descarga de nube a tierra). Las fotografías de descargas de nube a tierra tomadas con cámaras especiales de alta velocidad revelan una trayectoria de ionización hacia abajo casi invisible. El relámpago descarga en una serie de etapas o saltos, por lo que se le conoce como *líder escalonado*. Conforme el líder se acerca a la tierra, los iones con carga positiva surgen de los árboles, los edificios altos o el suelo en forma de *serpentina* para encontrarse con él.

Cuando una serpentina y un líder hacen contacto, los electrones a lo largo del canal de este último fluyen hacia abajo. El flujo inicial tiene lugar cerca del suelo, y conforme continúa, los

electrones que caen cada vez más arriba comienzan a migrar hacia abajo. Luego, la trayectoria del flujo de electrones se extiende hacia arriba en lo que se conoce como *descarga de retorno*. El surgimiento de un flujo de carga en la descarga de retorno provoca que la trayectoria conductiva se ilumine, produciendo el brillante relámpago que vemos y que se registra en las fotografías de exposición prolongada (figura 1b). La mayor parte de los destellos de los relámpagos tienen una duración de menos de 0.50 s. Por lo general, después de la descarga inicial, tiene lugar otra ionización a lo largo del canal original y ocurre otra descarga de retorno. La mayor parte de los relámpagos tienen tres o cuatro descargas de retorno.

Se dice con frecuencia que Benjamin Franklin fue el primero en demostrar la naturaleza eléctrica del relámpago. En 1750 sugirió un experimento en el que se utilizaría una varilla metálica sobre un edificio alto. Sin embargo, un francés llamado Thomas François d'Alibard realizó el experimento utilizando una varilla durante una tormenta (figura 1c). Más tarde, Franklin realizó un experimento similar con una cometa que hizo volar durante una tormenta.

Un resultado práctico del trabajo de Franklin con los relámpagos fue el *pararrayos*, que consiste simplemente en una varilla metálica aguzada, conectada mediante un cable a una varilla de metal dirigida hacia el interior del suelo, es decir, puesta a tierra. La punta de la varilla elevada, con su densa acumulación de carga positiva inducida y gran campo eléctrico (véase la figura 1.19b), intercepta al líder escalonado ionizado de la nube en su trayecto hacia abajo, y lo descarga a tierra sin peligro antes de que llegue a la estructura o haga contacto con una serpentina dirigida hacia arriba. Esto evita la formación de las descargas eléctricas dañinas asociadas con la descarga de retorno.



a)



b)



c)

FIGURA 1 Relámpagos y pararrayos a) La polarización de la nube induce una carga en la superficie de la Tierra, b) Cuando el campo se vuelve suficientemente grande, suelta una descarga eléctrica, a la que llamamos relámpago, c) Un pararrayos, montado en la parte más alta de una estructura, ofrece una trayectoria hacia la tierra para evitar daños.

A FONDO

1.2 CAMPOS ELÉCTRICOS EN LAS FUERZAS POLICIACAS Y EN LA NATURALEZA: ARMAS PARALIZANTES Y PECES ELÉCTRICOS

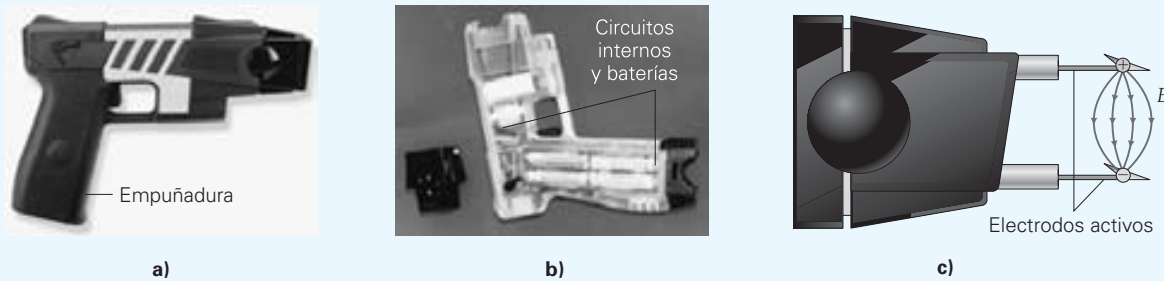


FIGURA 1 La pistola paralizante Taser. *a)* El exterior de una pistola paralizante; observe la empuñadura y los dos electrodos. *b)* El interior: los circuitos necesarios para aumentar el campo eléctrico y la separación de carga a la fuerza requerida para interrumpir la comunicación entre los nervios. *c)* Una ilustración del campo eléctrico entre los electrodos. (Las cargas cambian de signo de forma periódica, produciendo un campo eléctrico oscilatorio.)

Las pistolas paralizantes y los peces eléctricos exhiben propiedades similares en sus campos eléctricos. Las pistolas paralizantes (Taser manual) generan una separación de carga utilizando baterías y circuitos internos. Estos circuitos producen una gran polarización de carga, es decir, cargas iguales y opuestas en los electrodos. Las figuras 1a y 1b muestran una Taser común. Las cargas en los electrodos cambian de signo, pero en cualquier instante, el campo está cercano al de un dipolo (figura 1c). Las Taser se utilizan para someter a los delincuentes, teóricamente sin provocar daños permanentes. Un oficial de la policía, al asir la empuñadura, aplica los electrodos al cuerpo, por ejemplo, al muslo. El campo eléctrico interrumpe las señales eléctricas en los nervios que controlan el gran músculo que forma el muslo, paralizándolo, lo que hace más fácil someter al delincuente.

El término *pez eléctrico* evoca una imagen de una anguila eléctrica (que en realidad es un pez con forma de anguila). Sin embargo, hay otros peces que también son “eléctricos”. La anguila eléctrica y algunos otros, como el bagre eléctrico, son *peces fuertemente eléctricos*. Son capaces de generar grandes campos eléctricos para inmovilizar a sus presas, pero también utilizan estos campos para funciones de localización y comunicación. Los *peces débilmente eléctricos*, como el nariz de elefante (figura 2a), utilizan sus campos (figura 2b) sólo para localización y comunicación. Los peces que producen activamente campos eléctricos se llaman *peces electrogénicos*.

En un pez electrogénico, la separación de carga se realiza en el *órgano eléctrico* (señalado en el pez nariz de elefante de la figura 2b), que es un conjunto de *electroplacas* especializadas apiladas.

Cada electroplaca es una estructura con forma de disco, que normalmente está descargada. Cuando el cerebro envía una señal, los discos se polarizan a través de un proceso químico similar al de la acción de los nervios y crean el campo eléctrico del pez.

Los peces débilmente eléctricos son capaces de generar campos eléctricos como los que producen las baterías. Esto sirve sólo para funciones de *electrocomunicación* y *electrolocalización*. Los peces fuertemente eléctricos producen campos cientos de veces más fuertes y pueden matar a sus presas si las tocan al mismo tiempo con las áreas de cargas contrarias. La anguila eléctrica tiene miles de electroplacas apiladas en el órgano eléctrico, que normalmente se extiende desde la parte posterior de la cabeza hasta la cola y que ocupa más del 50% de la longitud de su cuerpo (figura 2c).

Como un ejemplo de electrolocalización, considere el cambio en el patrón del campo eléctrico normal del pez nariz de elefante (figura 2b) cuando se aproxima a un pequeño objeto conductor (figura 3). Observe que las líneas del campo cambian para curvarse hacia el objeto; como este último es conductor, las líneas del campo deben orientarse en ángulos rectos con respecto a su superficie. Esto da por resultado un campo más fuerte en el área de la piel del pez más cercana al objeto. Los sensores epiteliales detectan este incremento y envían una señal correspondiente al cerebro. Un objeto que no es conductor, como una roca, provocaría el efecto contrario. La electrolocalización y la electrocomunicación están determinadas por una interacción del campo eléctrico y los órganos sensoriales. Las propiedades básicas de los campos electrostáticos nos dan una idea general de cómo funcionan esos peces.

Ejemplo 1.9 ■ Placas paralelas: estimación de la carga en nubes de tormenta

El campo eléctrico E (es decir, la magnitud) que se requiere para ionizar aire es aproximadamente 1.0×10^6 N/C. Cuando el campo alcanza este valor, los átomos más débilmente ligados comienzan a abandonar sus moléculas (ionización de las moléculas), lo que conduce a una descarga de relámpago. Suponga que el valor existente para E entre la superficie inferior negativamente cargada de la nube y el suelo positivamente cargado es el 1.00% del valor de ionización, o 1.0×10^4 N/C. (Véase la figura 1a de la sección A fondo 1.1 en la p. 22 Considere las nubes como cuadrados de 10 millas por lado. Estime la magnitud de la carga negativa total sobre la superficie interior.

Razonamiento. El campo eléctrico está dado, por lo que la ecuación 1.5 servirá para estimar Q . Primero debemos convertir el área de la nube A (una de las “placas”) a metros cuadrados.

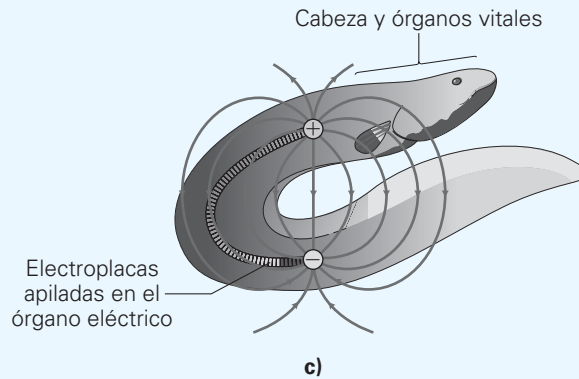
Solución.

Dado: $E = 1.0 \times 10^4$ N/C
 $d = 10$ mi $\approx 1.6 \times 10^4$ m

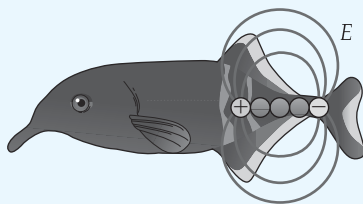
Encuentre: Q (la magnitud de la carga sobre la superficie inferior de las nubes)



a)



c)



b)

FIGURA 2 Peces eléctricos *a)* El pez nariz de elefante, que es débilmente eléctrico, utiliza su campo eléctrico para funciones de electrolocalización y comunicación. *b)* El campo eléctrico aproximado que genera el órgano eléctrico del pez nariz de elefante, localizado cerca de su cola, en un instante determinado. (En realidad, el campo eléctrico oscila.) *c)* El campo eléctrico aproximado que genera una anguila eléctrica en un instante determinado. El órgano eléctrico en la anguila es capaz de producir campos que le permiten paralizar y matar, pero también realizar funciones de localización y comunicación.

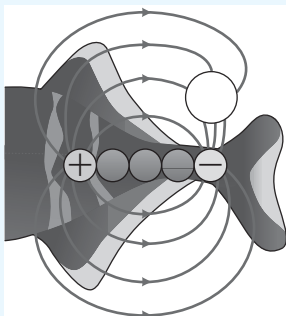


FIGURA 3 Electrolocalización El campo de un pez nariz de elefante con un objeto conductor cercano. Observe la disminución en el espacio entre las líneas del campo conforme entran en la capa superficial de la piel. Este incremento en la fuerza del campo es detectado por los órganos sensoriales en la piel, que envían una señal al cerebro del pez.

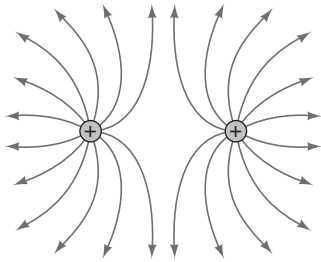
Usando la fórmula $A = d^2$ para obtener el área de un cuadrado, resolvemos la ecuación 1.5 para la magnitud de la carga (la superficie de la nube es negativa):

$$Q = \frac{EA}{4\pi k} = \frac{(1.0 \times 10^4 \text{ N/C})(1.6 \times 10^4 \text{ m})^2}{4\pi(9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)} = 23 \text{ C}$$

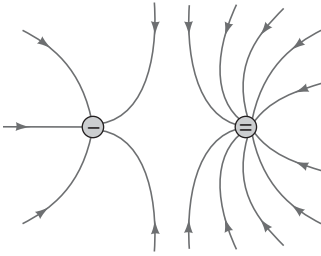
Esta expresión se justifica sólo si la distancia entre las nubes y el suelo es mucho menor que su tamaño. (¿Por qué?) Tal hipótesis es equivalente a suponer que las nubes de 10 millas de largo están a menos de varias millas de la superficie de la Tierra.

Esta cantidad de carga es enorme comparada con las cargas estáticas de fricción que provocamos al caminar sobre una alfombra. Sin embargo, como la carga de la nube está dispersa sobre una área muy grande, cualquier área pequeña de la nube no contiene mucha carga.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a)* ¿cuál es el sentido del campo eléctrico entre la nube y la Tierra? *b)* ¿Cuánta carga se requiere para ionizar el aire húmedo?



a) Cargas puntuales de mismo signo



b) Cargas puntuales de signos diferentes

▲ FIGURA 1.17 Campos eléctricos Campos eléctricos para: a) cargas puntuales de mismo signo, b) cargas puntuales de signos diferentes.

Los patrones completos de campo eléctrico para otras configuraciones comunes de carga se muestran en la figura 1.17. Hay que poner atención a la forma como se dibujan cualitativamente. Note que las líneas de campo eléctrico comienzan sobre cargas positivas y terminan sobre cargas negativas (o en el infinito cuando no hay carga negativa cercana). Asegúrese de escoger el número de líneas que emanan desde una carga o que terminan en una, en proporción a la magnitud de esa carga. (Véase la sección Aprender dibujando referente al trazado de líneas eléctricas de fuerza, en la p. 19.)

1.5 Conductores y campos eléctricos

OBJETIVOS: a) Describir el campo eléctrico cerca de la superficie y en el interior de un conductor, b) determinar dónde se acumula la carga en un conductor cargado y c) dibujar el patrón de líneas del campo eléctrico fuera de un conductor cargado.

Los campos eléctricos asociados con conductores cargados tienen varias propiedades interesantes. Por definición, en electrostática, las cargas están en reposo. Como los conductores poseen electrones que están libres para moverse, y no lo hacen, los electrones no deben experimentar fuerza eléctrica y tampoco campo eléctrico. De ahí se concluye que

El campo eléctrico es cero en todas partes dentro de un conductor cargado.

Las cargas en exceso sobre un conductor tienden a separarse una de otra tanto como es posible, ya que son sumamente móviles. Así,

Cualquier carga en exceso sobre un conductor aislado reside enteramente sobre la superficie del conductor.

Otra propiedad de los campos eléctricos estáticos y conductores es que no puede haber ningún componente tangencial del campo en la superficie del conductor. De otra forma, las cargas se moverían *a lo largo* de la superficie, al contrario de nuestra hipótesis de una situación estática. Así,

El campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado es perpendicular a la superficie.

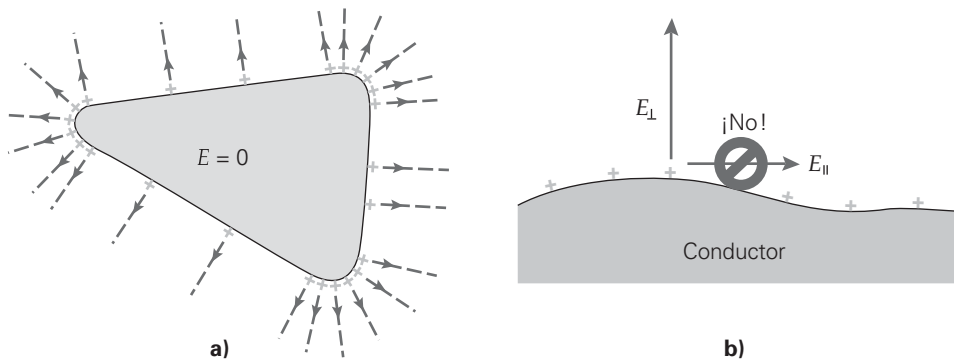
Por último, la carga en exceso sobre un conductor de forma irregular está más concentrada donde la superficie tiene mayor curvatura (esto es, en los puntos más prominentes). Como la carga es más densa ahí, el campo eléctrico será máximo justo en esos lugares. Es decir,

La carga en exceso tiende a acumularse en zonas agudas, o en lugares de curvatura máxima, sobre conductores cargados. Como resultado, el campo eléctrico es máximo en tales lugares.

Esos dos últimos resultados se resumen en la figura 1.18. *Recuerde que son verdaderos sólo para conductores en condiciones estáticas.* Los campos eléctricos pueden existir dentro de materiales no conductores y también dentro de conductores cuando las condiciones varían con el tiempo.

Para comprender *por qué* la mayoría de la carga se acumula en las regiones fuertemente curvadas, considere las fuerzas que actúan *entre* cargas sobre la superficie del conductor. (Véase la figura 1.19a.) En los lugares donde la superficie es bastante plana, esas fuerzas estarán dirigidas casi de forma paralela a la superficie. Las cargas se esparcen hasta que se cancelan las fuerzas paralelas de cargas vecinas en sentidos opuestos. En un extremo agudo, las fuerzas entre cargas estarán dirigidas casi perpendicularmente a la superficie y, por consiguiente, habrá poca tendencia de las cargas a moverse de forma paralela a ésta. Así, es de esperarse que las regiones más curvadas de la superficie acumulen la mayor concentración de carga.

Una situación interesante ocurre cuando hay una gran concentración de carga sobre un conductor que termina en punta (figura 1.19b). La intensidad de campo eléctrico en la región situada arriba del punto será suficientemente alta para iniciar la ionización de las moléculas de aire (y jalar o empujar electrones de las moléculas). Los electrones liberados son acelerados aún más por el campo eléctrico y provocan ionizaciones secundarias al golpear otras moléculas. Esto da por resultado una “avalancha” de electrones, visible como una descarga de chispas. Más carga puede colocarse sobre



▲ **FIGURA 1.18 Campos eléctricos y conductores** *a)* En condiciones estáticas, el campo eléctrico es cero dentro de un conductor. Cualquier carga en exceso reside sobre la superficie del conductor. Para un conductor de forma irregular, la carga en exceso se acumula en las regiones de máxima curvatura (las puntas), como se muestra. El campo eléctrico cerca de la superficie es perpendicular a esa superficie y más intenso donde la carga es más densa. *b)* En condiciones estáticas, el campo eléctrico *no* debe tener un componente tangencial a la superficie del conductor.

un conductor suavemente curvado, como en una esfera, antes de que ocurra una descarga de chispas. La concentración de carga en la punta aguda de un conductor es una razón para la efectividad de los pararrayos. (Véase la sección A fondo 1.1 referente a relámpagos y pararrayos en la p. 21.)

Para conocer algunas aplicaciones de los campos eléctricos en los seres vivos y en las instituciones de seguridad pública, consulte la sección A fondo 1.2 sobre armas paralizantes y peces eléctricos en la p. 22.

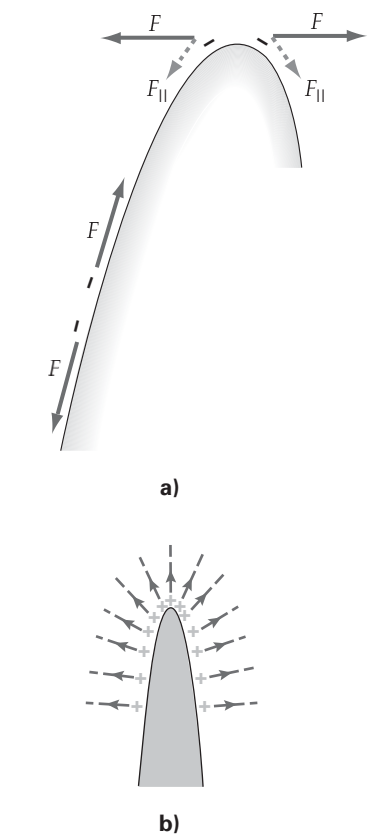
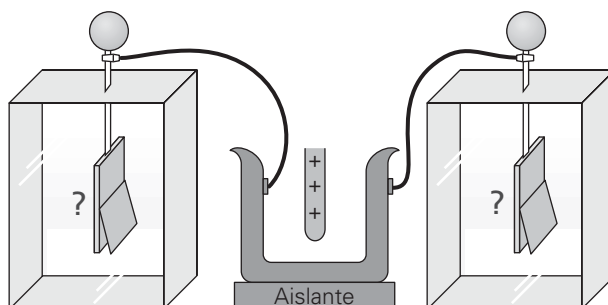
Como una ilustración de un experimento temprano que se realizó sobre conductores con exceso de carga, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo conceptual 1.10 ■ El experimento clásico de la cubeta de hielo

Una varilla positivamente cargada se coloca dentro de un recipiente metálico aislado que tiene electroscopios descargados unidos conductivamente a sus superficies interior y exterior (▼ figura 1.20). ¿Qué sucederá a las hojas de los electroscopios? (Justifique su respuesta.) *a)* Ninguna hoja de los electroscopios mostrará una desviación. *b)* Sólo la hoja del electroscopio conectado al exterior mostrará una desviación. *c)* Sólo la hoja del electroscopio conectado al interior mostrará una desviación. *d)* Las hojas de ambos electroscopios mostrarán desviaciones.

Razonamiento y respuesta. La barra con carga positiva atraerá cargas negativas, provocando que el interior del contenedor metálico quede cargado negativamente. El electroscopio exterior adquirirá así una carga positiva. Por consiguiente, ambos electroscopios estarán cargados (aunque con signos contrarios) y mostrarán desviaciones, por lo que la respuesta correcta es la *d*. El físico inglés Michael Faraday realizó un experimento similar en el siglo XIX usando cubetas de hielo, por lo que a menudo se conoce como el *experimento de la cubeta de hielo de Faraday*.

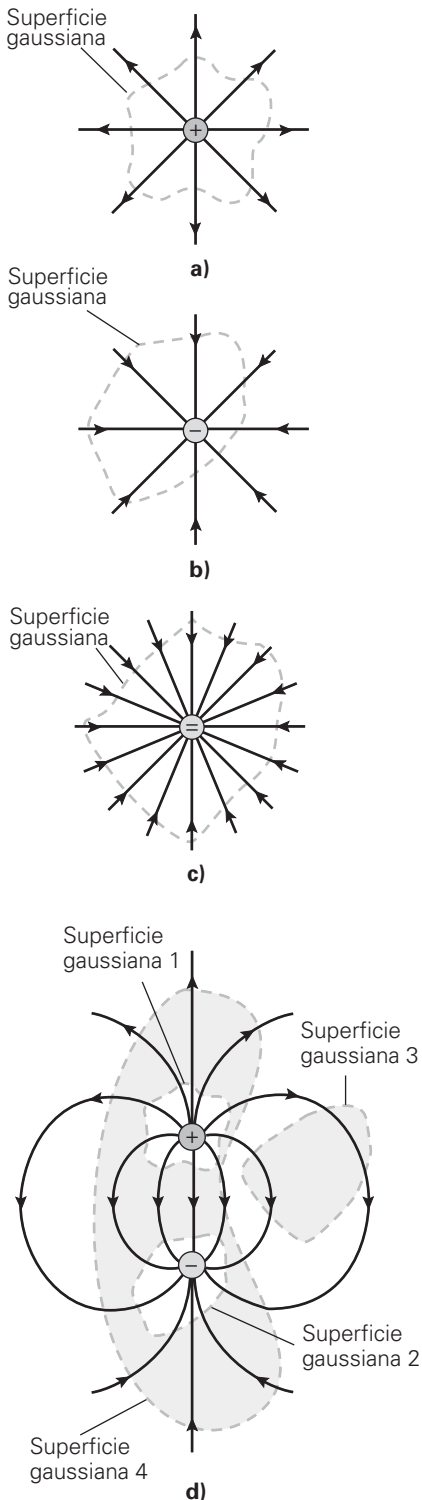
Ejercicio de refuerzo. Suponga que la barra positivamente cargada *toca* el contenedor de metal. ¿Cuál sería el efecto sobre los electroscopios?



▲ **FIGURA 1.19 Concentración de la carga sobre una superficie curva** *a)* Sobre una superficie plana, las fuerzas repulsivas entre cargas en exceso son paralelas a la superficie y tienden a empujar las cargas separándolas. En contraste, sobre una superficie curva, esas fuerzas están dirigidas formando un ángulo con la superficie. Sus componentes paralelos a la superficie son más pequeños, permitiendo que la carga se concentre en esas áreas. *b)* Llevado el caso al extremo, una aguja metálica puntiaguda tiene una densa concentración de carga en la punta. Esto produce un gran campo eléctrico en la región arriba de la punta, que es el principio del pararrayos.

◀ **FIGURA 1.20 Experimento de la cubeta de hielo** Véase el ejemplo conceptual 1.10.

*1.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo



▲ **FIGURA 1.21** Varias superficies gaussianas y líneas de fuerza **a)** Rodeando una sola carga puntual positiva, **b)** rodeando una sola carga puntual negativa y **c)** rodeando una carga puntual negativa mayor. **d)** Cuatro superficies diferentes que rodean varias partes de un dipolo eléctrico.

OBJETIVOS: a) Establecer la base física de la ley de Gauss y b) usar la ley para hacer predicciones cualitativas.

El matemático alemán Karl Friedrich Gauss (1777-1855) descubrió una de las leyes fundamentales que rigen el comportamiento de los campos eléctricos. Utilizarla para hacer cálculos cuantitativos implica técnicas que están más allá de los objetivos de este libro. Sin embargo, una mirada conceptual a esta ley nos enseñará algunas propiedades físicas interesantes.

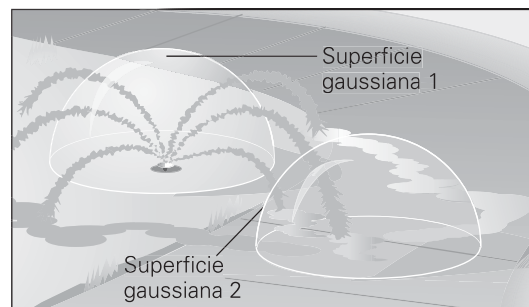
Considere la carga eléctrica positiva en la ◀figura 1.21a. Ahora visualice una *superficie cerrada imaginaria* que rodea a la carga. Tal superficie se llama **superficie gaussiana**. Ahora, designemos las líneas de campo eléctrico que pasan a través de la superficie y que apuntan hacia fuera como positivas y las que apuntan hacia dentro como negativas. Si contamos las líneas de ambos tipos (esto es, restamos el número de líneas negativas del número de positivas), encontramos que el total es positivo porque, en este caso, *sólo* hay líneas positivas. Este resultado refleja el hecho de que hay un número neto de líneas de campo eléctrico que apuntan hacia fuera a través de la superficie. De manera similar, para una carga negativa (figura 1.21b), la suma daría un total negativo, indicando un número neto de líneas que apuntan hacia dentro a través de la superficie. Note que esos resultados serían ciertos para *cualquier* superficie cerrada que rodeara la carga, sin importar su forma o tamaño. Si duplicamos la magnitud de la carga negativa (figura 1.21c), nuestra suma de líneas de campo negativas se duplicaría también. (¿Por qué?)

La figura 1.21d muestra un dipolo con cuatro diferentes superficies gaussianas imaginarias. La superficie 1 encierra una carga positiva neta y, por lo tanto, tiene una suma de líneas de campo positiva. De manera similar, la superficie 2 tiene una suma de líneas de campo negativa. Los casos más interesantes son las superficies 3 y 4. Observe que ambas incluyen una carga neta cero: la superficie 3 porque no incluye cargas y la superficie 4 porque incluye cargas iguales y opuestas. Advierta que las superficies 3 y 4 tienen una suma de líneas de campo neta de cero, que no se correlaciona con ninguna carga neta encerrada.

Esas situaciones se generalizan (conceptualmente) para obtener el principio físico subyacente de la **ley de Gauss**:*

El número neto de líneas de campo eléctrico que pasan por una superficie cerrada imaginaria es proporcional a la cantidad de carga neta encerrada dentro de esa superficie.

Una analogía familiar ilustrada en la ▼figura 1.22 le ayudará a comprender este principio. Si rodea un rociador de césped con una superficie imaginaria (superficie 1), encontrará que hay un flujo neto de agua que sale a través de esa superficie, porque dentro hay una "fuente" de agua (sin considerar el agua que conduce la tubería hacia el rociador). De manera análoga, un campo eléctrico neto que apunta hacia fuera indica la presencia de una carga neta positiva dentro de la superficie, ya que cargas positivas son "fuentes" del campo eléctrico. Asimismo, se formaría un charco dentro de nuestra superficie imaginaria 2 porque habría un flujo neto de agua hacia dentro a través de la superficie. El siguiente ejemplo ilustra la fuerza de la ley de Gauss en su forma cualitativa.



◀ **FIGURA 1.22** Analogía hidráulica de la ley de Gauss

Un flujo neto de agua hacia fuera indica que hay una fuente de agua dentro de la superficie cerrada 1. Un flujo neto de agua hacia dentro indica que hay un canal de agua dentro de la superficie cerrada 2.

*En sentido estricto, ésta es la ley de Gauss para campos eléctricos. También existe una versión de la ley de Gauss para campos magnéticos, que no se estudiará aquí.

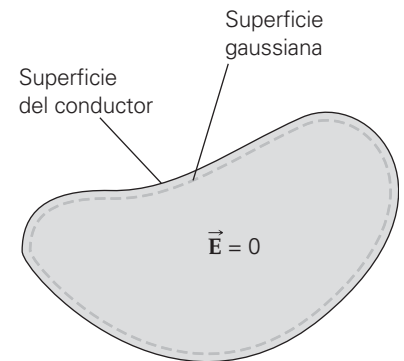
Ejemplo conceptual 1.11 ■ Una vez más, conductores cargados: ley de Gauss

Una carga neta Q se coloca en un conductor de forma arbitraria (►figura 1.23). Utilice la versión cualitativa de la ley de Gauss para demostrar que toda la carga debe residir en la superficie del conductor en condiciones electrostáticas.

Razonamiento y respuesta. Como la situación es de equilibrio estático, no puede haber campo eléctrico dentro del volumen del conductor; de otra forma, los electrones casi libres se moverían alrededor. Consideremos la superficie gaussiana que sigue la forma del conductor, pero que *apenas* está dentro de la superficie real. Puesto que no hay líneas de campo eléctrico dentro del conductor, tampoco hay líneas de campo eléctrico que pasen a través de nuestra superficie imaginaria. Pero por la ley de Gauss, el número neto de líneas de campo es proporcional a la cantidad de carga en el interior de la superficie. Por consiguiente, no debe haber carga neta dentro de la superficie.

Como nuestra superficie puede estar tan cerca como queramos de la superficie del conductor, se deduce que la carga en exceso, si no está dentro del volumen del conductor, debe estar en la superficie.

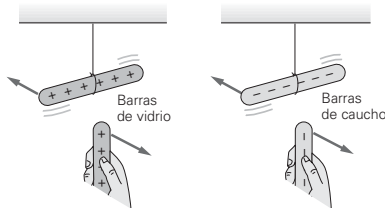
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la carga neta en el conductor es negativa, ¿cuál es el signo del número neto de líneas a través de la superficie gaussiana que encierra completamente el conductor? Explique su razonamiento.



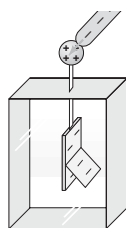
▲ **FIGURA 1.23** Ley de Gauss: carga en exceso en un conductor Véase el Ejemplo conceptual 1.12.

Repaso del capítulo

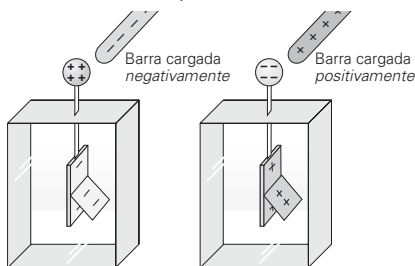
- La **ley de cargas** o **ley de carga-fuerza**, establece que las cargas iguales se repelen, y que las cargas contrarias se atraen.



- El principio de la **conservación de la carga** significa que la carga neta de un sistema aislado permanece constante.
- Los **conductores** son materiales que conducen carga eléctrica fácilmente porque sus átomos tienen uno o más electrones débilmente ligados.
- Los **aislantes** son materiales que no ganan, pierden o conducen fácilmente carga eléctrica.
- La **carga electrostática** implica procesos que permiten a un objeto ganar una carga neta. Entre esos procesos están la carga por fricción, por contacto (conducción) e inducción.



- La **polarización eléctrica** de un objeto implica crear cantidades separadas e iguales de carga positiva y negativa en puntos diferentes sobre ese objeto.



- La **ley de Coulomb** expresa la magnitud de la fuerza entre dos cargas puntuales:

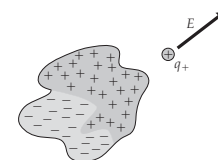
$$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (\text{dos cargas puntuales}) \quad (1.2)$$

donde $k \approx 9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$.

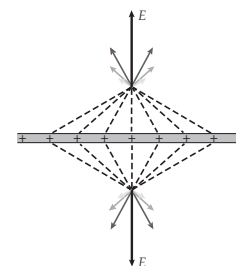
$$F_{12} = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad \leftarrow q_1 \quad \quad q_2 \quad \rightarrow F_{21} = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

- El **campo eléctrico** es un campo vectorial que describe cómo las cargas modifican el espacio alrededor de ellas. Se define como la fuerza eléctrica por carga positiva unitaria, o

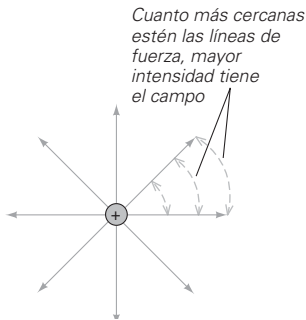
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{en } q_+}}{q_+} \quad (1.3)$$



- De acuerdo con el **principio de superposición para campos eléctricos**, el campo eléctrico (neto) en cualquier punto que se debe a una configuración de cargas es la suma vectorial de los campos eléctricos individuales de las cargas individuales que forman esa configuración.



- Las **líneas de campo eléctrico** son una visualización gráfica del campo eléctrico. La separación entre líneas está inversamente relacionada con la intensidad del campo, y las tangentes a las líneas dan la dirección del campo eléctrico.



- En condiciones estáticas, los **campos eléctricos asociados con conductores** tienen las siguientes propiedades:

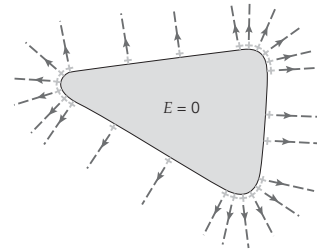
El campo eléctrico es cero dentro de un conductor cargado.

Cualquier carga en exceso en un conductor cargado reside enteramente sobre su superficie.

El campo eléctrico cerca de la superficie de un conductor cargado es perpendicular a ésta.

La carga en exceso en la superficie de un conductor es más densa en los lugares de máxima curvatura de la superficie.

El campo eléctrico cerca de la superficie de un conductor cargado es mayor en los lugares de máxima curvatura de la superficie.



Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con **números subrayados**, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

1.1 Carga eléctrica

- OM** Una combinación de dos electrones y tres protones tendría una carga neta de a) $+1$, b) -1 , c) $+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ o d) $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- OM** Un electrón está justo encima de un protón fijo. La dirección de la fuerza en el protón eléctrico es a) hacia arriba, b) hacia abajo, c) cero.
- OM** En el ejercicio 2, ¿cuál siente la mayor fuerza? a) El electrón, b) el protón o c) ambos sienten la misma fuerza.
- PC** ¿Cómo sabemos que hay dos tipos de carga eléctrica? b) ¿Cuál sería el efecto de designar la carga del electrón como positiva y la carga del protón como negativa?
- PC** A un objeto eléctricamente neutro se le puede dar una carga neta de varias maneras. ¿Viola esto la conservación de la carga? Explique su respuesta.
- PC** Si un objeto sólido neutro resulta positivamente cargado, ¿su masa aumenta o disminuye? ¿Qué sucede si resulta negativamente cargado?
- PC** ¿Cómo se determina el tipo de carga sobre un objeto utilizando un electroscopio que tiene una carga neta de un signo conocido? Explique su respuesta.
- PC** Si dos objetos se repelen eléctricamente entre sí, ¿están ambos necesariamente cargados? ¿Y si se atraen?
- ¿Cuál sería la carga eléctrica neta de un objeto con 1.0 millón de electrones en exceso?
- Al caminar sobre una alfombra, usted adquiere una carga negativa neta de $50 \mu\text{C}$. ¿Cuántos electrones en exceso tiene usted?
- Una partícula alfa es el núcleo de un átomo de helio sin electrones. ¿Cuál sería la carga en dos partículas alfa?
- EI** ●● Una barra de vidrio que se frota con seda adquiere una carga de $+8.0 \times 10^{-10} \text{ C}$. a) ¿La carga en la seda es 1) positiva, 2) cero o 3) negativa? ¿Por qué? b) ¿Cuál es la carga en la seda, y cuántos electrones se transfirieron a la seda? c) ¿Cuánta masa perdió la barra de vidrio?
- EI** ●● Una barra de caucho que se frota con piel adquiere una carga de $-4.8 \times 10^{-9} \text{ C}$. a) ¿La carga en la piel es 1) positiva, 2) cero o 3) negativa? ¿Por qué? b) ¿Cuál es la carga en la piel, y cuánta masa se transfiere a la barra? c) ¿Cuánta masa ganó la barra de caucho?

1.2 Carga electrostática

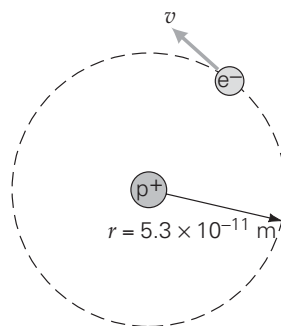
- OM** Una barra de caucho se frota con piel. Entonces, la piel se acerca rápidamente al bulbo de un electroscopio descargado. El signo de la carga sobre las hojas del electroscopio es a) positivo, b) negativo, c) cero.

*Tome k exactamente como $9.00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ y e como $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ para fines de cifras significativas.

15. **OM** Una corriente de agua se desvía hacia un objeto cargado eléctricamente que se acerca a ella. El signo de la carga del objeto *a*) es positivo, *b*) es negativo, *c*) es cero, *d*) no se puede determinar a partir de los datos.
16. **OM** Un globo se carga por frotamiento y luego se adhiere a una pared. El signo de la carga en el globo *a*) es positivo, *b*) es negativo, *c*) es cero, *d*) no se puede determinar a partir de los datos.
17. **PC** Los camiones de combustible tienen a menudo cadenas metálicas que cuelgan de sus chasis al suelo. ¿Por qué ésta es una medida importante?
18. **PC** ¿Hay una ganancia o pérdida de electrones cuando un objeto se polariza eléctricamente? Explique su respuesta.
19. **PC** Explique con cuidado los pasos para fabricar un electroscopio que esté cargado positivamente mediante inducción. Una vez terminado, ¿cómo podría verificar que el electroscopio está cargado positivamente (y, por lo tanto, que no está cargado negativamente)?
20. **PC** Dos esferas metálicas montadas sobre soportes aislados están en contacto. Acercar un objeto con carga negativa a la esfera de la derecha le permitiría cargar temporalmente ambas esferas por inducción. Explique claramente cómo funcionaría esto y cuál sería el signo de la carga en cada esfera.

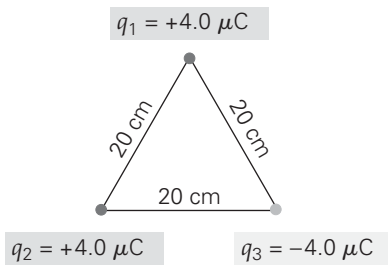
1.3 Fuerza eléctrica

21. **OM** ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales conforme aumenta la distancia entre ellas? La fuerza *a*) disminuye, *b*) aumenta, *c*) permanece constante.
22. **OM** Comparada con la fuerza eléctrica, la fuerza gravitacional entre dos protones es *a*) aproximadamente la misma, *b*) algo mayor, *c*) mucho mayor o *d*) mucho más pequeña.
23. **PC** La Tierra nos atrae con su fuerza gravitacional, pero la fuerza eléctrica es mucho mayor que aquella. ¿Por qué no experimentamos una fuerza eléctrica de la Tierra?
24. **PC** Dos electrones cercanos se alejarán si se liberan. ¿Cómo podría evitarse esto colocando una sola carga en su ambiente? Explique claramente cuál tendría que ser el signo de la carga y su ubicación.
25. **PC** La ley de Coulomb es un ejemplo de una ley de cuadrado inverso. Utilice esta idea del cuadrado inverso para determinar la razón de la fuerza eléctrica (la final dividida entre la inicial) entre dos cargas cuando la distancia entre ellas se reduce a un tercio de su valor inicial.
26. **EI** ● Sobre un electrón que está a cierta distancia de un protón actúa una fuerza eléctrica. *a*) Si el electrón se alejara al doble de esa distancia del protón, ¿la fuerza eléctrica sería 1) 2, 2) $\frac{1}{2}$, 3) 4 o 4) $\frac{1}{4}$ veces la fuerza original? ¿Por qué? *b*) Si la fuerza eléctrica original es F , y el electrón se moviese a un tercio de la distancia original hacia el protón, ¿cuál sería la nueva fuerza eléctrica?
27. ● Dos cargas puntuales idénticas están una de otra a una distancia fija. ¿Por qué factor se vería afectada la magnitud de la fuerza eléctrica entre ellas si *a*) una de las cargas se duplica y la otra se reduce a la mitad, *b*) ambas cargas se reducen a la mitad y *c*) una carga se reduce a la mitad y la otra no cambia?
28. ● En una cierta molécula orgánica, los núcleos de dos átomos de carbono están separados una distancia de 0.25 nm. ¿Cuál es la magnitud de la repulsión eléctrica entre ellos?
29. ● Un electrón y un protón están separados 2.0 nm. *a*) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre el electrón? *b*) ¿Cuál es la fuerza neta sobre el sistema?
30. **EI** ● Dos cargas originalmente separadas una cierta distancia se separan aún más, hasta que la fuerza entre ellas disminuye por un factor de 10. *a*) ¿La nueva distancia es 1) menor que 10, 2) igual a 10 o 3) mayor que 10 veces la distancia original? ¿Por qué? *b*) Si la distancia original era de 30 cm, ¿qué distancia separa a las cargas?
31. ● Dos cargas se unen hasta que están a una distancia de 100 cm, de manera que la fuerza eléctrica entre ellas aumenta exactamente por un factor de 5. ¿Cuál era su separación inicial?
32. ● La distancia entre iones vecinos de sodio y cloro en cristales de sal de mesa (NaCl), cargados uno por uno, es de 2.82×10^{-10} m. ¿Cuál es la fuerza eléctrica de atracción entre los iones?
33. ●● Dos cargas puntuales de $-2.0 \mu\text{C}$ están fijas en los extremos opuestos de una vara graduada de un metro. ¿En qué lugar del metro de madera podría estar en equilibrio electrostático *a*) un electrón libre y *b*) un protón libre?
34. ●● Dos cargas puntuales de $-1.0 \mu\text{C}$ y $+1.0 \mu\text{C}$ están fijas en los extremos opuestos de una vara graduada de un metro. ¿Dónde podría estar en equilibrio electrostático *a*) un electrón libre y *b*) un protón libre?
35. ●● Dos cargas, q_1 y q_2 , están localizadas en el origen y en el punto (0.50 m, 0), respectivamente. ¿En qué lugar del eje x debe colocarse una tercera carga, q_3 , de signo arbitrario para estar en equilibrio electrostático si *a*) q_1 y q_2 son cargas de igual magnitud y signo, *b*) q_1 y q_2 son cargas contrarias pero de igual magnitud y *c*) $q_1 = +3.0 \mu\text{C}$ y $q_2 = -7.0 \mu\text{C}$?
36. ●● Calcule la fuerza gravitacional y eléctrica entre el electrón y el protón en el átomo de hidrógeno (▼ figura 1.24), suponiendo que están a una distancia de 5.3×10^{-11} m. Luego calcule la razón entre la magnitudes de la fuerza eléctrica y la de la fuerza gravitacional.



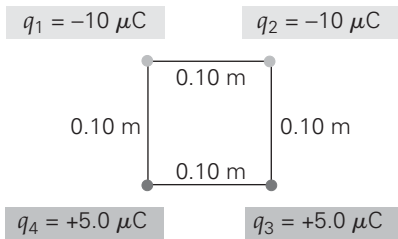
◀ FIGURA 1.24 Átomo de hidrógeno Véanse los ejercicios 36 y 37.

37. ●●● En promedio, el electrón y el protón en un átomo de hidrógeno están separados por una distancia de 5.3×10^{-11} m (figura 1.24). Suponiendo que la órbita del electrón es circular, *a*) ¿cuál es la fuerza eléctrica sobre el electrón? *b*) ¿Cuál es la rapidez orbital del electrón? *c*) ¿Cuál es la magnitud de la aceleración centrípeta del electrón en unidades de g ?
38. ●●● Tres cargas están situadas en las esquinas de un triángulo equilátero, como se ilustra en la figura 1.25. ¿Cuáles son la magnitud y el sentido de la fuerza sobre q_1 ?



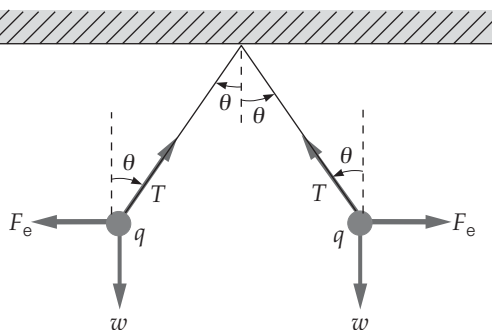
▲ FIGURA 1.25 Triángulo de cargas Véase los ejercicios 38, 59 y 60.

39. ●●● Cuatro cargas están situadas en las esquinas de un cuadrado, como se ilustra en la figura 1.26. ¿Cuáles son la magnitud y el sentido de la fuerza *a*) sobre la carga q_2 y *b*) sobre la carga q_4 ?



▲ FIGURA 1.26 Rectángulo de cargas Véanse los ejercicios 39, 61 y 65.

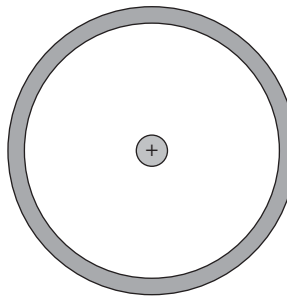
40. ●●● Dos bolitas de 0.10 g de médula de saúco están suspendidas del mismo punto por cuerdas de 30 cm de largo. (La médula de saúco es un material ligero aislante usado en el pasado para hacer cascos para climas tropicales.) Cuando las bolitas tienen cargas iguales, llegan al reposo cuando están a 18 cm de distancia, como se muestra en la figura 1.27. ¿Cuál es la magnitud de la carga en cada bolita? (Ignore la masa de las cuerdas.)



▲ FIGURA 1.27 Bolitas repelentes Véase el ejercicio 40.

1.4 Campo eléctrico

41. OM ¿Qué sucede con la magnitud del campo eléctrico provocado por una carga puntual cuando la distancia a esa carga se triplica? *a*) Permanece constante, *b*) se reduce a un tercio del valor original de la carga, *c*) se reduce a un noveno del valor original de la carga o *d*) se reduce a $1/27$ del valor original de la carga.
42. OM Las unidades del campo eléctrico en el SI son *a*) C, *b*) N/C, *c*) N o *d*) J.
43. OM En un punto en el espacio, una fuerza eléctrica actúa verticalmente hacia abajo sobre un electrón. El sentido del campo eléctrico en ese punto *a*) es hacia abajo, *b*) es hacia arriba, *c*) es cero o *d*) no se puede determinar a partir de los datos.
44. PC ¿Cómo se determina la magnitud relativa del campo eléctrico en diferentes regiones a partir de un diagrama de campo vectorial?
45. PC ¿Cómo se determinan las magnitudes relativas del campo en diferentes regiones a partir de un diagrama de líneas de campo eléctrico?
46. PC Explique claramente por qué las líneas de campo eléctrico nunca se intersecan.
47. PC Una carga positiva está dentro de una esfera metálica aislada, como se muestra en la figura 1.28. Describa el campo eléctrico en las tres regiones: entre la carga y la superficie interior de la esfera, dentro de la esfera y fuera de la superficie de la esfera. ¿Cuál es el signo de la carga en las dos superficies de la esfera? ¿Cómo cambiarían sus respuestas si la carga fuera negativa?



Conductor metálico

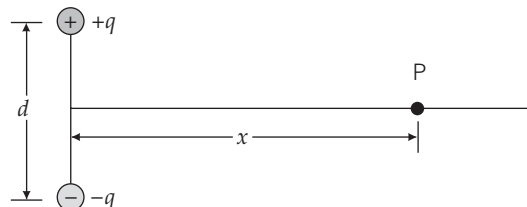
◀ FIGURA 1.28 Un punto de carga dentro de una gruesa esfera metálica Véase el ejercicio 47.

48. PC En cierto lugar, el campo eléctrico provocado por el exceso de carga sobre la superficie de la Tierra apunta hacia abajo. ¿Cuál es el signo de la carga en la superficie terrestre en ese lugar? ¿Por qué?
49. PC *a*) ¿El campo eléctrico generado por dos cargas negativas idénticas podría ser cero en algún lugar (o lugares) cercano(s)? Explique su respuesta. Si ésta es afirmativa, describa la situación y dibújela. *b*) ¿Cómo cambiaría su respuesta si las cargas fueran iguales pero con signos contrarios? Explique su respuesta.
50. EI *a*) Si la distancia desde una carga se duplica, ¿la magnitud del campo eléctrico 1) aumenta, 2) disminuye o 3) es igual en comparación con el valor inicial? *b*) Si el campo eléctrico original es de 1.0×10^{-4} N/C, ¿cuál es la magnitud del nuevo campo eléctrico al doble de la distancia de la carga?

51. ● Sobre un electrón aislado actúa una fuerza eléctrica de 3.2×10^{-14} N. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en la posición del electrón?
52. ● ¿Cuál es la magnitud y sentido del campo eléctrico en un punto situado a 0.75 cm de una carga puntual de $+2.0$ pC?
53. ● ¿A qué distancia de un protón, la magnitud del campo eléctrico es 1.0×10^5 N/C?
54. El ●● Dos cargas fijas, de -4.0 y -5.0 μC , están separadas una cierta distancia. a) ¿El campo eléctrico neto a la mitad de la distancia entre las dos cargas 1) se dirige hacia la carga de -4.0 μC , 2) es cero o 3) se dirige hacia la carga de -5.0 μC ? ¿Por qué? b) Si las cargas están separadas 20 cm, calcule la magnitud del campo eléctrico neto a media distancia entre las cargas.
55. ●● ¿Cuál sería la magnitud y el sentido de un campo eléctrico vertical que soportara justamente el peso de un protón sobre la superficie de la Tierra? ¿Y el peso de un electrón?
56. El ●● Dos cargas, de -3.0 y -4.0 μC , están localizadas en los puntos $(-0.50$ m, $0)$ y $(0.50$ m, $0)$, respectivamente. Hay un punto sobre el eje x entre las dos cargas donde el campo eléctrico es cero. a) ¿Ese punto está 1) a la izquierda del origen, 2) en el origen o 3) a la derecha del origen? b) Encuentre la posición del punto donde el campo eléctrico es cero.
57. ●● Tres cargas, de $+2.5$ μC , -4.8 μC y -6.3 μC , están localizadas en $(-0.20$ m, 0.15 m), $(0.50$ m, -0.35 m) y $(-0.42$ m, -0.32 m), respectivamente. ¿Cuál es el campo eléctrico en el origen?
58. ●● Dos cargas, de $+4.0$ y $+9.0$ μC , están a 30 cm de distancia una de otra. ¿En qué lugar de la línea que une a las cargas el campo eléctrico es cero?
59. ●●● ¿Cuál es el campo eléctrico en el centro del triángulo en la figura 1.25?
60. ●●● Calcule el campo eléctrico en un punto a la mitad entre las cargas q_1 y q_2 en la figura 1.25.
61. ●●● ¿Cuál es el campo eléctrico en el centro del cuadrado en la figura 1.26?
62. ●●● Una partícula con masa de 2.0×10^{-5} kg y una carga de $+2.0$ μC se libera en un campo eléctrico horizontal uniforme (de placas paralelas) de 12 N/C. a) ¿Qué tan lejos viaja horizontalmente la partícula en 0.50 s? b) ¿Cuál es el componente horizontal de su velocidad en ese punto? c) Si las placas miden 5.0 cm por lado, ¿cuánta carga tiene cada una?
63. ●●● Dos placas paralelas muy grandes tienen cargas uniformes y contrarias. Si el campo entre las placas es de 1.7×10^6 N/C, ¿qué tan densa es la carga sobre cada placa (en $\mu\text{C}/\text{m}^2$)?
64. ●●● Dos placas cuadradas conductoras con cargas contrarias miden 20 cm por lado. Están colocadas paralelamente y cerca una con respecto a la otra. Tienen cargas de $+4.0$ y -4.0 nC, respectivamente. a) ¿Cuál es el cam-

po eléctrico entre las placas? b) ¿Qué fuerza se ejerce sobre un electrón entre las placas?

65. ●●● Calcule el campo eléctrico en un punto a 4.0 cm de q_2 a lo largo de una línea que se dirige hacia q_3 en la figura 1.26.
66. ●●● Dos cargas iguales y contrarias forman un dipolo, como se ilustra en la figura 1.29. a) Sume los campos eléctricos generados por cada una en el punto P, para determinar gráficamente la dirección del campo eléctrico en ese lugar. b) Obtenga una expresión simbólica para la magnitud del campo eléctrico en el punto P, en términos de k , q , d y x ? c) Si el punto P está muy alejado, utilice el resultado exacto para demostrar que $E \approx kqd/x^3$. d) ¿Por qué se trata de un *cuvo* inverso en lugar de un *cuadrado* inverso? Explique su respuesta.



▲ FIGURA 1.29 Campo eléctrico dipolar

Véase el ejercicio 66.

1.5 Conductores y campos eléctricos

67. OM En equilibrio electrostático, ¿el campo eléctrico justo abajo de la superficie de un conductor cargado a) tiene el mismo valor que el campo justo arriba de la superficie, b) es cero, c) depende de la cantidad de carga en el conductor o d) está dado por kq/R^2 ?
68. OM Una plancha metálica delgada descargada se coloca en un campo eléctrico externo que apunta horizontalmente hacia la izquierda. ¿Cuál es el campo eléctrico dentro de la plancha? a) Cero, b) tiene el mismo valor que el del campo externo original, aunque con sentido contrario, c) es menor que el valor del campo externo original, pero es diferente de cero o d) depende de la magnitud del campo externo.
69. OM La dirección del campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado en condiciones electrostáticas a) es paralelo a la superficie, b) es perpendicular a la superficie, c) está a 45° con respecto a la superficie o d) depende de la carga en el conductor.
70. PC ¿Es seguro permanecer en un automóvil durante una tormenta eléctrica (ver figura 1.30)? Explique su respuesta.



▲ FIGURA 1.30 ¿Está seguro dentro del automóvil?

Véase el ejercicio 70.

71. **PC** En condiciones electrostáticas, la carga en exceso en un conductor está distribuida de manera uniforme sobre su superficie. ¿Cuál es la forma de la superficie?
72. **PC** Los edificios altos tienen pararrayos para protegerlos del impacto de relámpagos. Explique por qué los pararrayos son puntiagudos y rebasan la altura de los edificios.
73. **EI** ● Una esfera sólida conductora está rodeada por una cubierta esférica gruesa conductora. Suponga que una carga total $+Q$ se coloca inicialmente en el centro de la esfera interior y luego se le libera. *a)* Después de que se alcanza el equilibrio, la superficie interior de la cubierta tendrá carga 1) negativa, 2) cero o 3) positiva. *b)* En términos de Q , ¿cuánta carga hay en el interior de la esfera? *c)* ¿En la superficie de la esfera? *d)* ¿En la superficie interior de la cubierta? *e)* ¿En la superficie exterior de la cubierta?
74. ● En el ejercicio 73, ¿cuál es la dirección del campo *a)* en el interior de la esfera sólida, *b)* entre la esfera y la cubierta, *c)* dentro de la cubierta y *d)* fuera de la cubierta?
75. ●● En el ejercicio 73, escriba expresiones para la magnitud del campo eléctrico *a)* en el interior de la esfera sólida, *b)* entre la esfera y la cubierta, *c)* dentro de la cubierta y *d)* fuera de la cubierta. Su respuesta debe estar en términos de Q , r (la distancia desde el centro de la esfera) y k .
76. ●● Una pieza de metal plana triangular con esquinas redondeadas tiene una carga positiva neta sobre ella. Dibuje la distribución de carga sobre la superficie y las líneas de campo eléctrico cerca de la superficie del metal (incluyendo sus direcciones).
77. ●●● Considere que una aguja metálica es aproximadamente un cilindro largo con un extremo muy puntiagudo pero ligeramente redondeado. Dibuje la distribución de carga y las líneas exteriores de campo eléctrico si la aguja tiene un exceso de electrones sobre ella.

*1.6 Ley de Gauss para campos eléctricos: un enfoque cualitativo

78. **OM** Una superficie gaussiana rodea un objeto que tiene una carga neta de $-5.0 \mu\text{C}$. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto? *a)* Más líneas de campo eléctrico apuntarán hacia fuera que hacia dentro. *b)* Más líneas de campo eléctrico apuntarán hacia dentro que hacia fuera. *c)* El número neto de líneas de campo a través de la superficie es cero. *d)* Sólo debe haber líneas de campo que apuntan hacia dentro a través de la superficie.
79. **OM** ¿Qué podría decir acerca del número neto de líneas de campo eléctrico que pasan a través de una superficie gaussiana localizada completamente dentro de la región comprendida entre un conjunto de placas paralelas con cargas contrarias? *a)* El número neto apunta hacia fuera. *b)* El número neto apunta hacia dentro. *c)* El número neto es cero. *d)* El número neto depende de la cantidad de carga en cada placa.
80. **OM** Dos superficies esféricas concéntricas encierran una partícula cargada. El radio de la esfera exterior es el doble del radio de la interior. ¿Cuál esfera tendrá más líneas

de campo eléctrico que pasan a través de su superficie?
a) La más grande. *b)* La más pequeña. *c)* Ambas esferas tendrían el mismo número de líneas de campo que pasan a través de ellas. *d)* La respuesta depende de la cantidad de carga de la partícula.

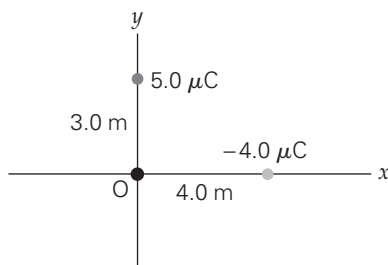
81. **PC** La misma superficie gaussiana se usa para rodear dos objetos cargados por separado. El número neto de líneas de campo que penetran la superficie es el mismo en ambos casos, pero las líneas tienen sentido contrario. ¿Qué podría decir acerca de las cargas netas sobre los dos objetos?
82. **PC** Si el número neto de líneas de campo eléctrico apunta hacia fuera desde una superficie gaussiana, ¿esto necesariamente significa que no hay cargas negativas en el interior? Explique con un ejemplo.
83. ● Suponga que una superficie gaussiana encierra tanto una carga puntual positiva (que tiene seis líneas de campo que salen de ella) como una carga puntual negativa (con el doble de magnitud de la carga positiva). ¿Cuál es el número neto de líneas de campo que pasan a través de la superficie gaussiana?
84. **EI** ●● Una superficie gaussiana tiene 16 líneas de campo que salen cuando rodea una carga puntual de $+10.0 \mu\text{C}$ y 75 líneas de campo que entran cuando rodea una carga puntual desconocida. *a)* La magnitud de la carga desconocida es 1) mayor que $10.0 \mu\text{C}$, 2) igual a $10.0 \mu\text{C}$ o 3) menor que $10.0 \mu\text{C}$. ¿Por qué? *b)* ¿Qué magnitud tiene la carga desconocida?
85. ●● Si 10 líneas de campo salen de una superficie gaussiana cuando ésta rodea por completo el extremo positivo de un dipolo eléctrico, ¿cuál sería el número de líneas si la superficie rodeara sólo el otro extremo?

Ejercicios adicionales

86. Una bolita de médula de saúco cargada negativamente (con masa de $6.00 \times 10^{-3} \text{ g}$ y carga de -1.50 nC) está suspendida verticalmente de una cuerda ligera y no conductora cuya longitud es de 15.5 cm. Este aparato se coloca entonces en un campo eléctrico horizontal y uniforme. Después de ser liberada, la bolita llega a una posición estable a un ángulo de 12.3° a la izquierda de la vertical. *a)* ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico externo? *b)* Determine la magnitud del campo eléctrico.
87. Una partícula con una carga positiva de 9.35 pC está suspendida en equilibrio en el campo eléctrico entre dos placas paralelas horizontales y con cargas contrarias. Cada una de las placas cuadradas tiene una carga de $5.50 \times 10^{-5} \text{ C}$; entre ellas hay una separación de 6.25 mm y sus lados tienen una longitud de 11.0 cm. *a)* ¿Cuál placa debe estar cargada positivamente? *b)* Determine la masa de la partícula.
88. **PC** Utilice los argumentos del principio de superposición y/o de simetría para determinar la dirección del campo eléctrico *a)* en el centro de un cable semicircular con carga positiva uniforme, *b)* en el plano de una placa

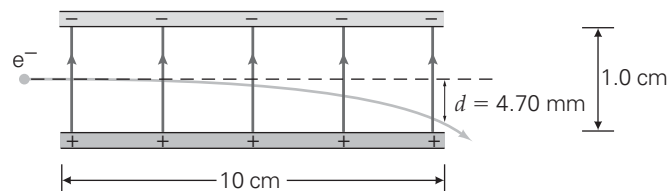
lisa con carga negativa, justo fuera de una de las orillas, y c) en el eje perpendicular bisector de un largo y delgado aislador con más carga negativa en un extremo que carga positiva en el otro.

89. Un electrón parte de una placa que integra un arreglo de placas paralelas cargadas y con una pequeña separación (vertical). La velocidad del electrón es de 1.63×10^4 m/s hacia la derecha. Su rapidez al alcanzar la otra placa, localizada a 2.10 cm, es de 4.15×10^4 m/s. a) ¿Qué tipo de carga hay en cada placa? b) ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico entre las placas? c) Si las placas son cuadradas y sus lados miden 25.4 cm de longitud, determine la carga en cada una.
90. Dos cargas fijas, de -3.0 y $-5.0 \mu\text{C}$, están separadas 0.40 m. a) ¿Dónde debería colocarse una tercera carga de $-1.0 \mu\text{C}$ para que el sistema de tres cargas esté en equilibrio electrostático. b) ¿Y si la tercera carga fuera de $+1.0 \mu\text{C}$?
91. Encuentre el campo eléctrico en el punto O para la configuración de cargas que se ilustra en la figura 1.31.



▲ FIGURA 1.31 Campo eléctrico Véase el ejercicio 91.

92. PC Un bloque uniforme de metal (menos grueso que la distancia de separación entre las placas) se inserta de forma paralela entre un par de placas paralelas con cargas contrarias. Haga un boceto del campo eléctrico resultante entre las placas incluyendo al bloque.
93. Un electrón en un monitor de computadora entra a medio camino entre dos placas paralelas con cargas opuestas, como se ilustra en la figura 1.32. La rapidez inicial del electrón es de 6.15×10^7 m/s y su desviación vertical (d) es de 4.70 mm. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las placas? b) Determine la magnitud de la densidad de la carga superficial en las placas en C/m^2 .



▲ FIGURA 1.32 Un electrón en un monitor de computadora Véase el ejercicio 93.

94. PC Para un dipolo eléctrico, el producto qd se llama *momento dipolar* y se denota con el símbolo p . El momento dipolar es en realidad un vector \vec{p} que apunta del extremo negativo al positivo. Suponiendo que un dipolo eléctrico está libre para moverse y girar, y que parte del reposo, a) haga un boceto para demostrar que si se coloca en un campo uniforme girará conforme trate de "alinearse" con la dirección del campo. b) ¿Qué cambia en el movimiento del dipolo si el campo no es uniforme?

POTENCIAL ELÉCTRICO, ENERGÍA Y CAPACITANCIA

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico | 35 |
| 2.2 | Superficies equipotenciales y el campo eléctrico | 41 |
| 2.3 | Capacitancia | 47 |
| 2.4 | Dieléctricos | 50 |
| 2.5 | Condensadores en serie y en paralelo | 55 |

HECHOS DE FÍSICA

- La unidad de capacitancia eléctrica, el farad, recibió ese nombre en honor del científico británico Michael Faraday (1791-1867). A los 21 años y con escasa educación formal, Faraday se convirtió en asistente de laboratorio en la Real Institución de Londres. Finalmente, ocupó el cargo de director del laboratorio. Faraday descubrió la inducción electromagnética, que es el principio detrás de las modernas plantas generadoras de electricidad.
- En electroquímica, una importante cantidad de carga, llamada faraday, equivale a 96 485.3415 coulombs. El nombre se eligió en honor de Michael Faraday por sus experimentos electroquímicos, los cuales demostraron que se requiere 1 faraday de carga para depositar 1 mol de plata en el cátodo cargado negativamente de su aparato.
- El conde Alessandro Volta nació en Como, Italia, en 1745. Como no habló sino hasta los 4 años, su familia estaba convencida de que sufría retraso mental. Sin embargo, en 1778 fue el primero en aislar el metano (el principal componente del gas natural). Al igual que muchos químicos de su época, hizo un trabajo significativo sobre la electricidad en relación con las reacciones químicas. Construyó la primera batería eléctrica, y la unidad de fuerza electromotriz, el volt (V), recibió ese nombre en su honor.
- Las anguilas eléctricas pueden matar o paralizar a sus presas produciendo diferencias de potencial (o voltajes) mayores de 650 volts, una cifra que equivale a más de 50 veces el voltaje de un acumulador (batería) de automóvil. Otros peces eléctricos, como el nariz de elefante, generan apenas 1 volt, que resulta útil para localizar a sus presas, pero no para cazarlas.



La chica en la imagen experimenta algunos efectos eléctricos, conforme se carga a un potencial eléctrico de varios miles de volts. Los circuitos domésticos operan a sólo 120 volts y pueden darle a usted un choque molesto y potencialmente peligroso. Sin embargo, la señorita no parece tener ningún problema. ¿Qué es lo que pasa? El lector encontrará la explicación de esto y de muchos otros fenómenos eléctricos en éste y en los siguientes dos capítulos. Ahora estudiaremos el concepto básico de potencial eléctrico, y examinaremos sus propiedades y su utilidad.

Aun cuando este capítulo se concentra en el estudio de conceptos fundamentales de electricidad, como voltaje y capacitancia, se incluye información sobre sus aplicaciones. Por ejemplo, la máquina de rayos X de su dentista trabaja con alto voltaje para acelerar electrones. Los desfibriladores del corazón utilizan condensadores para almacenar temporalmente la energía eléctrica requerida para estimular el corazón a tomar su ritmo correcto. En las cámaras fotográficas se utilizan condensadores para almacenar la energía que acciona la unidad de flash. Nuestro sistema nervioso, al ser una red de comunicación, es capaz de enviar miles de voltajes eléctricos por segundo, que van y vienen por los “cables” que llamamos nervios. Estas señales son generadas por actividad química. El cuerpo las utiliza para permitirnos hacer muchas actividades que damos por sentadas, como el movimiento muscular, los procesos mentales, la visión y la audición. En capítulos posteriores, analizaremos más usos de la electricidad, como los aparatos eléctricos, las computadoras, los instrumentos médicos, el sistemas de distribución de energía eléctrica y el cableado doméstico.

2.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico

OBJETIVOS: a) Entender el concepto de diferencia de potencial eléctrico (voltaje) y su relación con la energía potencial eléctrica y b) calcular diferencias de potencial eléctrico.

En el capítulo 1, los efectos eléctricos fueron analizados en términos de vectores de campo eléctrico y líneas de fuerza eléctrica. Recuerde que en los primeros capítulos, al estudiar la mecánica, iniciamos el uso de las leyes de Newton, los diagramas de cuerpo libre y las fuerzas (*vectores*). Entonces, la búsqueda de un enfoque más sencillo nos condujo al estudio de cantidades *escalares* como el trabajo, la energía cinética y la energía potencial. Con esos conceptos, pudieron emplearse métodos de energía para resolver muchos problemas que habrían sido mucho más difíciles de tratar usando el enfoque vectorial (fuerza). Resulta extremadamente útil, tanto conceptualmente como desde un enfoque de resolución de problemas, extender esos métodos de energía al estudio de los campos eléctricos.

Energía potencial eléctrica

Empecemos con uno de los patrones de campo eléctrico más sencillo: el campo entre dos grandes placas paralelas cargadas opuestamente. Como vimos en el capítulo 1, cerca del centro de las placas el campo es uniforme en magnitud y en dirección (▼ figura 2.1a). Suponga que una carga pequeña positiva q_+ se mueve con rapidez constante contra el campo eléctrico, \vec{E} , directamente de la placa negativa (A) a la placa positiva (B). Se requiere una fuerza externa (\vec{F}_{ext}) con la misma magnitud que la fuerza eléctrica (¿por qué?), de manera que $F_{\text{ext}} = q_+E$. El trabajo efectuado por la fuerza externa es positivo, ya que la fuerza y el desplazamiento van en la misma dirección. Así, la cantidad de trabajo hecho por la fuerza externa es $W_{\text{ext}} = F_{\text{ext}}(\cos 0^\circ)d = q_+Ed$.

Si la carga de prueba es liberada cuando llega a la placa positiva, ésta acelerará de regreso hacia la placa negativa, ganando energía cinética. Esta energía cinética resulta del trabajo efectuado sobre la carga, y la energía inicial (cuando no hay energía cinética en B) debe ser algún tipo de energía potencial. Al mover la carga de la placa A a la placa B, la fuerza externa incrementa la **energía potencial eléctrica**, U_e , de la carga ($U_B > U_A$) en una cantidad igual al trabajo hecho sobre la carga. Por lo que el *cambio* en la energía potencial eléctrica de la carga es:

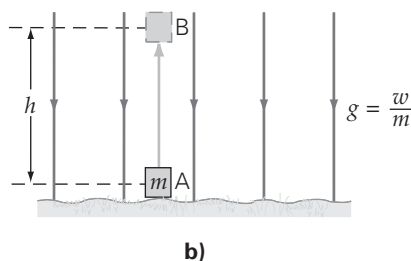
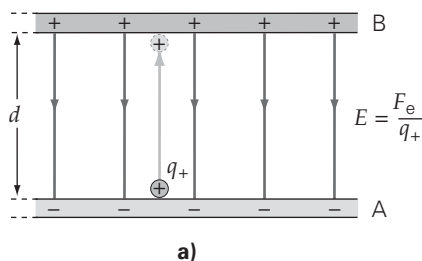
$$\Delta U_e = U_B - U_A = q_+Ed$$

La analogía gravitacional del campo eléctrico de placas paralelas es el campo gravitacional cerca de la superficie de la Tierra, donde ese campo es uniforme. Cuando un objeto se eleva una distancia vertical h a velocidad constante, el cambio en su energía potencial es positivo ($U_B > U_A$) e igual al trabajo efectuado por la fuerza externa (levantamiento). Suponiendo que no hay aceleración, esta fuerza es igual al peso del objeto: $F_{\text{ext}} = w = mg$ (figura 2.1b). Así, el incremento en energía potencial gravitacional es

$$\Delta U_g = U_B - U_A = F_{\text{ext}}h = mgh$$

(Nota: para distinguir con claridad entre las dos situaciones, se usan diferentes símbolos h y d .)

▼ **FIGURA 2.1** Cambios en energía potencial en campos eléctricos y gravitacionales uniformes a) Para mover una carga positiva q_+ contra el campo eléctrico se requiere trabajo positivo e incrementa la energía potencial eléctrica. b) Para mover una masa m contra el campo gravitacional requiere trabajo positivo e incrementa la energía potencial gravitacional.



Nota: de la ecuación, $\vec{E} = \vec{F}/q_+$ y $\vec{F} = q_+\vec{E}$.

Diferencia de potencial eléctrico

Recuerde que al definir el campo eléctrico como la fuerza eléctrica *por unidad de carga de prueba positiva*, se eliminó la dependencia sobre la carga de prueba. Entonces, conociendo el campo eléctrico, se determina la fuerza en cualquier carga puntual colocada en esa localidad, con $F_e = q_+ E$. Asimismo, la **diferencia de potencial eléctrico**, ΔV , entre dos puntos cualesquiera en el espacio se define como el cambio en energía potencial *por carga unitaria de prueba positiva*:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} \quad (\text{diferencia de potencial eléctrico}) \quad (2.1)$$

Unidad SI de diferencia de potencial eléctrico:
joule/coulomb (J/C) o volt (V)

La unidad SI de la diferencia de potencial eléctrico es el joule por coulomb. Esta unidad se denomina **volt (V)** en honor de Alessandro Volta (1745-1827), el científico italiano que construyó la primera batería (capítulo 3), por lo que $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$. La diferencia de potencial comúnmente se llama **voltaje**, y el símbolo para la diferencia de potencial usualmente se cambia de ΔV a sólo V , como lo haremos más adelante en este capítulo.

Tenga en cuenta un punto fundamental: la diferencia de potencial eléctrico, aunque se basa en la diferencia de *energía* potencial eléctrica, *no* es lo mismo. La diferencia de potencial eléctrico se define como la diferencia de energía potencial eléctrica *por carga unitaria* y, por lo tanto, no depende de la cantidad de carga movida. Como el campo eléctrico, la diferencia de potencial es una propiedad útil, ya que a partir de ΔV se calcula ΔU_e para *cualquier* cantidad de carga movida. Para ilustrar este punto, calculemos la diferencia de potencial asociada con el campo uniforme entre dos placas paralelas:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} = \frac{q_+ E d}{q_+} = E d \quad \begin{array}{l} \text{diferencia de potencial} \\ \text{(sólo placas paralelas)} \end{array} \quad (2.2)$$

Observe que la cantidad de carga movida, q_+ , se cancela. Así, la diferencia de potencial ΔV depende sólo de las características de las placas cargadas, esto es, del campo que producen (E) y su separación (d). Decimos que:

Para un par de placas paralelas con cargas opuestas, la placa con carga positiva está en un *potencial eléctrico mayor* que la de carga negativa, por una cantidad ΔV .

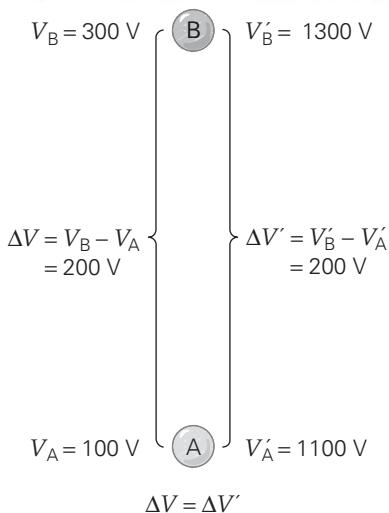
Note que se definió la *diferencia* de potencial eléctrico sin definir primero el potencial eléctrico (V). Aunque este enfoque no parece correcto, hay una buena razón para hacerlo así. Las *diferencias* de potencial eléctrico son las cantidades físicamente significativas que realmente se miden. (Las diferencias de potencial eléctrico, los voltajes, se miden usando voltímetros, los cuales se estudian en el capítulo 4.) En cambio, el valor del potencial eléctrico V no es definible en una manera absoluta, ya que depende por completo de la elección de un punto de referencia. Esto significa que una constante arbitraria puede sumarse a todos los potenciales, o restarse de éstos, y no alterar las *diferencias* de potencial.

Encontramos la misma idea durante nuestro estudio de las formas mecánicas de la energía potencial asociada con resortes y gravitación (apartados 3.2 y 3.4 de *Física 11*). Recuerde que sólo eran importantes los *cambios* en energía potencial. Determinamos los valores definidos de la energía potencial, pero sólo después de que se definió un punto de referencia cero. Así, en el caso de la gravedad, por conveniencia, una energía potencial gravitacional igual a cero a veces se elige en la superficie terrestre. Sin embargo, es igualmente correcto (y a veces más conveniente) definir el valor cero a una distancia infinita de la Tierra (apartado 5.5 de *Física 11*).

Esta propiedad también es válida para la energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico. Este último puede elegirse como cero en la placa negativa de un par de placas paralelas cargadas. Sin embargo, a veces resulta conveniente localizar el valor cero en el infinito, como veremos en el caso de una carga puntual. De cualquier manera, no se afectará la *diferencia* entre dos puntos dados. Esta idea se aclara en la sección Aprender dibujando de esta página. Por lo que suponga que para una cierta selección de la localidad del potencial eléctrico cero, el punto A resulta tener un potencial de +100 V y el punto B un potencial de +300 V. Con un punto cero diferente, el potencial en A podría ser de +1100 V. En tal caso, el valor del potencial eléctrico en B sería de +1300 V. Independientemente del punto cero, B *siempre* estará 200 V más arriba en potencial que A.

APRENDER DIBUJANDO

ΔV es independiente del punto de referencia



Nota: comúnmente asignamos un valor de cero al potencial eléctrico de la placa negativa, pero esto es arbitrario. Sólo *diferencias* de potencial tienen sentido.

El siguiente ejemplo ilustra la relación entre energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico.

Ejemplo 2.1 ■ Métodos de energía para mover un protón: energía de potencial contra potencial

Imagine que un protón se mueve desde la placa negativa hasta la placa positiva del arreglo de placas paralelas (►figura 2.2a). Las placas están 1.50 cm separadas, y el campo eléctrico es uniforme con una magnitud de 1500 N/C. a) ¿Cuál es el cambio en la energía potencial eléctrica del protón? b) ¿Cuál es la diferencia de potencial eléctrico (voltaje) entre las placas? c) Si el protón se libera desde el reposo en la placa positiva (figura 2.2b), ¿qué rapidez tendrá justo antes de tocar la placa negativa?

Razonamiento. a) El cambio en energía potencial puede calcularse a partir del trabajo requerido para mover la carga. b) La diferencia de potencial eléctrico entre las dos placas se determina dividiendo el trabajo efectuado entre la carga movida. c) Cuando se libera el protón, su energía potencial eléctrica se convierte en energía cinética. Conociendo la masa del protón, se puede calcular su rapidez.

Solución. La magnitud del campo eléctrico, E , está dada. Como está implicado un protón, se conocen su masa y carga (tabla 1.1).

Dado: $E = 1500 \text{ N/C}$ **Encuentre:** a) ΔU_e (cambio de energía potencial)
 $q_p = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ b) ΔV (diferencia de potencial entre placas)
 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ c) v (rapidez del protón liberado justo antes de alcanzar la placa negativa)
 $d = 1.50 \text{ cm} = 1.50 \times 10^{-2} \text{ m}$

a) Se incrementa la energía potencial eléctrica, porque debe efectuarse trabajo positivo sobre el protón para moverlo contra el campo eléctrico, hacia la placa positiva:

$$\begin{aligned}\Delta U_e &= q_p E d = (+1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1500 \text{ N/C})(1.50 \times 10^{-2} \text{ m}) \\ &= +3.60 \times 10^{-18} \text{ J}\end{aligned}$$

b) La diferencia de potencial, o voltaje, es el cambio de energía potencial por carga unitaria (definida en la ecuación 2.1):

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_p} = \frac{+3.60 \times 10^{-18} \text{ J}}{+1.60 \times 10^{-19} \text{ C}} = +22.5 \text{ V}$$

Decimos entonces que la placa positiva es 22.5 V superior en potencial eléctrico que la placa negativa.

c) La energía total del protón es constante; por lo tanto, $\Delta K + \Delta U_e = 0$. El protón no tiene energía cinética inicial ($K_o = 0$). Por consiguiente, $\Delta K = K - K_o = K$. De esta relación, se calcula la rapidez del protón:

$$\Delta K = K = -\Delta U_e$$

o bien,

$$\frac{1}{2} m_p v^2 = -\Delta U_e$$

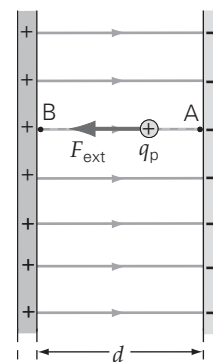
Pero al regresar a la placa negativa, el cambio en energía potencial del protón es negativo (¿por qué?), de manera que $\Delta U_e = -3.60 \times 10^{-18} \text{ J}$ y la rapidez del protón será:

$$v = \sqrt{\frac{2(-\Delta U_e)}{m_p}} = \sqrt{\frac{2[-(-3.60 \times 10^{-18} \text{ J})]}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 6.57 \times 10^4 \text{ m/s}$$

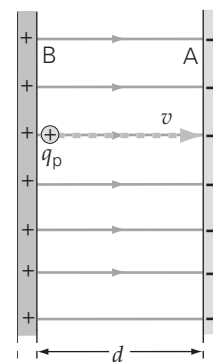
Si bien la energía cinética ganada es muy pequeña, el protón adquiere una alta rapidez porque su masa es extremadamente pequeña.

Ejercicio de refuerzo. ¿Cómo cambiarían sus respuestas en este ejemplo si se moviese una partícula alfa en vez de un protón? (Una partícula alfa es el núcleo de un átomo de helio y tiene una carga de $+2e$ con una masa de aproximadamente cuatro veces la del protón.) (Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se dan al final del libro.)

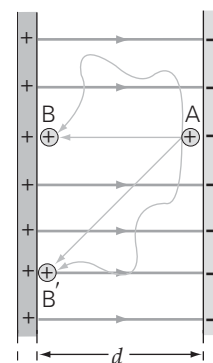
Los principios del ejemplo 2.1 pueden usarse también para demostrar otra propiedad interesante de la energía potencial eléctrica (y del potencial eléctrico): ambos son *independientes de las trayectorias seguidas*. Recuerde que en el apartado 3.5 de *Física 11* vimos que esto significa que *la fuerza electrostática es conservativa*. En la figura 2.2c, el trabajo efectuado para mover el protón de A a B es el mismo, independientemente de la ruta tomada. Así, las trayectorias ondulantes alternativas de A a B y de A a B' requieren el mismo trabajo que sus respectivas trayectorias rectilíneas. Esto se debe a que el movimiento en ángulo recto al campo no requiere trabajo. (¿Por qué?)



a)



b)



c)

▲ **FIGURA 2.2** Aceleración de una carga a) Al mover un protón de la placa negativa a la positiva se incrementa la energía potencial del protón. (Véase el ejemplo 2.1.) b) Cuando se libera de la placa positiva, el protón acelera de regreso hacia la placa negativa, ganando energía cinética a costa de la energía potencial eléctrica. c) El trabajo efectuado para mover un protón entre dos puntos cualesquiera en un campo eléctrico, como A y B o A y B', es independiente de la trayectoria.

Nota: las diferencias de potencial, como en campos eléctricos, se definen en términos de cargas positivas. Las cargas negativas se someten a la misma diferencia de potencial, pero la energía potencial opuesta cambia. Para determinar si el potencial aumenta o disminuye, decida si una fuerza externa efectúa trabajo positivo o negativo sobre una carga de prueba *positiva*.

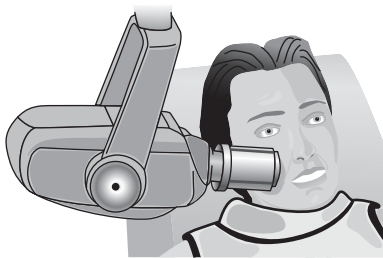
La analogía gravitacional en el ejemplo 2.1 es, por supuesto, elevar un objeto en un campo gravitacional uniforme. Cuando el objeto se eleva, se incrementa su energía potencial gravitacional, porque la fuerza de gravedad actúa hacia abajo. Sin embargo, con la electricidad, sabemos que hay dos tipos de cargas, y la fuerza entre ellas puede ser de repulsión o de atracción. En este punto cesa la simple analogía con la gravedad.

Para entender por qué la analogía falla, considere cómo el análisis del ejemplo 2.1 diferiría si se hubiera usado un electrón en vez de un protón. El electrón, negativamente cargado, sería atraído a la placa B, por lo que la fuerza externa tendría que ser en sentido *opuesto* al desplazamiento del electrón (para evitar que el electrón acelerara). Así, para un electrón, esta fuerza haría trabajo *negativo*, *disminuyendo* la energía potencial eléctrica. A diferencia del protón, el electrón es atraído hacia la placa positiva (la placa con mayor potencial eléctrico). Si se le permitiera moverse libremente, el electrón “caería” (aceleraría) hacia la región de menor potencial. Entonces tanto el protón como el electrón terminaron perdiendo energía potencial y ganando energía cinética. En resumen, acerca del comportamiento de partículas cargadas en campos eléctricos, diremos que:

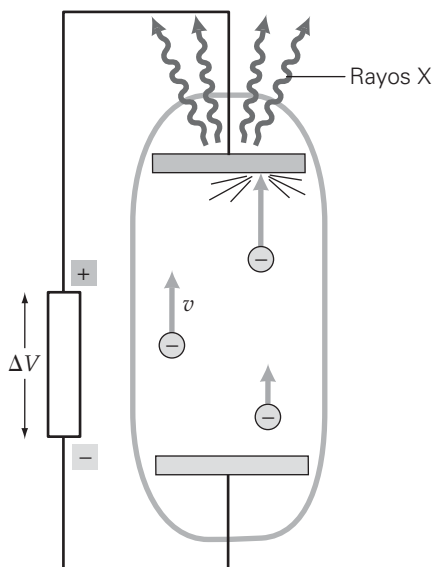
Las cargas positivas, al ser liberadas, tienden a moverse hacia regiones de menor potencial eléctrico.

Al liberarse las cargas negativas tienden a moverse hacia regiones de mayor potencial eléctrico.

Considere la siguiente aplicación médica que implica la generación de rayos X a partir de electrones rápidos acelerados por grandes diferencias de potencial eléctrico (voltajes).



a)



b)

▲ **FIGURA 2.3** Producción de rayos X *a)* Un aparato dental de rayos X. *b)* Un diagrama esquemático de la producción de rayos X.

Ejemplo 2.2 ■ Creación de rayos X: aceleración de electrones

Los consultorios dentales modernos cuentan con aparatos de rayos X para diagnosticar problemas dentales ocultos (figura 2.3a). En general los electrones se aceleran a través de una diferencia de potencial eléctrico (voltajes) de 25 000 V. Cuando los electrones golpean la placa positivamente cargada, su energía cinética se convierte en partículas de luz de alta energía llamadas *fotones de rayos X* (figura 2.3b). (Los fotones son partículas de luz.) Suponga que la energía cinética de un solo electrón está igualmente distribuida entre cinco fotones de rayos X. ¿Cuánta energía tendría un fotón?

Razonamiento. De la conservación de la energía, la energía cinética ganada por cualquier electrón es igual en magnitud a la energía potencial eléctrica que pierde. De esta energía cinética perdida por un electrón, puede calcularse la energía de un fotón de rayo X.

Solución. Se conoce la carga de un electrón (de la tabla 1.1), y se da el voltaje de aceleración.

Dado: $q = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ **Encuentre:** energía (E) de un fotón de rayo X
 $\Delta V = 2.50 \times 10^4 \text{ V}$

El electrón deja la placa negativamente cargada y se mueve hacia la región de máximo potencial eléctrico (esto es, “colina arriba”). Así, el cambio en su energía potencial eléctrica es

$$\Delta U_e = q\Delta V = (-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(+2.50 \times 10^4 \text{ V}) = -4.00 \times 10^{-15} \text{ J}$$

La ganancia en energía cinética proviene de esta pérdida en energía potencial eléctrica. Como los electrones no tienen energía cinética apreciable cuando ellos empiezan a moverse,

$$K = |\Delta U_e| = 4.00 \times 10^{-15} \text{ J}$$

Por lo tanto, si se comparte igualmente un fotón tendrá una energía de

$$E = \frac{K}{5} = 8.00 \times 10^{-16} \text{ J}$$

Ejercicio de reforzamiento. En este ejemplo, use métodos de energía para determinar la rapidez de uno de los electrones cuando está a un décimo de la distancia a la placa positiva.

Diferencia de potencial eléctrico debido a una carga puntual

En campos eléctricos no uniformes, la diferencia de potencial entre dos puntos se determina aplicando la definición dada en la ecuación 2.1. Sin embargo, cuando varía la intensidad del campo (y por ende el trabajo efectuado), su cálculo se complica. El úni-

co campo no uniforme que consideraremos en detalle es el debido a una carga puntual (► figura 2.4). Para la expresión para la diferencia de potencial (voltaje) entre dos puntos a distancias r_A y r_B desde una carga puntual q , simplemente enunciaremos:

$$\Delta V = \frac{kq}{r_B} - \frac{kq}{r_A} \quad \text{diferencia de potencial eléctrico} \quad (2.3)$$

(sólo carga puntual)

En la figura 2.4, la carga puntual es positiva. Como la localidad B está más cerca de la carga que A, la diferencia de potencial es positiva, es decir, $V_B - V_A > 0$ o $V_B > V_A$. De manera que B está a un mayor potencial que A. Esto fundamentalmente es porque los cambios en el potencial se determinan visualizando el movimiento de una carga de prueba positiva. Aquí se requiere un trabajo *positivo* para mover una carga de prueba de A a B.

De este análisis, vemos que el potencial eléctrico aumenta conforme consideramos localidades más cercanas a una carga positiva. Observe además (figura 2.4) que el trabajo efectuado en la trayectoria II es el mismo que en la trayectoria I. Como la fuerza eléctrica es una fuerza conservativa, la diferencia de potencial es la misma, independientemente de la trayectoria.

Ahora considere lo que pasaría si la carga puntual fuera negativa. En este caso, B estaría a un *menor* potencial que A, ya que el trabajo requerido para mover una carga de prueba positiva más cerca ahora sería *negativo* (¿por qué?)

Entonces, el potencial eléctrico cambia de acuerdo con las siguientes reglas:

El potencial eléctrico aumenta cuando consideramos localidades más cercanas a cargas positivas o más alejadas de cargas negativas.

y

El potencial eléctrico disminuye cuando consideramos localidades más alejadas de cargas positivas o más cercanas a cargas negativas.

Por lo general el potencial a una distancia muy grande de una carga puntual se elige igual a cero (como lo hicimos con la energía potencial gravitacional para una masa puntual en el capítulo 5 de *Física 11*). Para esta selección, el *potencial eléctrico* V a una distancia r de una carga puntual está dado por

$$V = \frac{kq}{r} \quad \text{potencial eléctrico} \quad (2.4)$$

(sólo carga puntual,
cero a infinito)

Aunque esta expresión es para el potencial eléctrico, V , recuerde que sólo son importantes las *diferencias* de potencial eléctrico (ΔV), como lo ilustra el siguiente ejemplo.

Ejemplo integrado 2.3 ■ Descripción del átomo de hidrógeno: diferencias de potencial cerca de un protón

En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el electrón en órbita alrededor del protón puede existir sólo en ciertas órbitas circulares. La más pequeña tiene un radio de 0.0529 nm, y la siguiente mayor tiene un radio de 0.212 nm. a) ¿Qué puede usted decir acerca del potencial eléctrico asociado con cada órbita? 1) La menor tiene un mayor potencial, 2) la mayor tiene un mayor potencial o 3) ambas tienen el mismo potencial. Explique su razonamiento. b) Verifique su respuesta en el inciso a calculando los valores del potencial eléctrico en localidades de las dos órbitas.

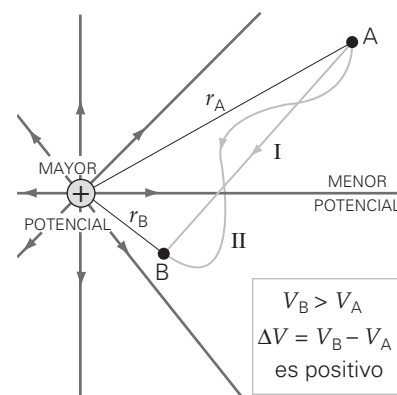
a) Razonamiento conceptual. El electrón está en órbita en el campo de un protón, cuya carga es positiva. Como el potencial eléctrico crece con distancia decreciente desde una carga positiva, la respuesta debe ser 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Conocemos la carga del protón, por lo que la ecuación 16.4 puede usarse para encontrar los valores del potencial. A continuación damos una lista de los valores,

Dado: $q_p = +1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ **Encuentre** el valor del potencial eléctrico
 $r_1 = 0.0529 \text{ nm} = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ (V) de cada órbita
 $r_2 = 0.212 \text{ nm} = 2.12 \times 10^{-10} \text{ m}$ (Nota: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

La ecuación 16.4 nos permite determinar el potencial eléctrico en ambas distancias. Así,

$$V_1 = \frac{kq_p}{r_1} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(+1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{5.29 \times 10^{-11} \text{ m}} = +27.2 \text{ V}$$



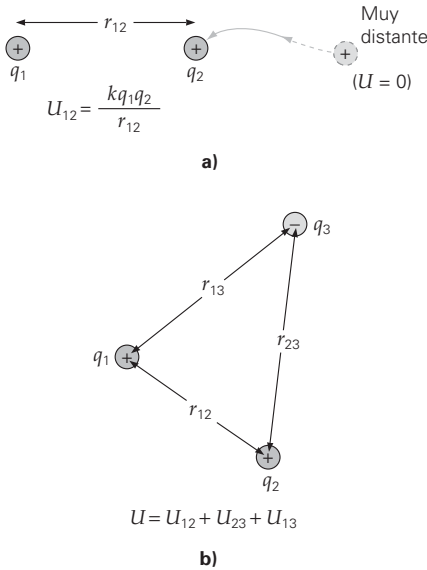
▲ **FIGURA 2.4** Campo y potencial eléctricos debidos a una carga puntual El potencial eléctrico aumenta conforme usted se acerca a una carga positiva. Así, B está a un potencial mayor que A.

(continúa en la siguiente página)

y para la órbita mayor, tenemos

$$V_2 = \frac{kq_p}{r_2} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(+1.60 \times 10^{-19} \text{ C})}{2.12 \times 10^{-10} \text{ m}} = +6.79 \text{ V}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que el electrón se movió de la más pequeña a la siguiente órbita. a) ¿Se movió a una región de mayor o menor potencial eléctrico? b) ¿Cuál sería el cambio en la energía potencial eléctrica del electrón?



▲ FIGURA 2.5 Energía potencial eléctrica mutua de cargas puntuales a) Si se mueve una carga positiva desde una gran distancia a una distancia r_{12} desde otra carga positiva, se tiene un incremento en energía potencial, porque debe efectuarse trabajo positivo para acercar las cargas mutuamente repelentes. b) Para más de dos cargas, la energía potencial eléctrica del sistema es la suma de las energías potenciales mutuas de cada par.

Energía potencial eléctrica de varias configuraciones de carga

En el capítulo 5 de *Física 11* la energía potencial gravitacional de *sistemas* de masas se analizó con algún detalle. Las expresiones para la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional son matemáticamente similares, así como aquellas para las correspondientes energías potenciales, excepto por el uso de carga en vez de masa (recuerde que la carga se asocia a dos signos). En el caso gravitacional de dos masas, la energía potencial gravitacional mutua es negativa, porque la fuerza siempre es *atractiva*. Para la energía potencial eléctrica, el resultado puede ser positivo o negativo, porque la fuerza eléctrica puede ser de *repulsión* o de *atracción*.

Si una carga puntual positiva q_1 está fija en el espacio y una segunda carga positiva q_2 se lleva hacia ella desde una distancia muy grande (es decir, hacen su localidad inicial $r \rightarrow \infty$) a una distancia r_{12} (ver figura 2.5a). En este caso, el trabajo requerido es positivo (¿por qué?). Por lo tanto, este sistema específico gana energía potencial eléctrica. El potencial a una gran distancia (V_∞) se escoge igual a cero, como se acostumbra para cargas puntuales y masas. (Recuerde que el punto de referencia cero es arbitrario.) Así, de la ecuación 2.3, vemos que el cambio en energía potencial es

$$\Delta U_e = q_2 \Delta V = q_2 (V_1 - V_\infty) = q_2 \left(\frac{kq_1}{r_{12}} - 0 \right) = \frac{kq_1 q_2}{r_{12}}$$

Como el valor a gran distancia de la energía potencial eléctrica se elige igual a cero, se infiere que $\Delta U_e = U_{12} - U_\infty = U_{12}$. Con esta selección del valor de referencia, la energía potencial de *cualquier* sistema de dos cargas es

$$U_{12} = \frac{kq_1 q_2}{r_{12}} \quad \begin{array}{l} \text{energía potencial eléctrica} \\ \text{mutua (dos cargas)} \end{array} \quad (2.5)$$

Para cargas de *signos diferentes*, la energía potencial eléctrica es negativa. Para cargas del *mismo signo*, la energía potencial eléctrica es positiva. Así, si las dos cargas son del mismo signo, al liberarlas, se separarán ganando energía cinética y perdiendo energía potencial. A la inversa, se requiere trabajo positivo para incrementar la separación de dos cargas opuestas, como el protón y el electrón, similar a estirar un resorte. (Véase el Ejercicio de refuerzo del Ejemplo integrado 2.3.)

Como la energía es una cantidad escalar, para una configuración de cualquier número de cargas puntuales, la energía potencial *total* (U) es la suma algebraica de las energías potenciales mutuas de todos los pares de cargas:

$$U = U_{12} + U_{23} + U_{13} + U_{14} \dots \quad (2.6)$$

Sólo los tres primeros términos de la ecuación 2.6 serían necesarios para la configuración mostrada en la figura 2.5b. Observe que los signos de las cargas mantienen las cosas matemáticamente correctas, como lo muestra la situación molecular del ejemplo 2.4.

Ejemplo 2.4 ■ La molécula de la vida: la energía potencial eléctrica de una molécula de agua

La molécula de agua es la base de la vida como la conocemos. Muchas de sus propiedades importantes (por ejemplo, que sea un líquido sobre la superficie de la Tierra) están relacionadas con el hecho de que es una molécula polar permanente (un dipolo eléctrico; véase la sección 1.4). Una simple figura de la molécula de agua, incluidas las cargas, está dada en la figura 2.6. La distancia de cada átomo de hidrógeno al átomo de oxígeno es de $9.60 \times 10^{-11} \text{ m}$, y el ángulo (θ) entre las dos direcciones de enlace hidrógeno-oxígeno es de 104° . ¿Cuál será la energía electrostática de la molécula de agua?

Razonamiento. El modelo de la molécula de agua implica tres cargas. Se dan las cargas, pero la distancia entre los átomos de hidrógeno deben calcularse mediante trigonometría. La energía potencial electrostática total es la suma algebraica de las energías potenciales de los tres pares de cargas (es decir, la ecuación 2.6 tendrá tres términos).

Solución. Los siguientes datos se tomaron de la figura 2.6.

Dado: $q_1 = q_2 = +5.20 \times 10^{-20} \text{ C}$ **Encuentre:** U (potencial electrostático total de la molécula de agua)
 $q_3 = -10.4 \times 10^{-20} \text{ C}$
 $r_{13} = r_{23} = 9.60 \times 10^{-11} \text{ m}$
 $\theta = 104^\circ$

Observe que $(r_{12}/2)/r_{13} = \text{sen}(\theta/2)$. Por consiguiente, despejamos r_{12} :

$$r_{12} = 2r_{13} \left(\text{sen} \frac{\theta}{2} \right) = 2(9.60 \times 10^{-11} \text{ m})(\text{sen } 52^\circ) = 1.51 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Antes de determinar la energía potencial total de este sistema, calculemos cada contribución de los pares al total por separado. Observe que $U_{13} = U_{23}$. (¿Por qué?) Aplicando la ecuación 2.5,

$$U_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(+5.20 \times 10^{-20} \text{ C})(+5.20 \times 10^{-20} \text{ C})}{1.51 \times 10^{-10} \text{ m}} = +1.61 \times 10^{-19} \text{ J}$$

y

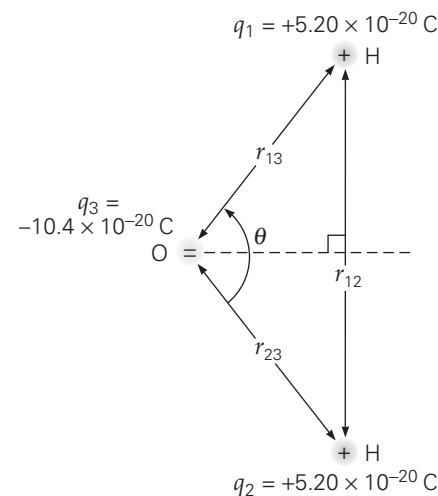
$$U_{13} = U_{23} = \frac{kq_2q_3}{r_{23}} = \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(+5.20 \times 10^{-20} \text{ C})(-10.4 \times 10^{-20} \text{ C})}{9.60 \times 10^{-11} \text{ m}} = -5.07 \times 10^{-19} \text{ J}$$

La energía potencial electrostática total es

$$U = U_{12} + U_{13} + U_{23} = (+1.61 \times 10^{-19} \text{ J}) + (-5.07 \times 10^{-19} \text{ J}) + (-5.07 \times 10^{-19} \text{ J}) = -8.53 \times 10^{-19} \text{ J}$$

El resultado negativo indica que la molécula requiere trabajo positivo para romperse. (Esto es, debe separarse.)

Ejercicio de refuerzo. Otra molécula polar común es el monóxido de carbono (CO), un gas tóxico comúnmente producido en automóviles cuando la quema del combustible es incompleta. El átomo de carbono está positivamente cargado y el átomo de oxígeno negativamente cargado. La distancia entre el átomo de carbono y el átomo de oxígeno es de $1.20 \times 10^{-10} \text{ m}$, y la carga (promedio) sobre cada uno es de $6.60 \times 10^{-20} \text{ C}$. Determine la energía electrostática de esta molécula. ¿Es más o menos eléctricamente estable que una molécula de agua en este ejemplo?



▲ **FIGURA 2.6** Energía potencial electrostática de una molécula de agua Una configuración de carga tiene energía potencial eléctrica, ya que se requiere trabajo para acercar las cargas desde grandes distancias. Las cargas mostradas sobre la molécula de agua son cargas netas promedio, porque los átomos dentro de la molécula comparten electrones. Así, las cargas sobre los extremos de la molécula de agua pueden ser menores que la carga sobre el electrón o el protón. (Véase los detalles en el ejemplo 2.4.)

2.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico

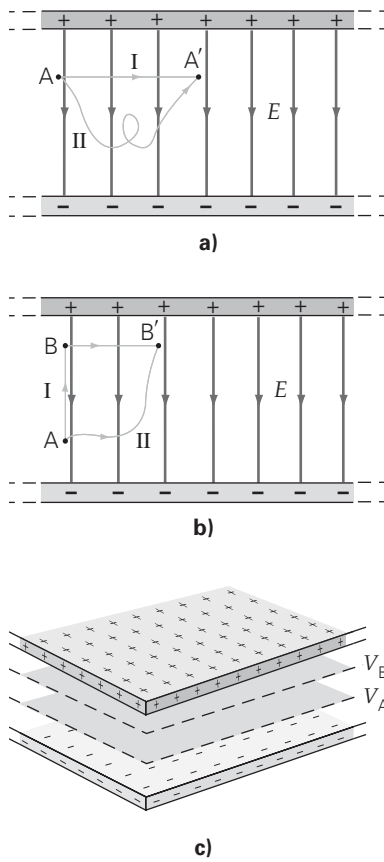
OBJETIVOS: a) Explicar lo que significa superficie equipotencial, b) esbozar superficies equipotenciales para configuraciones de carga simple y c) explicar la relación entre superficies equipotenciales y campos eléctricos.

Superficies equipotenciales

Suponga que una carga positiva se mueve perpendicularmente a un campo eléctrico (como la trayectoria I de la figura 2.7a). Cuando la carga se mueve de A a A', el campo eléctrico no efectúa *ningún trabajo* (¿por qué?). Si no se efectúa trabajo, entonces la energía potencial de la carga no cambia, por lo que $\Delta U_{AA'} = 0$. De este resultado, concluimos que esos dos puntos (A y A') y todos los otros puntos sobre la trayectoria I, están al mismo potencial V; esto es,

$$\Delta V_{AA'} = V_{A'} - V_A = \frac{\Delta U_{AA'}}{q} = 0 \quad \text{o sea} \quad V_A = V_{A'}$$

Esta propiedad también es válida para todos los puntos sobre el plano paralelo a las placas y que contienen la trayectoria I. Un plano sobre el cual el potencial eléctrico es constante, es una **superficie equipotencial** (llamado a veces una *equipotencial*). La



▲ FIGURA 2.7 Construcción de superficies equipotenciales entre placas paralelas *a*) El trabajo efectuado al mover una carga es cero, siempre que usted comience y termine sobre la misma superficie equipotencial. (Compare las trayectorias I y II.) *b*) Una vez que la carga se mueve a un potencial mayor (por ejemplo, del punto A al punto B), puede permanecer en esa nueva superficie equipotencial moviéndose perpendicularmente al campo eléctrico (B a B'). El cambio en potencial es independiente de la trayectoria, ya que el mismo cambio ocurre si se usa la trayectoria I o la trayectoria II. (¿Por qué?) *c*) Las superficies reales equipotenciales dentro de las placas paralelas son planos paralelos a esas placas. Dos de tales placas se muestran, con $V_B > V_A$.

palabra *equipotencial* significa “mismo potencial”. Note que, a diferencia de este caso especial, una equipotencial no necesita ser una superficie plana.

Como ningún trabajo se requiere para mover una carga a lo largo de una superficie equipotencial, por lo general debe ser cierto que

Las superficies equipotenciales forman siempre ángulos rectos con el campo eléctrico.

Además, como el campo eléctrico es un campo conservativo, el trabajo será el mismo si tomamos la trayectoria I, la trayectoria II o *cualquier otra* trayectoria de A a A' (figura 2.7a). Siempre que la carga regrese a la misma superficie equipotencial de la cual partió, el trabajo efectuado es cero y su energía potencial permanece igual.

Si la carga positiva se mueve en sentido opuesto al de \vec{E} (trayectoria I en la figura 2.7b), en ángulos rectos a las equipotenciales, la energía potencial eléctrica y, por lo tanto, el potencial eléctrico, aumentarán. (¿Por qué?) Cuando se alcanza B, la carga está sobre una superficie equipotencial diferente, una con un potencial mayor que la de A. Si la carga se moviera de A a B', el trabajo requerido sería el mismo que al moverla de A a B. Por consiguiente, B y B' están también sobre una superficie equipotencial. Así, para placas paralelas cargadas, las superficies equipotenciales son planos paralelos a las placas, como se muestra en la figura 2.7c.

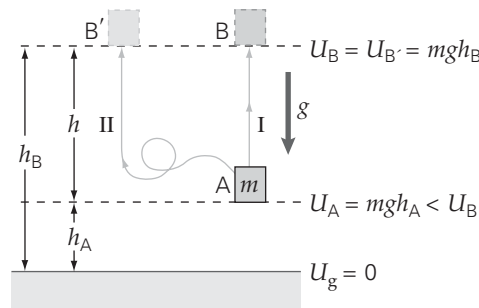
Para ayudar a entender el concepto de una superficie equipotencial eléctrica, consideremos una analogía gravitacional. Si la energía potencial gravitacional se establece como cero al nivel del suelo y se levanta un objeto a una altura $h = h_B - h_A$ (de A a B en la figura 2.8), entonces el trabajo realizado por una fuerza externa es mgh y es positivo. Para el movimiento horizontal, no cambia la energía potencial. Esto significa que el plano rayado a la altura h_B es una superficie equipotencial gravitacional, así como lo es el plano en h_A , pero a un menor potencial. Así, las superficies de energía potencial gravitacional constante son planos paralelos a la superficie terrestre. Los mapas topográficos que presentan contornos terrestres al trazar líneas de elevación constante (usualmente relativos al nivel del mar) en realidad son mapas de potencial gravitacional constante (figura 2.9a, b). Observe cómo las equipotenciales cerca de una carga puntual (figura 2.9c, d) son cualitativamente similares a los contornos de una colina.

Es útil aprender a diagramar las superficies equipotenciales, porque están íntimamente relacionadas con el campo eléctrico y aspectos prácticos como el voltaje. La sección Aprender dibujando sobre relación gráfica entre líneas de campo eléctrico y equipotenciales (p. 45) resume un método cualitativo que es útil para diagramar superficies equipotenciales, dado un patrón de líneas de campo eléctrico. Como se verá ahí, el método es también útil para el problema inverso: diagramar las líneas de campo eléctrico si se dan las superficies equipotenciales. ¿Puede ver cómo esas ideas se usaron para construir las equipotenciales de un dipolo eléctrico en la figura 2.10?

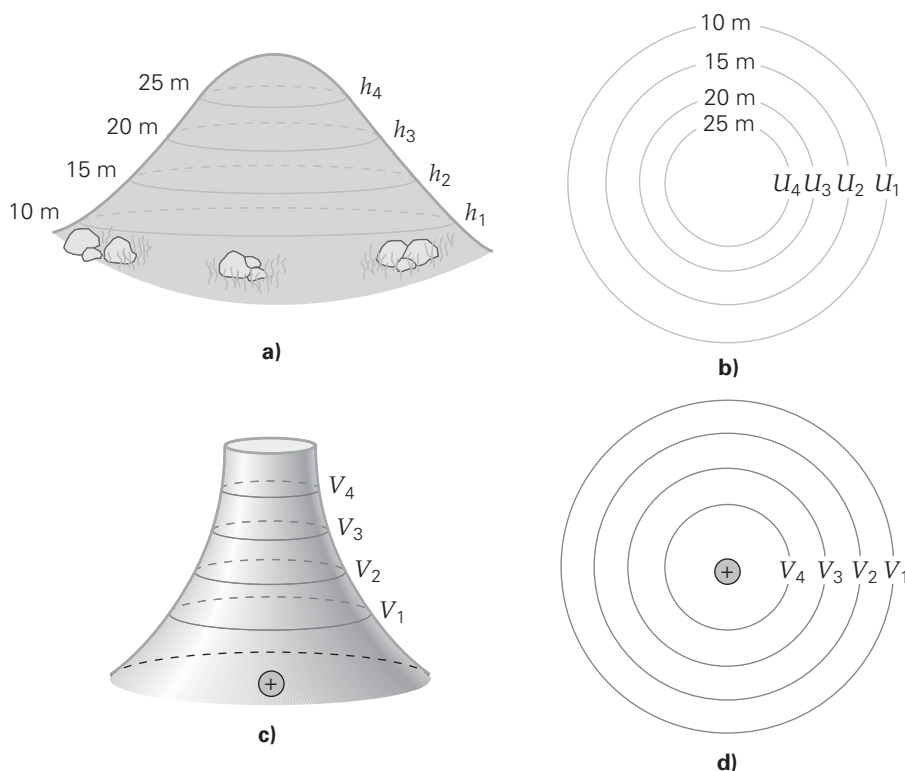
Para determinar la relación entre el campo eléctrico (E) y el potencial eléctrico (V), considere el caso especial del campo eléctrico uniforme (figura 2.11). La diferencia de potencial (ΔV) entre dos planos equipotenciales cualquiera (por ejemplo, los rotulados V_1 y V_2 en la figura) puede calcularse con el mismo procedimiento usado para obtener la ecuación 2.2. El resultado es

$$\Delta V = V_2 - V_1 = E \Delta x \quad (2.7)$$

Así, si usted comienza sobre la superficie equipotencial 1 y se mueve *perpendicularmente alejándose* de ella y *contra* el campo eléctrico a la superficie equipotencial 3, habrá un *incremento* de potencial (ΔV) que depende de la intensidad del campo eléctrico (E) y de la distancia recorrida (Δx).



◀ FIGURA 2.8 Analogía con la energía potencial gravitacional Elevar un objeto en un campo gravitacional uniforme conduce a un incremento en energía potencial gravitacional, y $U_B > U_A$. A determinada altura, la energía potencial del objeto es constante siempre que permanezca sobre esa superficie equipotencial (gravitacional). Aquí, \vec{g} señala hacia abajo, como \vec{E} en la figura 2.7.



▲ FIGURA 2.9 Mapas topográficos; una analogía gravitacional con superficies equipotenciales *a)* Una colina simétrica con cortes a diferentes alturas. Cada corte es un plano de potencial gravitacional constante. *b)* Un mapa topográfico de los cortes en *a*. Los contornos, donde los planos intersecan a la superficie, representan valores cada vez mayores del potencial gravitacional, al subir por la colina. *c)* El potencial eléctrico V cerca de una carga puntual q forma una colina simétrica similar. V es constante a distancias fijas de q . *d)* Los equipotenciales eléctricos alrededor de una carga puntual son esféricos (en dos dimensiones son círculos) con centro en la carga. Cuanto más cerca esté la equipotencial a la carga positiva, mayor será el potencial eléctrico.

Para una distancia de recorrido dada Δx , este movimiento perpendicular da la ganancia máxima posible de potencial. Considere que toma un paso de longitud Δx en cualquier dirección, partiendo de la superficie 1. La forma de maximizar el incremento sería pisar sobre la superficie 3. Un paso en cualquier dirección no perpendicular a la superficie 1 (por ejemplo, terminar sobre la superficie 2) da un menor incremento de potencial.

Al encontrar la dirección del incremento de potencial máximo, encontramos la dirección opuesta a la de \vec{E} . Por regla general esto significa que:

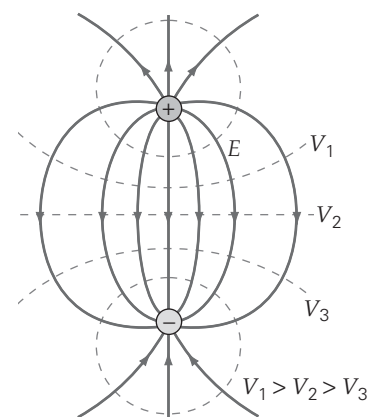
La dirección del campo eléctrico \vec{E} es la dirección en que el potencial eléctrico disminuye más rápidamente.

Así, en cualquier localidad, la magnitud del campo eléctrico es la razón máxima de cambio del potencial con la distancia, o bien,

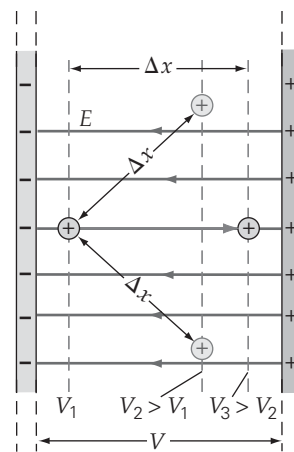
$$E = \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|_{\text{máx}} \quad (2.8)$$

Las unidades de campo eléctrico son volt por metro (V/m). En el capítulo 15, E se expresó en newtons por coulomb (N/C; véase la sección 1.4). Usted ya debe saber, del análisis dimensional, que $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$. Una interpretación gráfica de la relación entre \vec{E} y V se muestra en la sección Aprender dibujando de la p. 45.

En la mayoría de situaciones prácticas, se especifica la diferencia de potencial (*vol-taje*) en vez del campo eléctrico. Por ejemplo, una batería de lámpara D tiene un voltaje terminal de 1.5 V, lo cual significa que puede mantener una diferencia de potencial de 1.5 V entre sus terminales. La mayoría de las baterías de automóvil (acumuladores) tienen un voltaje terminal de aproximadamente 12 V. Algunas de las diferencias de potencial comunes, o voltajes, se presentan en la tabla 2.1.



▲ FIGURA 2.10 Equipotenciales de un dipolo eléctrico Las equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico. $V_1 > V_2$, ya que la superficie equipotencial 1 está más cerca a la carga positiva que la superficie 2. Para entender cómo se construyen las equipotenciales, véase la sección Aprender dibujando de la p. 45.



▲ FIGURA 2.11 Relación entre el cambio de potencial (ΔV) y el campo eléctrico (\vec{E}) La dirección del campo eléctrico es la del decremento máximo de potencial, o la opuesta a la dirección de máximo incremento en potencial (aquí, este máximo está en la dirección de la flecha sólida, no de la angulada; ¿por qué?). La magnitud del campo eléctrico está dada por la razón a la que cambia el potencial con la distancia (usualmente en volts por metro).

TABLA 2.1 Diferencias de potencial eléctrico comunes (voltajes)

| Fuente | Voltaje aproximado (ΔV) |
|---|-----------------------------------|
| A través de membranas nerviosas | 100 mV |
| Baterías de pequeños dispositivos | 1.5 a 9.0 V |
| Baterías de automóvil | 12 V |
| Salida en el hogar (en Estados Unidos) | 110 a 120 V |
| Salidas (en Europa) | 220 a 240 V |
| Encendido de automóvil (bujías) | 10 000 V |
| Generadores en laboratorios | 25 000 V |
| Líneas de suministro de energía eléctrica de alto voltaje | 300 kV o más |
| Nube a superficie de la Tierra durante una tormenta | 100 MV o más |

Ya sea que usted lo sepa o no, vive en un campo eléctrico cerca de la superficie de la Tierra. Este campo varía según las condiciones climáticas y, en consecuencia, puede ser un indicador de que se avecinan tormentas. El ejemplo 2.5 aplica el concepto de superficie equipotencial para ayudar a entender el campo eléctrico de la Tierra.

Ejemplo 2.5 ■ El campo eléctrico de la Tierra y superficies equipotenciales: ¿barómetros eléctricos?

Bajo condiciones atmosféricas normales, la superficie terrestre está eléctricamente cargada. Esto genera un campo eléctrico constante de aproximadamente 150 V/m que señala hacia *abajo* cerca de la superficie. *a)* En tales condiciones, ¿cuál será la forma de las superficies equipotenciales, y en qué dirección disminuye más rápidamente el potencial eléctrico? *b)* ¿Qué separadas están dos superficies equipotenciales que tienen entre sí una diferencia de 1000 V? ¿Cuál tiene un potencial mayor, la más alejada de la Tierra o la más cercana?

Razonamiento. *a)* Cerca de la superficie de la Tierra, el campo eléctrico es aproximadamente uniforme, por lo que las equipotenciales son similares a las de las placas paralelas cargadas. El análisis de las ecuaciones 2.7 y 2.8 nos permite determinar cómo aumenta el potencial. *b)* La ecuación 2.8 puede entonces usarse para determinar qué tan alejadas están las superficies equipotenciales.

Solución. Tenemos,

Dado: $E = 150 \text{ V/m}$, hacia abajo **Encuentre:** *a)* Forma de las superficies equipotenciales y dirección del decremento de potencial
b) Δx (distancia entre equipotenciales)

a) Los campos eléctricos uniformes están asociados con equipotenciales planas. En este caso, los planos son paralelos a la superficie terrestre. El campo eléctrico señala hacia abajo. Ésta es la dirección en que el potencial disminuye más rápidamente.

b) Para determinar la distancia entre los dos equipotenciales, piense en moverse verticalmente de manera que $\Delta V/\Delta x$ tenga su valor máximo. (¿Por qué?) Despejando Δx de la ecuación 2.8 obtenemos

$$\Delta x = \frac{\Delta V}{E} = \frac{1000 \text{ V}}{150 \text{ V/m}} = 6.67 \text{ m}$$

Como el potencial disminuye al movernos hacia abajo (en la dirección de \vec{E}), el mayor potencial está asociado con la superficie que está 6.67 m *más allá* del suelo.

Ejercicio de refuerzo. Reexaminemos el ejemplo anterior, pero bajo condiciones de tormenta. Durante una tormenta con rayos, el campo eléctrico puede adquirir muchas veces el valor normal. *a)* Bajo esas condiciones, si el campo es de 900 V/m y señala hacia arriba, ¿qué tan separadas estarán las dos superficies equipotenciales que difieren en 2000 V? *b)* ¿Qué superficie está a un potencial mayor, la más cercana a la Tierra o la otra más alejada? *c)* ¿Puede decir dónde están localizadas las dos superficies respecto al suelo? Explique por qué.

APRENDER DIBUJANDO

RELACIÓN GRÁFICA ENTRE LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO Y EQUIPOTENCIALES

Como no se requiere trabajo para mover una carga a lo largo de una superficie equipotencial, tales superficies deben siempre ser perpendiculares a las líneas de campo eléctrico. Además, el campo eléctrico tiene una magnitud igual a la carga en potencial por distancia unitaria (V/m) y señala en la dirección en que el potencial disminuye más rápidamente. Podemos usar esto para construir equipotenciales si conocemos el patrón de líneas de campo eléctrico. La proposición inversa es también cierta: Dadas las equipotenciales, podemos construir las líneas de campo eléctrico. Además, si conocemos el potencial (en volts) asociado con cada equipotencial, pueden estimarse la intensidad y la dirección del campo a partir de la razón con que el potencial cambia con la distancia (ecuación 2.8).

Un par de ejemplos deberían proporcionar un punto de vista gráfico sobre la conexión entre superficies equipotenciales y sus campos eléctricos asociados. Considere la figura 1, en la cual se dan las líneas de campo eléctrico y se quiere determinar la forma de las equipotenciales. Elija cualquier punto, como el A, y empiece a moverse según ángulos rectos a las líneas de campo eléctrico. Continúe moviéndose pero siempre manteniendo esta misma orientación perpendicular a las líneas de campo. Entre líneas usted tendrá que aproximar, pero vea adelante a la siguiente línea de campo de modo que pueda cruzarla según un ángulo recto. Para encontrar otra equipotencial, empiece en otro punto, como el B, y proceda de la misma manera. Diagrame tantas equipotenciales como necesite usted para mapear el área de interés. La figura muestra el resultado de esbozar cuatro de tales equipotenciales, de A (en el potencial más alto; ¿puede usted decir por qué?) a D (en el potencial más bajo).

Ahora suponga que le dan las equipotenciales en vez de las líneas de campo (figura 2). Las líneas de campo eléctrico señalan en la dirección de V decreciente y son perpendiculares a

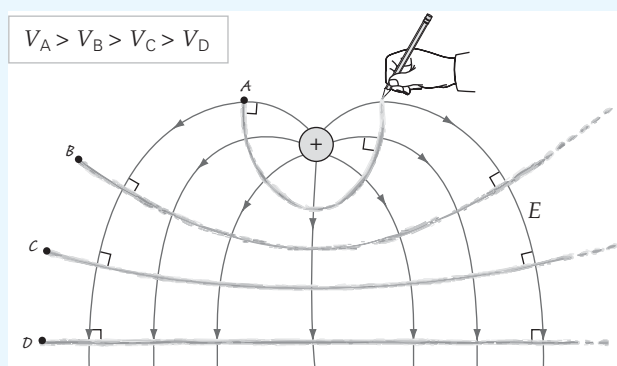


FIGURA 1 Esbozo de equipotenciales de las líneas de un campo eléctrico Si conoce el patrón del campo eléctrico, elija un punto en la región de interés y muévase de forma que su trayectoria siempre sea perpendicular a la siguiente línea de campo. Trace su trayectoria tan suave como le sea posible, planeando adelante de modo que cada línea de campo sucesiva también se cruce según ángulos rectos. Para mapear una superficie con un mayor (o menor) potencial, muévase en la dirección opuesta (o la misma) que el campo eléctrico y repita el proceso. Aquí, $V_A > V_B$, y así sucesivamente.

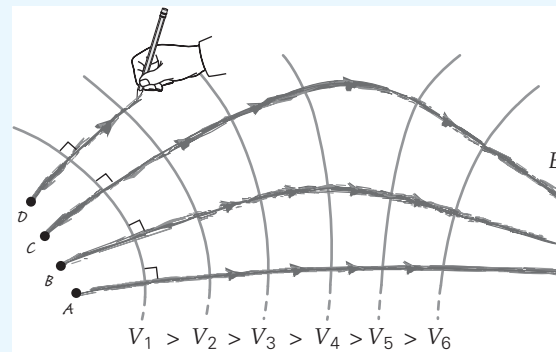


FIGURA 2 Mapeo del campo eléctrico a partir de equipotenciales Comience en un punto conveniente, y trace una línea que cruce cada equipotencial según un ángulo recto. Repita el proceso tan a menudo como sea necesario para revelar el patrón de campo, agregando flechas para indicar el sentido de las líneas de campo de mayor a menor potencial. Al ir de un potencial al próximo, planeé por adelantado de manera que cada equipotencial sucesiva también se cruce según ángulos rectos.

las superficies equipotenciales. Así, para mapear el campo, comience en cualquier punto, y muévase de tal manera que su trayectoria interseque cada superficie equipotencial según un ángulo recto. La línea de campo resultante se muestra en la figura 2, comenzando en el punto A. Iniciando en los puntos B, C y D se obtienen líneas de campo adicionales que sugieren el patrón completo de campo eléctrico; usted necesita sólo sumar las flechas en la dirección del potencial decreciente.

Finalmente, suponga que quiere estimar la magnitud de \vec{E} en algún punto P (figura 3), conociendo los valores de las equipotenciales a 1.0 cm a cada lado de ella. Con esta información, usted puede decir que el campo señala aproximadamente de A a B. (¿Por qué?) Su magnitud aproximada sería entonces

$$E = \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|_{\text{máx}} = \frac{(1000\text{ V} - 950\text{ V})}{2.0 \times 10^{-2}\text{ m}} = 2.5 \times 10^3\text{ V/m}$$

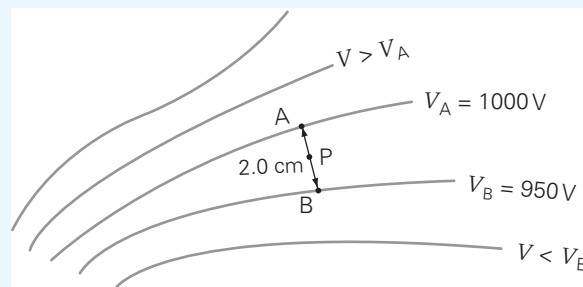


FIGURA 3 Estimación de la magnitud del campo eléctrico La magnitud del cambio de potencial por metro en cualquier punto da la intensidad del campo eléctrico en ese punto.

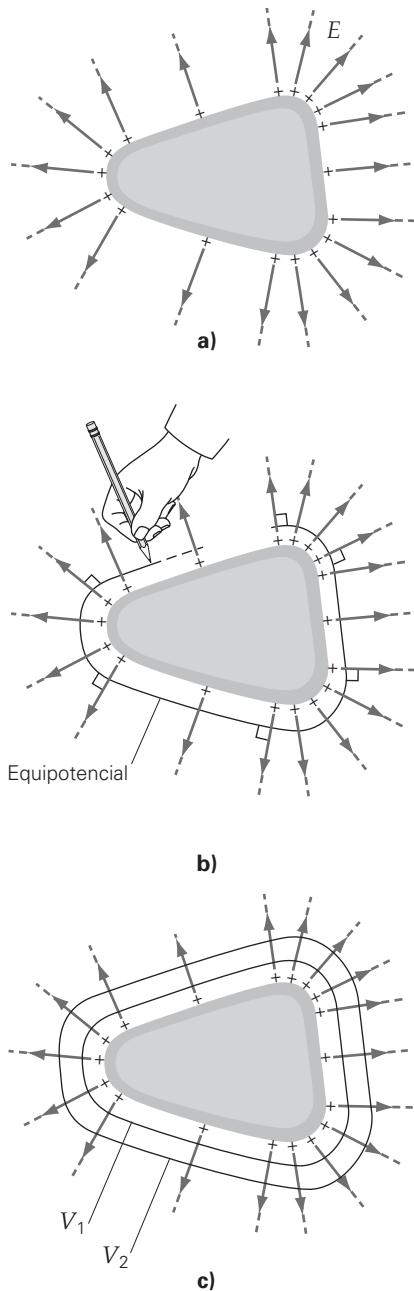
Las superficies equipotenciales pueden también ser útiles para describir el campo cerca de un conductor cargado, como lo muestra el siguiente Ejemplo conceptual.

Ejemplo conceptual 2.6 ■ Las superficies equipotenciales fuera de un conductor cargado

Un conductor sólido con exceso de carga positiva sobre él se muestra en la ◀figura 2.12a. ¿Qué describe mejor la forma de las superficies equipotenciales justo fuera de la superficie del conductor a) planos, b) esferas o c) aproximadamente en forma de la superficie del conductor. Explique su razonamiento.

Razonamiento y respuesta. La opción a puede eliminarse inmediatamente, porque las superficies equipotenciales planas se asocian con placas planas. Si bien podría ser tentador elegir la respuesta b una mirada rápida al patrón de campo eléctrico cerca de la superficie (capítulo 1), en conjunción con la sección Aprender dibujando de la p. 45, muestra que la respuesta correcta es c. Para verificar que c es la respuesta correcta, recuerde que justo arriba de la superficie, el campo eléctrico debe ser perpendicular a esa superficie. Como las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico, deben seguir el contorno de la superficie del conductor (figura 2.12b).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, a) ¿cuál de las dos equipotenciales (1 o 2) que se muestran en la figura 2.12c está a un potencial mayor? b) ¿Cuál es la forma de las superficies equipotenciales muy lejos del conductor? Explique su razonamiento. (Sugerencia: ¿cómo se ve el conductor cargado cuando usted está muy lejos de él?)



▲ FIGURA 2.12 Superficies equipotenciales cerca de un conductor cargado Véase el Ejemplo conceptual 2.6.

Nota: el electrón volt es una unidad de energía. El volt no lo es. ¡No confunda ambos!

El electrón volt

El concepto de potencial eléctrico proporciona una unidad de energía que es especialmente útil en la física molecular, atómica, nuclear y de partículas elementales. El **electrón volt (eV)** se define como la energía cinética adquirida por un electrón (o un protón) acelerado a través de una diferencia de potencial, o voltaje, de exactamente 1 V. La ganancia de energía cinética del electrón es igual (pero de carga opuesta) a su pérdida en energía potencial eléctrica. Usando esta relación, podemos expresar la ganancia de energía cinética en joules:

$$\Delta K = -\Delta U_e = -(e\Delta V) = -(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.00 \text{ V}) = +1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Como esto es lo que significa 1 electrón volt, el factor de conversión entre el electrón volt y el joule (con tres cifras significativas) es

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

El electrón volt es típico de energías de la escala atómica. Así, es conveniente expresar energías atómicas en términos de electrón volts en vez de joules. La energía de *cualquier* partícula cargada acelerada a través de *cualquier* diferencia de potencial puede expresarse en electrón volts. Por ejemplo, si un electrón se acelera a través de una diferencia de potencial de 1000 V, su ganancia en energía cinética (ΔK) será 1000 veces mayor que 1 eV electrón, o

$$\Delta K = e\Delta V = (1 \text{ e})(1000 \text{ V}) = 1000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$$

El *keV* es la abreviatura para el *kiloelectrón volt*.

El electrón volt se define en términos de una partícula con la carga mínima (el electrón o protón). Sin embargo, la energía de una partícula con *cualquier* cantidad de carga también puede expresarse en electrón volts. Así, si una partícula con una carga de $+2e$, tal como una partícula alfa, fuera acelerada a través de una diferencia de potencial de 1000 volts, ganaría una energía cinética de $\Delta K = e\Delta V = (2 \text{ e})(1000 \text{ V}) = 2000 \text{ eV} = 2 \text{ keV}$. Observe lo sencillo que es calcular la energía cinética, si usted trabaja en electrón volts.

A veces son necesarias las unidades más grandes de energía que el electrón volt. Por ejemplo, en la física nuclear y de partículas elementales, es común encontrar partículas con energías de *mega*electrón volts (MeV) y *giga*electrón volts (GeV). (1 MeV = 10^6 eV y 1 GeV = 10^9 eV).*

* Antes, mil millones de electrón volts se refería como BeV, pero esta norma se descartó por la confusión que generó. En algunos países, como Inglaterra y Alemania, un billón significa 10^{12} . En Estados Unidos se le llama trillón.

Al resolver problemas de física, es importante estar consciente de que el electrón volt (eV) no es una unidad SI. Por consiguiente, al usar energías para calcular rapidez, usted debe primero convertir los electrón volts a joules. Por ejemplo, para calcular la rapidez de un electrón acelerado desde el reposo a través de 10.0 V, primero convierta la energía cinética (10.0 eV) a joules:

$$K = (10.0 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1.60 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Para continuar en el sistema SI, la masa del electrón debe expresarse en kilogramos. Entonces, la rapidez se calcula como sigue:

$$v = \sqrt{2K/m} = \sqrt{2(1.60 \times 10^{-18} \text{ J})/(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})} = 1.87 \times 10^6 \text{ m/s}$$

2.3 Capacitancia

OBJETIVOS: a) Definir capacitancia y explicar lo que significa físicamente y b) calcular la carga, el voltaje, el campo eléctrico y el almacenamiento de energía en condensadores de placas paralelas.

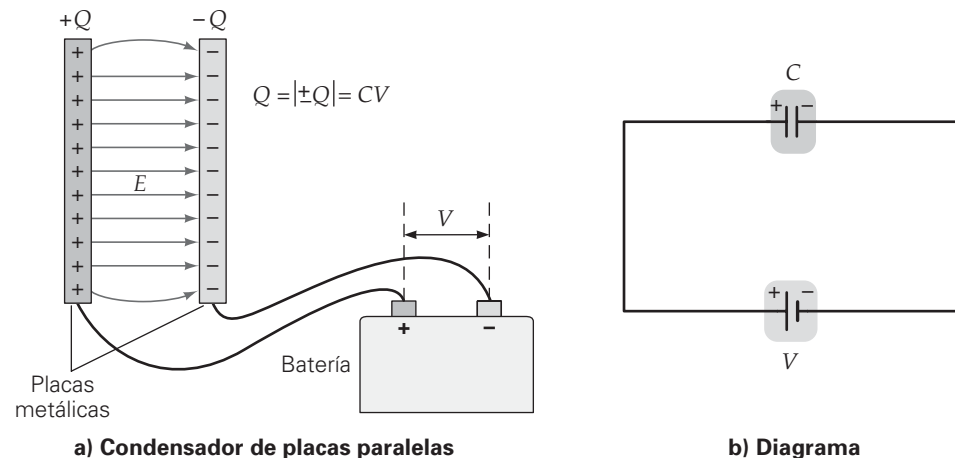
Un par de placas paralelas, si están cargadas, almacenan energía eléctrica (▼ figura 2.13). Un arreglo así de conductores es ejemplo de un **condensador**. (En realidad, cualquier par de conductores califica como condensador.) El almacenamiento de energía tiene lugar porque se requiere trabajo para transferir la carga de una placa a la otra. Imagine que un electrón se desplaza entre un par de placas inicialmente descargadas. Una vez hecho esto, transferir un *segundo* electrón sería más difícil, porque no sólo es repelido por el primer electrón sobre la placa negativa, sino también es atraído por una carga positiva doble sobre la placa positiva. Así, para separar las cargas se requiere cada vez más trabajo, conforme se acumula más y más carga sobre las placas. (Esto es como estirar un resorte. Cuanto más se alargue, más difícil será alargarlo más.)

El trabajo necesario para cargar placas paralelas puede hacerse rápidamente (usualmente en unos pocos microsegundos) por una batería. Aunque no estudiaremos el funcionamiento de una batería en detalle sino hasta el próximo capítulo, todo lo que usted necesita saber ahora es que una batería remueve electrones de la placa positiva y los transfiere, o “bombea”, a través de un alambre a la placa negativa. En el proceso de efectuar trabajo, la batería pierde algo de su energía potencial química interna. Aquí es de gran interés el resultado: una separación de las cargas y la creación de un campo eléctrico en el condensador. La batería continuará cargando el condensador hasta que la diferencia de potencial entre las placas sea igual al voltaje terminal de la batería, por ejemplo, 12 V si usted usa una batería estándar de automóvil. Cuando el condensador se desconecta de la batería, se vuelve “recipiente” almacenador de energía eléctrica.

Para un condensador, la diferencia de potencial a través de las placas es proporcional a la carga Q sobre ellas, o $Q \propto V$.* (Aquí, Q denota la magnitud de la carga sobre

Nota: los condensadores almacenan energía en sus campos eléctricos.

Nota: recuerde que por conveniencia nuestra notación para diferencia de potencial, o voltaje (ΔV), se reemplazará con V .



◀ **FIGURA 2.13** Condensador y diagrama del circuito a) Dos placas metálicas paralelas se cargan con una batería que mueve electrones de la placa positiva a la negativa a través del alambre. Se efectúa trabajo mientras se carga el condensador y la energía se almacena en el campo eléctrico. b) Este diagrama representa la situación de carga mostrada en el inciso a). También muestra los símbolos comúnmente usados para una batería (V) y un condensador (C). La línea más larga del símbolo de batería es la terminal positiva, y la línea más corta representa la terminal negativa. El símbolo para un condensador es similar, pero las líneas son de igual longitud.

*A partir de aquí, usaremos V para denotar diferencias de potencial, en vez de ΔV . Se trata de una práctica común. Siempre recuerde que la cantidad importante es la diferencia de potencial, ΔV .

Nota: las cargas sobre las placas son $+Q$ y $-Q$, pero en general es usual referirse a la magnitud de estas cargas, como Q (que significa $|\pm Q|$), sobre un condensador.

Nota: el farad se llamó así en honor del científico inglés Michael Faraday (1791-1867), un investigador pionero de los fenómenos eléctricos quien fue el primero en introducir el concepto de campo eléctrico.

Nota: generalmente, usaremos la letra minúscula q para representar cargas sobre partículas solas, y la letra mayúscula Q para las cantidades mayores de cargas sobre placas de un condensador.

cualquier placa, no la carga neta sobre todo el condensador, que es cero.) Esta proporcionalidad puede hacerse una ecuación usando una constante, C , llamada *capacitancia*:

$$Q = CV \quad \text{o} \quad C = \frac{Q}{V} \quad (2.9)$$

Unidad SI de capacitancia: coulomb por volt (C/V), o farad (F)

El coulomb por volt equivale al **farad**, $1 C/V = 1 F$. El farad es una unidad grande (véase al ejemplo 2.7), de manera que por lo común se utilizan el *microfarad* ($1 \mu F = 10^{-6} F$), el *nanofarad* ($1 nF = 10^{-9} F$) y el *picofarad* ($1 pF = 10^{-12}$).

Capacitancia significa carga almacenada *por volt*. Cuando un condensador tiene una capacitancia grande, guarda una gran cantidad de carga *por volt*, en comparación con uno de capacitancia pequeña. Si usted conecta la misma batería a dos condensadores diferentes, el que tiene mayor capacitancia almacenará más carga y más energía.

La capacitancia depende *sólo* de la geometría (tamaño, forma y separación) de las placas (y del material entre las placas, sección 2.5), y *no* de la carga en las placas. Considere el condensador de placas paralelas que tiene un campo eléctrico dado por la ecuación 1.5:

$$E = \frac{4\pi kQ}{A}$$

El voltaje a través de las placas se calcula con la ecuación 2.2:

$$V = Ed = \frac{4\pi kQd}{A}$$

La capacitancia de un arreglo de placas paralelas es entonces

$$C = \frac{Q}{V} = \left(\frac{1}{4\pi k} \right) \frac{A}{d} \quad (\text{sólo placas paralelas}) \quad (2.10)$$

Es común reemplazar la expresión en el paréntesis de la ecuación 2.10 por una sola cantidad, llamada **permisividad del espacio libre** (ϵ_0). El valor de esta constante (con tres cifras significativas) es

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2) \quad \text{permisividad del espacio libre} \quad (2.11)$$

ϵ_0 describe las propiedades eléctricas del espacio libre (vacío), aunque su valor en aire es sólo 0.05% mayor. En nuestros cálculos, tomaremos ambos valores como iguales.

Es común reescribir la ecuación 2.10 en términos de ϵ_0 .

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (\text{sólo placas paralelas}) \quad (2.12)$$

Usemos la ecuación 2.12 en el siguiente ejemplo para demostrar qué tan irrealísticamente grande sería un condensador lleno de aire con una capacitancia de 1.0 F.

Ejemplo 2.7 ■ Condensadores de placa paralela: ¿qué tan grande es un farad?

¿Cuál sería el área de placa de un condensador de placas paralelas lleno de aire a 1.0 F, si la separación de las placas fuese de 1.0 mm? ¿Sería realista planear la construcción de un condensador como ese?

Razonamiento. El área se puede calcular directamente con la ecuación 2.12. Recuerde usar todas las cantidades en unidades SI, de manera que la respuesta esté en metros cuadrados. Podemos usar el valor en vacío de ϵ_0 para el aire sin generar un error significativo.

Solución.

Dado: $C = 1.0 F$ **Encuentre:** A (área de una de las placas)
 $d = 1.0 \text{ mm} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$

Despejando el área en la ecuación 2.12 obtenemos

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0} = \frac{(1.0 F)(1.0 \times 10^{-3} \text{ m})}{8.85 \times 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2)} = 1.1 \times 10^8 \text{ m}^2$$

Esto es más de 100 km^2 (40 mi^2), es decir, un cuadrado de más de 10 km (6 mi) de lado. No es realista construir un condensador de ese tamaño; 1.0 F es entonces un valor muy grande de capacitancia. Sin embargo, hay maneras de hacer condensadores de alta capacitancia (sección 2.4).

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuál debería ser la separación de las placas, si usted quisiera que el condensador tuviera una área de placa de 1 cm^2 ? Compare su respuesta con un diámetro atómico típico de 10^{-9} a 10^{-10} m . ¿Es factible construir este condensador?

La expresión para la energía almacenada en un condensador puede obtenerse por análisis gráfico, ya que Q y V varían durante la carga, por ejemplo cuando la carga se separa por medio de una batería. Una gráfica de voltaje contra carga para cargar un condensador es una línea recta con una pendiente de $1/C$, ya que $V = (1/C)Q$ (figura 2.14). La gráfica representa la carga de un condensador inicialmente descargado ($V_o = 0$) hasta un voltaje final (V). El trabajo efectuado es equivalente a transferir la carga total, usando un voltaje promedio \bar{V} . Como el voltaje varía linealmente con la carga, el voltaje promedio es la mitad del voltaje final V :

$$\bar{V} = \frac{V_{\text{final}} + V_{\text{inicial}}}{2} = \frac{V + 0}{2} = \frac{V}{2}$$

Así, la energía almacenada en el condensador (igual al trabajo efectuado por la batería) es

$$U_C = W = Q\bar{V} = \frac{1}{2}QV$$

Como $Q = CV$, esta ecuación se puede escribir en varias formas equivalentes:

$$U_C = \frac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{energía almacenada en un condensador} \quad (2.13)$$

Por lo común, la forma $U_C = \frac{1}{2}CV^2$ es la más práctica, ya que usualmente la capacitancia y el voltaje son las cantidades conocidas. Una aplicación médica muy importante del condensador es en el *desfibrilador cardiaco*, analizado en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 16.8 ■ Condensadores al rescate: almacenamiento de energía en un desfibrilador cardiaco

Durante de un ataque cardiaco, el corazón late de manera errática llamada *fibrilación*. Una forma de lograr que el corazón vuelva a su ritmo normal es impartirle energía eléctrica suministrada por un instrumento llamado *desfibrilador cardiaco* (figura 2.15). Para producir el efecto deseado se requieren aproximadamente 300 J de energía. Típicamente, un desfibrilador almacena esta energía en un condensador cargado por una fuente de potencia de 5000 V . a) ¿Qué capacitancia se requiere? b) ¿Cuál es la carga en las placas del condensador?

Razonamiento. a) Para encontrar la capacitancia, determine C en la ecuación 2.13. b) La carga se obtiene entonces a partir de la definición de la capacitancia (ecuación 2.9).

Solución. Los datos son:

Dado: $U_C = 300 \text{ J}$ **Encuentre:** a) C (la capacitancia)
 $V = 5000 \text{ V}$ b) Q (carga en el condensador)

a) La forma más conveniente de la ecuación 2.13 es $U_C = \frac{1}{2}CV^2$. Despejando C , obtenemos

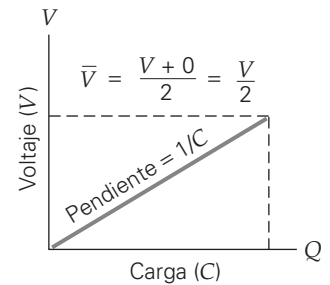
$$C = \frac{2U_C}{V^2} = \frac{2(300 \text{ J})}{(5000 \text{ V})^2} = 2.40 \times 10^{-5} \text{ F} = 24.0 \mu\text{F}$$

b) La carga (magnitud sobre cualquier placa) es entonces

$$Q = CV = (2.40 \times 10^{-5} \text{ F})(5000 \text{ V}) = 0.120 \text{ C}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la energía permisible máxima para cualquier intento de desfibrilación es de 750 J , ¿cuál será el voltaje máximo que debería usarse?

Algunas veces los condensadores pueden modelar con éxito fenómenos de la vida real. Por ejemplo, una tormenta puede considerarse como la descarga de una nube cargada negativamente hacia el suelo cargado positivamente, en efecto, un condensador "nube-suelo". Otra aplicación interesante del potencial eléctrico trata las membranas nerviosas como condensadores cilíndricos para ayudar a explicar la transmisión de señales nerviosas. (Véase A fondo 2.1 sobre el potencial eléctrico y la transmisión de señales nerviosas en la p. 50.)



▲ **FIGURA 2.14** Voltaje contra carga en un condensador Un diagrama de voltaje (V) contra carga (Q) para un condensador es una línea recta con pendiente $1/C$ (ya que $V = (1/C)Q$). El voltaje promedio es $\bar{V} = \frac{1}{2}V$, y el trabajo total efectuado es equivalente a transferir la carga a través de \bar{V} . Así, $U_C = W = Q\bar{V} = \frac{1}{2}QV$, el área bajo la curva (un triángulo).

Nota: No confunda U_C , la energía almacenada en un condensador, con ΔU_e , el cambio en energía potencial eléctrica de una partícula cargada. (Véase la sección 2.1.)

Nota: Practique usando las varias formas de la energía de un condensador. En un aprieto, usted necesita recordar sólo una, junto con la definición de capacitancia, $C = Q/V$.



▲ **FIGURA 2.15** Desfibrilador Una ráfaga de corriente eléctrica (flujo de carga) de un desfibrilador puede restaurar un latido normal en personas que han sufrido un paro cardiaco. Los condensadores almacenan la energía eléctrica de que depende el dispositivo.

A FONDO 2.1 POTENCIAL ELÉCTRICO Y TRANSMISIÓN DE SEÑALES NERVIOSAS

El sistema nervioso del cuerpo humano es responsable de nuestra recepción de los estímulos externos por medio de los sentidos (por ejemplo, el tacto). Los nervios también proporcionan comunicación entre el cerebro y los órganos y músculos. Si usted toca algo muy caliente, los nervios de la mano detectan el problema y envían una señal al cerebro. Éste a la vez envía la señal de “quítela” a través del sistema nervioso a la mano. Pero, ¿qué son estas señales y cómo funcionan?

Un nervio típico consiste en un haz de células nerviosas llamadas *neuronas*, dispuestas de manera parecida a como los alambres telefónicos se agrupan en un solo cable. La estructura de una neurona típica se muestra en la figura 1a. El cuerpo de la célula o *soma*, tiene ramificaciones llamadas *dendritas*, las cuales reciben la señal de entrada. El soma es responsable del procesamiento de la señal y de transmitirla al *axón*. En el otro extremo del axón hay proyecciones con salientes llamadas *terminales sinápticas*. En esas salientes, la señal eléctrica se transmite a otra

neurona a través de una brecha llamada *sinapsis*. El cuerpo humano contiene alrededor de 10 mil millones de neuronas y cada neurona puede tener varios cientos de sinapsis! Hacer funcionar el sistema nervioso cuesta al cuerpo humano aproximadamente 25% de su toma de energía cada día.

Para entender la naturaleza eléctrica de la transmisión de señales nerviosas, consideremos el axón. Una componente vital del axón es su membrana celular, la cual normalmente tiene alrededor de 10 nm de espesor y consiste en *fosfolípidos* (moléculas de hidrocarburo polarizadas) y en moléculas de proteínas (figura 1b). La membrana tiene proteínas llamadas *canales iónicos*, que forman poros y donde grandes moléculas de proteínas regulan el flujo de los iones (principalmente de sodio) a través de la membrana. La clave de la transmisión de señales nerviosas es que esos canales iónicos son selectivos: permiten sólo a ciertos tipos de iones cruzar la membrana; a otros no.

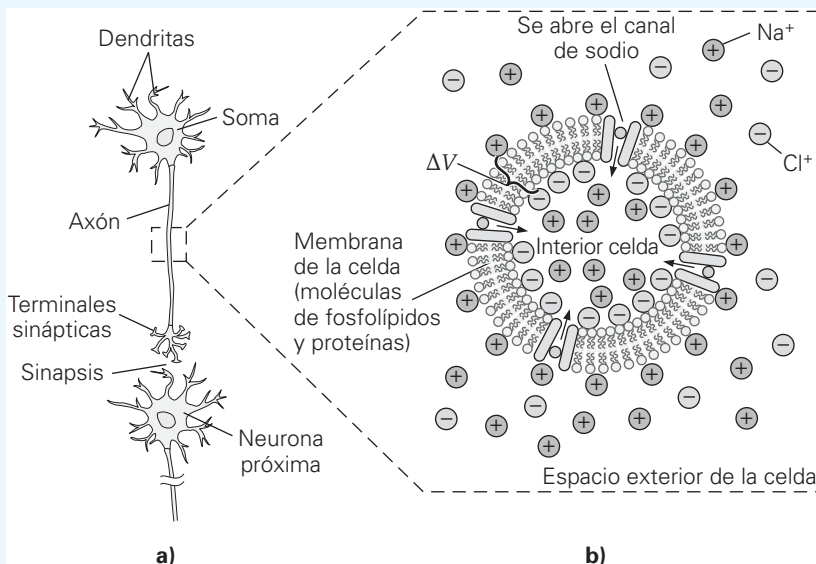


FIGURA 1 a) La estructura de una neurona típica. b) Una ampliación de la membrana del axón que muestra la membrana (aproximadamente 10 nm de espesor) y la concentración de iones dentro y fuera de la célula. La polarización de la carga a través de la membrana conduce a un voltaje, o potencial de membrana. Cuando un estímulo externo los dispara, los canales de iones de sodio se abren, permitiendo la entrada de iones de sodio en la célula. Esta afluencia cambia el potencial de la membrana.

2.4 Dieléctricos

OBJETIVOS: Entender a) qué es un dieléctrico y b) cómo afecta las propiedades físicas de un condensador.

En la mayoría de los condensadores, una hoja de material aislante, como el papel o el plástico, se coloca entre las placas. Un material aislante, llamado **dieléctrico**, sirve para varios propósitos. Uno de ellos es impedir que las placas entren en contacto y este contacto permitiría a los electrones fluir de regreso hacia la placa positiva, neutralizando así la carga sobre el condensador y la energía almacenada. Un dieléctrico también permite que placas flexibles de hoja metálica se enrollen en un cilindro, dando al condensador un tamaño más compacto (y por ello más práctico). Finalmente, un dieléctrico aumenta la capacidad de almacenamiento de carga del condensador y, por lo tanto, bajo las condiciones correctas, la energía almacenada en el condensador. Tal capacidad depende del tipo de material y está caracterizada por la **constante dieléctrica** (κ). Los valores de la constante dieléctrica para algunos materiales comunes se presentan en la tabla 2.2.

El fluido fuera del axón, aunque eléctricamente neutro, contiene iones de sodio (Na^+) y iones de cloro (Cl^-) en solución. En cambio, el fluido interno del axón es rico en iones de potasio (K^+) y moléculas de proteínas cargadas negativamente. Si no fuera por la naturaleza selectiva de la membrana de la celda, la concentración de Na^+ sería igual en ambos lados de la membrana. Bajo condiciones normales (o *de reposo*), resulta difícil para los iones Na^+ penetrar el interior de la celda nerviosa. Este proceso da lugar a una polarización de la carga a través de la membrana. El exterior es positivo (con el Na^+ tratando de entrar a la región de menor concentración), que atrae las proteínas negativas a la superficie interior de la membrana (figura 1b). Así, existe un sistema de almacenamiento de carga tipo condensador cilíndrico, a través de una membrana de axón cuando está en reposo. El *potencial de membrana en reposo* (el voltaje a través de la membrana) se define como $\Delta V = V_{\text{dentro}} - V_{\text{fuera}}$. Como el exterior está cargado positivamente, el potencial en reposo es una cantidad negativa y varía de aproximadamente -40 a -90 mV (milivolts), con un valor típico de -70 mV en seres humanos.

La conducción de la señal tiene lugar cuando la membrana de la celda recibe un estímulo de las dendritas. Sólo entonces cambia el potencial de la membrana, y este cambio se propaga por el axón. El estímulo ocasiona que los canales Na^+ en la membrana (cerrados cuando está en reposo, como una compuerta) se abran y permitan temporalmente que los iones de sodio entren a la celda (figura 1b). Esos iones positivos son atraídos a la capa de carga negativa en el interior y son conducidos por la diferencia en la concentración. En aproximadamente 0.001 s, suficientes iones de sodio han pasado por el canal de compuerta para causar una inversión de la polaridad, y entonces se eleva el potencial de la membrana, típicamente a $+30$ mV en seres humanos. Esta secuencia de tiempo para el cambio en el potencial de la membrana se muestra en la figura 2. Cuando la diferencia en la concentración de Na^+ hace que el voltaje de la membrana se vuelva positivo, y se cierran las compuertas de sodio. Un proceso químico conocido como *bombeo molecular Na/K-ATPase* reestablece después el potencial de reposo a -70 mV por transporte selectivo del exceso de Na^+ al exterior de la celda.

Esta variación en el potencial de la membrana (un total de 100 mV, de -70 mV a $+30$ mV) se llama *potencial de acción* de la celda. Este potencial de acción es la señal de que se transmite realmente por el axón. La “onda” de voltaje viaja con rapidez de 1 a 100 m/s en su camino a disparar otra pulsación en la neurona adyacente. Esta rapidez, junto con otros factores como las demoras de tiempo en la región sináptica, es responsable de los tiempos normales de reacción humana que suman unas cuantas décimas de segundo.

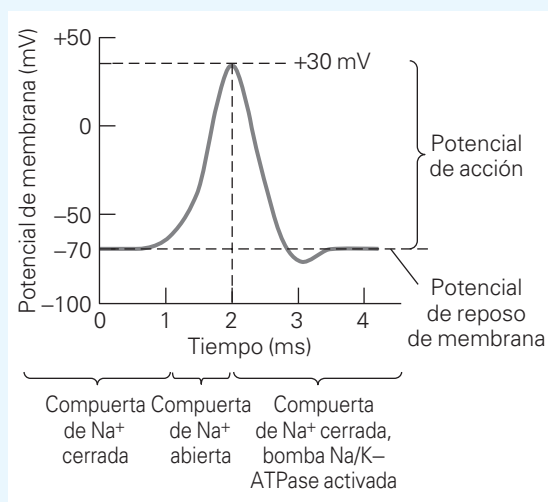
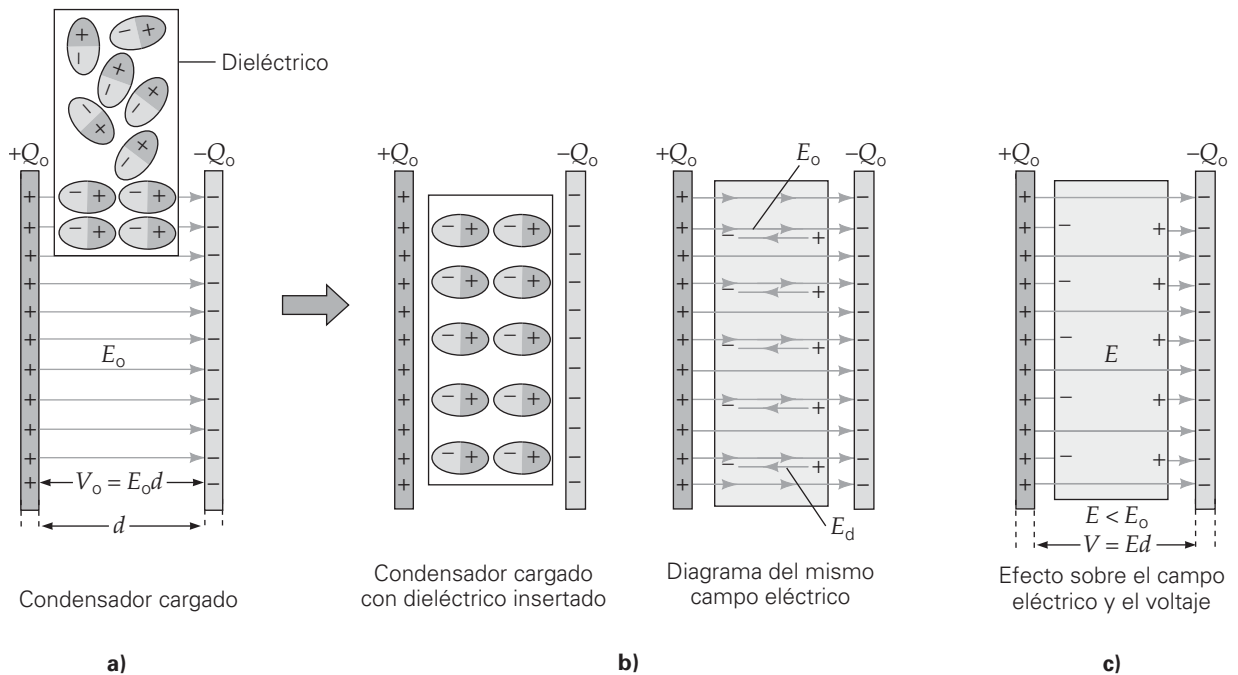


FIGURA 2 Cuando los canales de sodio se abren como compuertas y los iones de sodio se precipitan al interior de la celda, el potencial de membrana cambia rápidamente de su valor de reposo de -70 mV a cerca de $+30$ mV. El potencial de reposo se restaura (aproximadamente 4 ms después) mediante un proceso de “bombeo” de proteínas, que remueve químicamente el exceso de Na^+ después de que se cierran las compuertas de sodio (en 2 ms).

TABLA 2.2 Constantes dieléctricas para algunos materiales

| Material | Constante dieléctrica (κ) | Material | Constante dieléctrica (κ) |
|--------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Vacío | 1.0000 | Vidrio (rango) | 3–7 |
| Aire | 1.00059 | Vidrio Pyrex | 5.6 |
| Papel | 3.7 | Baquelita | 4.9 |
| Polietileno | 2.3 | Aceite de silicio | 2.6 |
| Poliestireno | 2.6 | Agua | 80 |
| Teflón | 2.1 | Titanato de estroncio | 233 |

La forma en que un dieléctrico afecta las propiedades eléctricas de un condensador se muestra en la figura 2.16. El condensador se carga plenamente (generando un campo \vec{E}_0) y se desconecta de la batería, después de lo cual se inserta un dieléctrico (figura 2.16a). En el material dieléctrico, el trabajo es efectuado sobre dipolos molecu-



▲ FIGURA 2.16 Los efectos de un dieléctrico sobre un condensador aislado *a*) Un material dieléctrico con dipolos moleculares permanentes orientados al azar (o dipolos inducidos por el campo eléctrico) se inserta entre las placas de un condensador cargado aislado. Conforme se inserta el dieléctrico, el condensador tiende a jalarlo hacia adentro, efectuando así trabajo sobre él. (Observe las fuerzas de atracción entre las cargas de las placas y aquellas inducidas sobre las superficies dieléctricas.) *b*) Cuando el material está en el campo eléctrico del condensador, los dipolos se orientan a sí mismos con el campo, dando lugar a un campo eléctrico opuesto \vec{E}_d . *c*) El campo dipolar cancela parcialmente el campo debido a las cargas de las placas. El efecto neto es una disminución tanto en el campo eléctrico como en el voltaje. Puesto que la carga almacenada permanece igual, aumenta la capacitancia.

lares por el campo eléctrico existente, alineándolos con ese campo (figura 2.16b). (La polarización molecular puede ser permanente o temporalmente inducida por el campo eléctrico. En cualquier caso, el efecto es el mismo.) El trabajo también se efectúa sobre la placa dieléctrica en su conjunto, ya que las placas cargadas la jalan al espacio entre ellas.

El resultado es que el dieléctrico genera un campo eléctrico “inverso” (\vec{E}_d en la figura 2.16c) que cancela parcialmente el campo entre las placas. Esto significa que se reduce el campo *neto* (\vec{E}) entre las placas y, por lo tanto, también el voltaje a través de las placas (ya que $V = Ed$). La constante dieléctrica κ del material se define como la razón del voltaje con el material en posición (V) al voltaje en vacío (V_0). Como V es proporcional a E , esta razón es la misma que la razón de campo eléctrico:

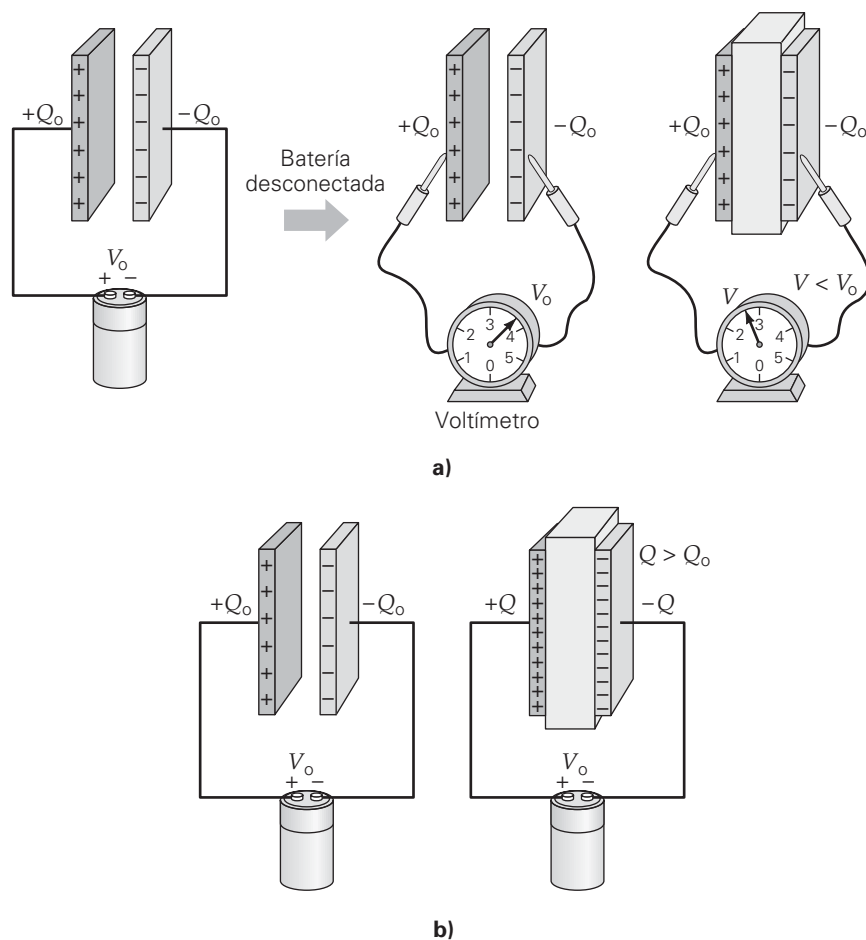
$$\kappa = \frac{V_0}{V} = \frac{E_0}{E} \quad (\text{sólo cuando es constante la carga del condensador}) \quad (2.14)$$

Nota: la ecuación 2.14 sólo es válida si la batería está desconectada.

Observe que κ no tiene dimensiones y es mayor que 1, ya que $V < V_0$. De la ecuación 2.14, sabemos que una manera de determinar la constante dieléctrica es midiendo los dos voltajes. (Los voltímetros se estudian con detalle en el capítulo 4.) Como la batería estaba desconectada, y el condensador aislado, no se afecta la carga sobre las placas, Q_0 . Puesto que $V = V_0/\kappa$, el valor de la capacitancia con el dieléctrico insertado es mayor que el valor en vacío por un factor de κ . En efecto, ahora se almacena la misma cantidad de carga a un menor voltaje, y el resultado es un incremento en capacitancia. Para entender este efecto, aplique la definición de capacitancia:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q_0}{(V_0/\kappa)} = \kappa \left(\frac{Q_0}{V_0} \right) \quad \text{o} \quad C = \kappa C_0 \quad (2.15)$$

De manera que al insertar un dieléctrico en un condensador aislado se obtiene una mayor capacitancia. Pero, ¿qué sucede con el almacenamiento de energía? Como no hay entrada de energía (se desconectó la batería) y el condensador efectúa trabajo so-



◀ **FIGURA 2.17** Dieléctricos y capacitancia a) Un condensador de placas paralelas en aire (sin dieléctrico) se carga con una batería a una carga Q_0 y un voltaje V_0 (izquierda). Si se desconecta la batería y el potencial a través del condensador se mide con un voltímetro, se obtiene una lectura de V_0 (centro). Pero si ahora se inserta un dieléctrico entre las placas del condensador, el voltaje cae a $V = V_0/\kappa$ (derecha), por lo disminuye que la energía almacenada. (¿Puede estimar la constante dieléctrica de las lecturas del voltaje?) b) Se carga un condensador como en el inciso a, pero se deja conectada la batería. Cuando se inserta un dieléctrico en el condensador, el voltaje se mantiene en V_0 . (¿Por qué?) Sin embargo, la carga sobre las placas aumenta a $Q = \kappa Q_0$. Por lo tanto, ahora se almacena más energía en el condensador. En ambos casos, la capacitancia aumenta por un factor de κ .

bre el dieléctrico jalándolo a la región entre las placas, la energía almacenada *cae* por un factor de κ (▲ figura 2.17a), como lo muestra la siguiente ecuación:

$$U_C = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q_0^2}{2\kappa C_0} = \frac{Q_0^2/2C_0}{\kappa} = \frac{U_0}{\kappa} < U_0 \quad (\text{batería desconectada})$$

Sin embargo, ocurre una situación diferente si se inserta el dieléctrico y la batería permanece conectada. En este caso, se mantiene el voltaje original y la batería es capaz de suministrar (bombear) más carga y, por ende, efectuar trabajo (figura 2.17b). Como la batería efectúa trabajo adicional, esperamos que aumente la energía almacenada en el condensador. Con la batería aún conectada, la carga sobre las placas *aumenta* por un factor κ , o bien, $Q = \kappa Q_0$. De nuevo, aumenta la capacitancia, pero ahora debido a que se almacena más carga bajo el mismo voltaje. De la definición de capacitancia, el resultado es el mismo que el dado por la ecuación 2.15, ya que $C = Q/V = \kappa Q_0/V_0 = \kappa(Q_0/V_0) = \kappa C_0$. Así,

el efecto de un dieléctrico es incrementar la capacitancia por un factor κ independientemente de las condiciones bajo las cuales se inserte el dieléctrico.

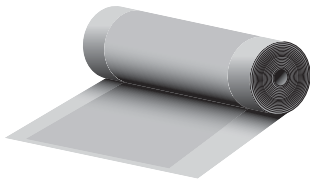
En el caso de un condensador mantenido a voltaje constante, aumenta el almacenamiento de energía del condensador a expensas de la batería. Para ver esto, calculemos la energía con el dieléctrico en posición bajo tales condiciones:

$$U_C = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\kappa C_0 V_0^2 = \kappa \left(\frac{1}{2}C_0 V_0^2\right) = \kappa U_0 > U_0 \quad (\text{batería conectada})$$

Para un condensador de placas paralelas con un dieléctrico, la capacitancia se incrementa sobre su valor (en aire) en la ecuación 2.12, por un factor de κ :

$$C = \kappa C_0 = \frac{\kappa \epsilon_0 A}{d} \quad (\text{sólo placas paralelas}) \quad (2.16)$$

Esta relación a veces se escribe como $C = \epsilon A/d$, donde $\epsilon = \kappa \epsilon_0$ se llama **permisividad dieléctrica** del material, que siempre mayor es que ϵ_0 . (¿Cómo se sabe esto?)



a)



b)

▲ **FIGURA 2.18** Condensadores en uso *a)* El material dieléctrico entre las placas del condensador permite que las placas se construyan de manera que queden muy cerca entre sí, aumentando la capacitancia. Además, las placas pueden enrollarse en un condensador compacto más práctico. *b)* Condensadores entre otros elementos de circuitos de una microcomputadora.

► **FIGURA 2.19** Condensadores en uso Los condensadores se utilizan para convertir movimiento en señales eléctricas que pueden medirse y analizarse usando una computadora. Conforme la distancia entre las placas cambia, también lo hace la capacitancia, lo cual causa un cambio en la carga sobre el condensador. Algunos teclados de computadora operan de esta manera, así como otros instrumentos, por ejemplo, los sismógrafos. (capítulo 11 de *Física 11*.) Véase el ejemplo 2.9.

Una imagen del interior de un condensador cilíndrico típico y una variedad de condensadores reales se muestran en la figura 2.18. Los cambios en capacitancia sirven para monitorear el movimiento en nuestro mundo tecnológico, como veremos en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 2.9 ■ El condensador como un detector de movimiento: teclados de computadora

Considere un condensador (con dieléctrico) bajo la tecla de una computadora (▼ figura 16.19). El condensador está conectado a una batería de 12.0 volts y tiene una separación normal de placas (sin oprimir) de 3.00 mm y una área de placa de 0.750 cm². *a)* ¿Cuál será la constante del dieléctrico que se requiere si la capacitancia es 1.10 pF? *b)* ¿Cuánta carga se almacena en las placas bajo condiciones normales? *c)* ¿Cuánta carga fluye sobre las placas (es decir, cuál es el cambio en sus cargas), si se comprimen hasta una separación de 2.00 mm?

Razonamiento. *a)* La capacitancia de placas llenas de aire puede encontrarse con la ecuación 2.12, y luego puede determinarse la constante dieléctrica con la ecuación 2.15. *b)* La carga resulta de la ecuación 2.9. *c)* Debe usarse la distancia de separación de placas comprimidas para volver a calcular la capacitancia. Entonces, la nueva carga se encuentra como en el inciso *b)*.

Solución. Los datos son los siguientes:

Dado: $V = 12.0 \text{ V}$
 $d = 3.00 \text{ mm} = 3.00 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $A = 0.750 \text{ cm}^2 = 7.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
 $C = 1.10 \text{ pF} = 1.10 \times 10^{-12} \text{ F}$
 $d' = 2.00 \text{ mm} = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

Encuentre: *a)* κ (constante dieléctrica)
b) Q (carga inicial del condensador)
c) ΔQ (cambio en la carga del condensador)

a) De la ecuación 2.12, la capacitancia, si las placas estuvieran separadas por aire, sería

$$C_o = \frac{\epsilon_o A}{d} = \frac{(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(7.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{3.00 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.21 \times 10^{-13} \text{ F}$$

Como el dieléctrico aumenta la capacitancia, su valor es

$$\kappa = \frac{C}{C_o} = \frac{1.10 \times 10^{-12} \text{ F}}{2.21 \times 10^{-13} \text{ F}} = 4.98$$

b) La carga inicial es entonces

$$Q = CV = (1.10 \times 10^{-12} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 1.32 \times 10^{-11} \text{ C}$$

c) Bajo condiciones de compresión, la capacitancia es

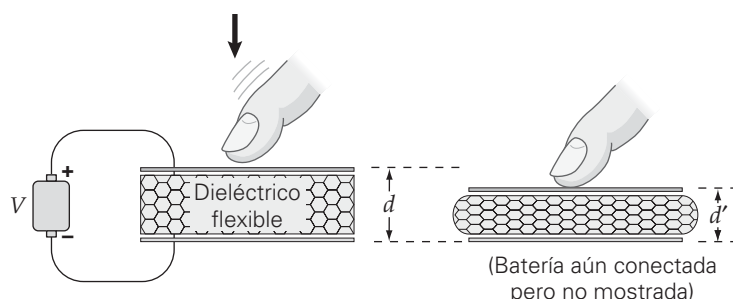
$$C' = \frac{\kappa \epsilon_o A}{d'} = \frac{(4.98)(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(7.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2)}{2.00 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1.65 \times 10^{-12} \text{ F}$$

El voltaje permanece igual, $Q' = C'V = (1.65 \times 10^{-12} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 1.98 \times 10^{-11} \text{ C}$. Como aumentó la capacitancia, la carga se incrementó en

$$\Delta Q = Q' - Q = (1.98 \times 10^{-11} \text{ C}) - (1.32 \times 10^{-11} \text{ C}) = +6.60 \times 10^{-12} \text{ C}$$

Al oprimir la tecla, una carga, cuya magnitud está relacionada con el desplazamiento, fluye al condensador dando una forma de medir eléctricamente el movimiento.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que la separación entre las placas se incrementó 1.00 mm del valor normal de 3.00 mm. ¿La carga fluiría hacia el condensador o desde éste? ¿Cuánta carga será la que fluya?



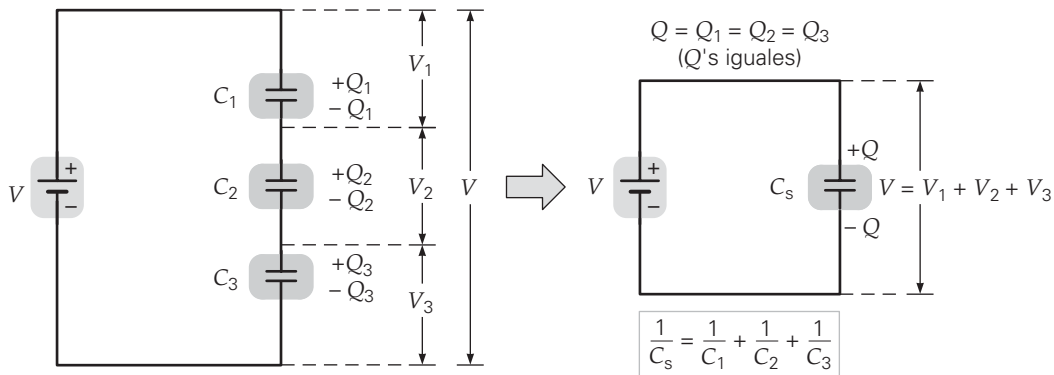
2.5 Condensadores en serie y en paralelo

OBJETIVOS: a) Encontrar la capacitancia equivalente de condensadores conectados en serie y en paralelo, b) calcular las cargas, los voltajes y el almacenamiento de energía de condensadores individuales en configuraciones en serie y en paralelo y c) analizar redes de condensadores que incluyan arreglos tanto en serie como en paralelo.

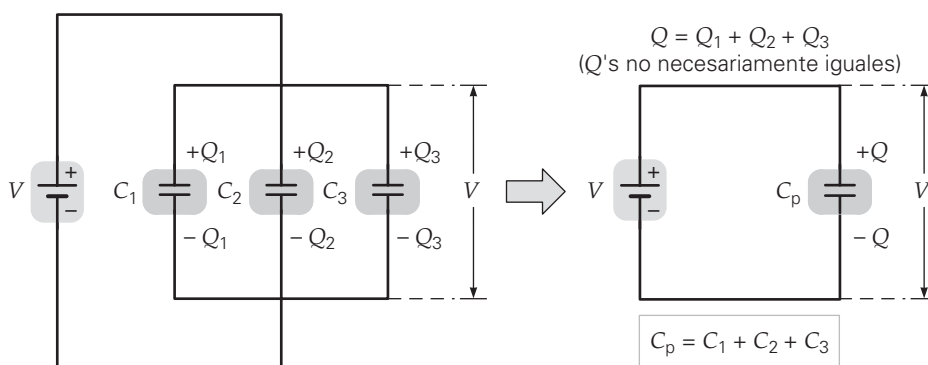
Los condensadores se conectan de dos formas básicas: *en serie* o *en paralelo*. En serie, los condensadores están conectados cabeza a cola (▼ figura 2.20a). Cuando están conectados en paralelo, todos los conductores a un lado de los condensadores tienen una conexión común. (Piense que todas las “colas” están conectadas juntas y que todas las “cabezas” están también conectadas juntas; figura 2.20b.)

Nota: Para los llamados condensadores de placas paralelas con dieléctrico intercalado, no hay distinción de cabeza o cola entre los conductores. Algunos tipos de condensadores tienen lados particulares positivos y negativos, y por ende debe hacerse la distinción.

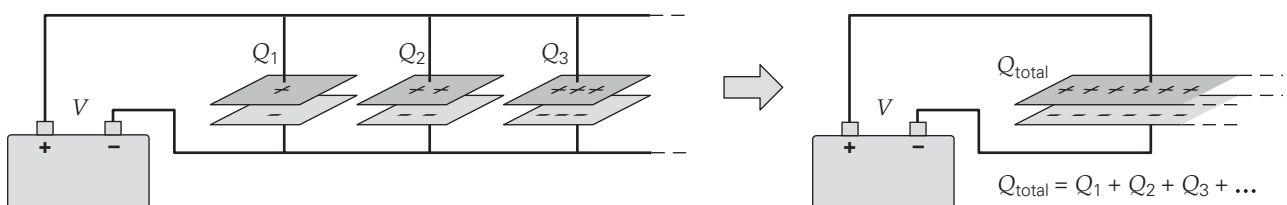
▼ **FIGURA 2.20** Condensadores en serie y en paralelo a) Todos los condensadores conectados en serie tienen la misma carga, y la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje de la batería. La capacitancia total en serie es equivalente al valor de C_s . b) Cuando los condensadores están conectados en paralelo, las caídas de voltaje a través de los condensadores son las mismas, y la carga total es igual a la suma de las cargas sobre los condensadores individuales. La capacitancia total en paralelo es equivalente al valor de C_p . c) En una conexión en paralelo, pensar en las placas facilita ver por qué la carga total es la suma de las cargas individuales. En efecto, este arreglo representa un condensador con dos placas grandes.



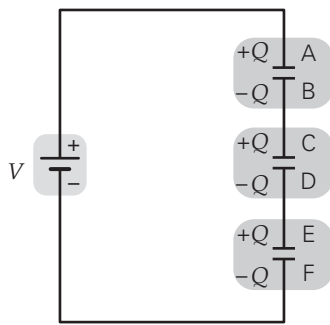
a) Condensadores en serie



b) Condensadores en paralelo



c) Condensadores en paralelo



▲ FIGURA 2.21 Cargas sobre condensadores en serie

Las placas B y C juntas tenían carga neta cero al principio. Cuando la batería colocó $+Q$ en la placa A, se indujo la carga $-Q$ en B; entonces, C debió adquirir $+Q$ para que la combinación BC permaneciera neutral. Continuando de esta manera por el arreglo, vemos que todas las cargas deben de igual magnitud.

Condensadores en serie

Cuando los condensadores están conectados en serie, la carga Q debe ser la misma en todas las placas:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots$$

Para saber por qué esto es así, examine la figura 2.21. Observe que sólo las placas A y F están realmente conectadas a la batería. Como las placas B y C están aisladas, la carga total sobre ellas siempre debe ser cero. Así, cuando la batería pone una carga de $+Q$ sobre la placa A, entonces $-Q$ se induce sobre B a expensas de la placa C, que adquiere una carga $+Q$. Esta carga a la vez induce $-Q$ sobre D, y así sucesivamente, hacia abajo por la línea.

Como hemos visto, la “caída de voltaje” es sólo otro nombre para el “cambio en energía potencial eléctrica por carga unitaria”. Así, cuando sumamos todas las caídas de voltaje en condensadores en serie (véase la figura 2.20a), debemos obtener el mismo valor que el voltaje a través de las terminales de la batería. Así, la suma de las caídas de voltaje individuales a través de todos los condensadores es igual al voltaje de la fuente:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

La **capacitancia equivalente en serie**, C_s , se define como el valor de un solo condensador que podría reemplazar la combinación en serie y almacenar la misma carga al mismo voltaje. Como la combinación de condensadores almacena una carga de Q a un voltaje de V , se infiere que $C_s = Q/V$ o $V = Q/C_s$. Sin embargo, los voltajes individuales están relacionados con las cargas individuales por $V_1 = Q/C_1$, $V_2 = Q/C_2$, $V_3 = Q/C_3$, y así sucesivamente.

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación del voltaje, tenemos

$$\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots$$

Cancelando las Q comunes,

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad \text{capacitancia equivalente en serie} \quad (2.17)$$

Esta relación implica que el valor de C_s siempre es menor que la capacitancia más pequeña en la combinación en serie. Por ejemplo, pruebe la ecuación 2.17 con $C_1 = 1.0 \mu\text{F}$ y $C_2 = 2.0 \mu\text{F}$. Usted debería demostrar que $C_s = 0.67 \mu\text{F}$, lo cual es menor que $1.0 \mu\text{F}$ (la prueba general se le deja como ejercicio). Físicamente, el razonamiento es el siguiente: como todos los condensadores en serie tienen la misma carga, la carga almacenada por este arreglo es $Q = C_i V_i$ (donde el subíndice i se refiere a *cualquiera* de los condensadores individuales en la cadena). Como $V_i < V$, el arreglo en serie almacena menos carga que cualquier condensador individual conectado por sí mismo a la misma batería.

Tiene sentido que en serie la capacitancia más pequeña reciba el voltaje más grande. Un valor pequeño de C significa menos carga almacenada por volt. Para que la carga sobre todos los condensadores sea la misma, cuanto menor sea el valor de la capacitancia, mayor será la fracción del voltaje total requerido ($Q = CV$).

Condensadores en paralelo

Con un arreglo en paralelo (figura 2.20b), los voltajes a través de los condensadores son los mismos (¿por qué?), y cada voltaje individual es igual al de la batería:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$$

La carga total es la suma de las cargas sobre cada condensador (figura 2.20c):

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

Esperamos que la capacitancia equivalente en paralelo sea mayor que la capacitancia más grande, porque se puede almacenar más carga por volt de esta manera que si cualquier condensador se conectara a la batería por sí solo. Las cargas individuales están dadas por $Q_1 = C_1 V$, $Q_2 = C_2 V$, y así sucesivamente. Un condensador con la **capacitancia equivalente en paralelo**, C_p , tendría esta misma carga total

que conectado a la batería, por lo que $C_p = Q_{\text{total}}/V$ o $Q_{\text{total}} = C_p V$. Sustituyendo esas expresiones en la ecuación anterior, tenemos

$$C_p V = C_1 V + C_2 V + C_3 V + \dots$$

y, cancelando la V común, obtenemos

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \text{capacitancia equivalente en paralelo} \quad (2.18)$$

Así, en el caso en paralelo, la capacitancia equivalente C_p es la suma de las capacitancias individuales. En este caso, la capacitancia equivalente es mayor que la capacitancia individual más grande. Como los condensadores en paralelo tienen el mismo voltaje, la capacitancia más grande almacenará la mayor cantidad de carga. Como una comparación de condensadores en serie y en paralelo, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 2.10 ■ Carga sin tarjeta de crédito: condensadores en serie y en paralelo

Dados dos condensadores, uno con una capacitancia de $2.50 \mu\text{F}$ y el otro de $5.00 \mu\text{F}$, ¿cuáles serán las cargas en cada uno y la carga total almacenada si están conectados a través de una batería de 12.0 volts a) en serie y b) en paralelo?

Razonamiento. a) Los condensadores en serie tienen la misma carga. La ecuación 2.17 nos permite encontrar la capacitancia equivalente y, de ahí, la carga sobre cada condensador. b) Los condensadores en paralelo tienen el mismo voltaje; entonces, la carga de cada uno se puede determinar fácilmente, pues se conocen sus capacitancias individuales.

Solución. Tenemos lo siguiente:

Dado: $C_1 = 2.50 \mu\text{F} = 2.50 \times 10^{-6} \text{ F}$ **Encuentre:** a) Q en cada condensador en serie y Q_{total} (carga total)
 $C_2 = 5.00 \mu\text{F} = 5.00 \times 10^{-6} \text{ F}$ b) Q en cada condensador en paralelo y Q_{total} (carga total)
 $V = 12.0 \text{ V}$

a) En serie, la capacitancia (equivalente) total es:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{2.50 \times 10^{-6} \text{ F}} + \frac{1}{5.00 \times 10^{-6} \text{ F}} = \frac{3}{5.00 \times 10^{-6} \text{ F}}$$

por lo que

$$C_s = 1.67 \times 10^{-6} \text{ F}$$

(Note que C_s es menor que la capacitancia más pequeña en la cadena en serie, como se esperaba.)

Como la carga sobre cada condensador es la misma en serie (y la misma que el total),

$$Q_{\text{total}} = Q_1 = Q_2 = C_s V = (1.67 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 2.00 \times 10^{-5} \text{ C}$$

b) Aquí, usamos la relación de capacitancia paralela equivalente:

$$C_p = C_1 + C_2 = 2.50 \times 10^{-6} \text{ F} + 5.00 \times 10^{-6} \text{ F} = 7.50 \times 10^{-6} \text{ F}$$

(Este resultado es razonable porque es mayor que el valor individual más grande en el arreglo paralelo.)

Por lo tanto,

$$Q_{\text{total}} = C_p V = (7.50 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 9.00 \times 10^{-5} \text{ C}$$

En paralelo, cada condensador tiene los 12.0 V completos a través de él; por lo tanto,

$$Q_1 = C_1 V = (2.50 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 3.00 \times 10^{-5} \text{ C}$$

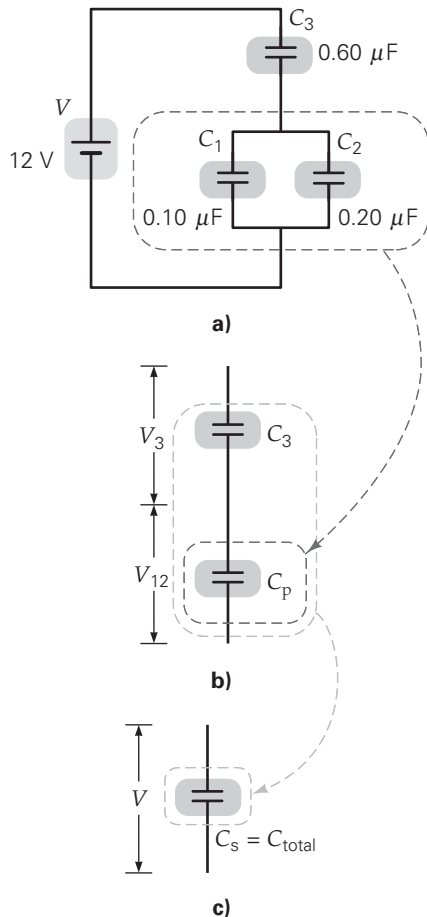
$$Q_2 = C_2 V = (5.00 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 6.00 \times 10^{-5} \text{ C}$$

Como una doble revisión final, observe que la carga almacenada total es igual a la suma de las cargas sobre ambos condensadores.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, determine qué combinación, en serie o en paralelo, almacena más energía.

Los arreglos de condensadores típicamente implican conexiones tanto en serie como en paralelo (véase el siguiente ejemplo). En esta situación, usted simplifica el circuito, usando las expresiones para la capacitancia equivalente en paralelo y en serie, hasta que termina con una sola capacitancia equivalente total. Para encontrar los resultados para cada condensador individual, usted procede hacia atrás hasta que obtiene el arreglo original.

Ejemplo 2.11 ■ Un paso a la vez: combinación de condensadores en serie y en paralelo



▲ **FIGURA 2.22 Reducción de circuito** Al combinar las capacitancias, la combinación de condensadores se reduce a una sola capacitancia equivalente. Véase el ejemplo 2.11.

Tres condensadores están conectados en un circuito como se muestra en la figura 2.22a. ¿Cuál es el voltaje a través de cada condensador?

Razonamiento. El voltaje a través de cada condensador podría encontrarse de $V = Q/C$, si se conoce la carga sobre cada condensador. La carga total sobre los condensadores se encuentra reduciendo la combinación serie-paralelo a una sola capacitancia equivalente. Dos de los condensadores están en paralelo. Su sola capacitancia equivalente (C_p) está en serie con el último condensador, un hecho que permite encontrar la capacitancia total. Procediendo hacia atrás podremos encontrar el voltaje a través de cada condensador.

Solución.

Dado: Valores de la capacitancia y el voltaje de la figura

Encuentre: V_1 , V_2 y V_3 (voltajes a través de los condensadores)

Comenzando con la combinación en paralelo, tenemos

$$C_p = C_1 + C_2 = 0.10 \mu\text{F} + 0.20 \mu\text{F} = 0.30 \mu\text{F}$$

Ahora el arreglo está parcialmente reducido, como se muestra en la figura 2.22b. A continuación, considerando C_p en serie con C_3 , podemos encontrar la capacitancia equivalente total del arreglo original:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_p} = \frac{1}{0.60 \mu\text{F}} + \frac{1}{0.30 \mu\text{F}} = \frac{1}{0.60 \mu\text{F}} + \frac{2}{0.60 \mu\text{F}} = \frac{1}{0.20 \mu\text{F}}$$

Por lo tanto,

$$C_s = 0.20 \mu\text{F} = 2.0 \times 10^{-7} \text{F}$$

Ésta es la capacitancia equivalente total del arreglo (figura 2.22c). Tratando el problema como si fuera para un solo condensador, estimamos la carga sobre esa capacitancia equivalente:

$$Q = C_s V = (2.0 \times 10^{-7} \text{F})(12 \text{V}) = 2.4 \times 10^{-6} \text{C}$$

Ésta es la carga sobre C_3 y C_p , ya que están en serie. Podemos usar esto para calcular el voltaje a través de C_3 :

$$V_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{2.4 \times 10^{-6} \text{C}}{6.0 \times 10^{-7} \text{F}} = 4.0 \text{V}$$

La suma de los voltajes a través de los condensadores es igual al voltaje a través de las terminales de la batería. Los voltajes a través de C_1 y C_2 son los mismos porque están en paralelo. Como el voltaje a través de C_1 (o C_2) más el voltaje a través de C_3 es igual al voltaje total (el voltaje de la batería), escribimos $V = V_{12} + V_3 = 12 \text{V}$. (Véase la figura 2.22a.) Aquí, V_{12} representa el voltaje a través de C_1 o de C_2 . Despejando V_{12} ,

$$V_{12} = V - V_3 = 12 \text{V} - 4.0 \text{V} = 8.0 \text{V}$$

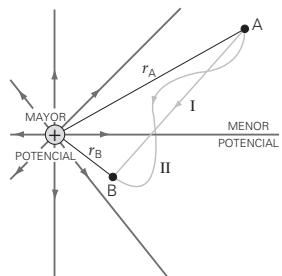
Note que C_p es menor que C_3 . Como C_p y C_3 están en serie, se infiere que C_p (y por lo tanto C_1 y C_2) tienen la mayoría del voltaje.

Ejercicio de reforzamiento. En este ejemplo, encuentre a) la carga almacenada en cada condensador y b) la energía almacenada en cada uno.

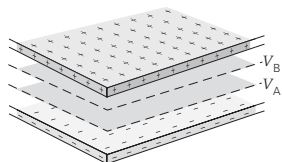
Repaso del capítulo

- Las **diferencia de potencial eléctrico** (o **voltaje**) entre dos puntos es el trabajo hecho por una carga unitaria positiva entre esos dos puntos, o la carga en energía potencial eléctrica por carga unitaria positiva. Expresada en forma de ecuación, esta relación es

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_+} = \frac{W}{q_+} \quad (2.1)$$



- Las **superficies equipotenciales** (superficies de potencial eléctrico constante, también llamadas **equipotenciales**) son superficies sobre las cuales una carga tiene una energía potencial eléctrica constante. En todas partes esas superficies son perpendiculares al campo eléctrico.

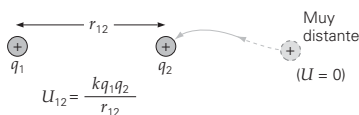


- La expresión para el **potencial eléctrico debido a una carga puntual** (eligiendo $V = 0$ en $r = \infty$) es

$$V = \frac{kq}{r} \quad (2.4)$$

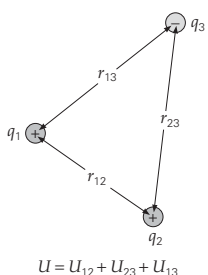
- La **energía potencial eléctrica para un par de cargas puntuales** está dada por (eligiendo $U = 0$ en $r = \infty$)

$$U_{12} = \frac{kq_1q_2}{r_{12}} \quad (2.5)$$



- La **energía potencial eléctrica de una configuración de más de dos cargas puntuales** está dada por una suma de términos de pares de cargas puntuales de la ecuación 2.5:

$$U_{\text{total}} = U_{12} + U_{23} + U_{13} + \dots \quad (2.6)$$

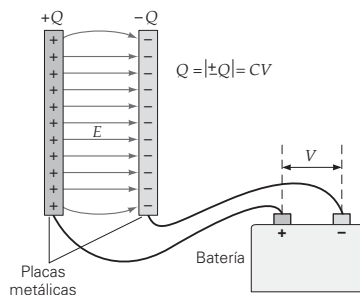


- El campo eléctrico está relacionado con qué rápidamente cambia el potencial eléctrico con la distancia. El campo eléctrico (\vec{E}) señala en la dirección de la disminución más rápido en potencial eléctrico (V). La magnitud del campo eléctrico (E) es la razón de cambio del potencial con la distancia, o bien,

$$E = \left| \frac{\Delta V}{\Delta x} \right|_{\text{máx}} \quad (2.8)$$

- El **electrón volt (eV)** es la energía cinética ganada por un electrón o un protón acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 volt.
- Un **condensador** es cualquier arreglo de dos placas metálicas. Los condensadores almacenan carga sobre sus placas y, por ello, energía eléctrica.
- La **capacitancia** es una medida cuantitativa de qué tan efectivo es un condensador en almacenar carga. Se define como la magnitud de la carga almacenada en cualquier placa por volt, o bien,

$$Q = CV \quad \text{o} \quad C = \frac{Q}{V} \quad (2.9)$$



- La **capacitancia de un condensador de placas paralelas** (en aire) es

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.12)$$

donde $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ se llama **permisividad del espacio libre**.

- La **energía almacenada en un condensador** depende de la capacitancia del condensador y de la cantidad de carga que el condensador almacena (o, de manera equivalente, el voltaje a través de sus placas). Hay tres expresiones equivalentes para esta energía:

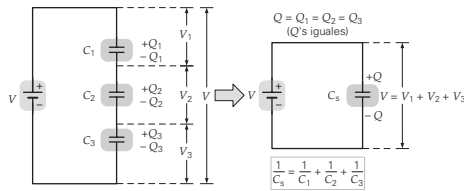
$$U_C = \frac{1}{2}QV = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.13)$$

- Un **dieléctrico** es un material no conductor que incrementa el valor de la capacitancia.
- La **constante dieléctrica κ** describe el efecto de un dieléctrico sobre la capacitancia. Un dieléctrico aumenta la capacitancia del condensador sobre su valor con aire entre las placas, por un factor de κ

$$C = \kappa C_0 \quad (2.15)$$

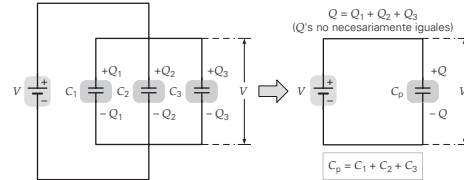
- Los condensadores conectados en serie son equivalentes a un condensador, con una capacitancia llamada **capacitancia equivalente en serie** C_s . En serie, todos los condensadores tienen la misma carga. La capacitancia equivalente en serie es

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (2.17)$$



- Cuando los condensadores están conectados en paralelo, pueden considerarse equivalentes a un condensador, con una capacitancia llamada **capacitancia equivalente en paralelo** C_p . En paralelo, todos los condensadores tienen el mismo voltaje. La capacitancia equivalente en paralelo está dada por

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (2.18)$$



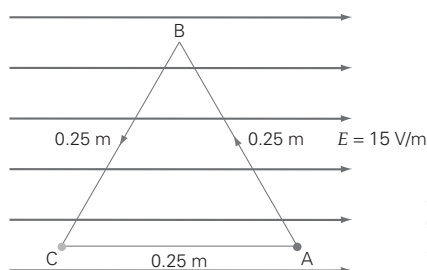
Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

2.1 Energía potencial eléctrica y diferencia de potencial eléctrico

- OM** La unidad SI de la diferencia de potencial eléctrico es a) el joule, b) el newton por coulomb, c) el newton-metro o d) el joule por coulomb.
- OM** ¿Cómo cambia la energía potencial electrostática de dos cargas puntuales positivas cuando se triplica la distancia entre ellas? a) Se reduce a un tercio de su valor original, b) se reduce a un noveno de su valor original, c) no cambia o d) se triplica su valor original.
- OM** Un electrón se mueve de la placa positiva a la negativa de un arreglo de placas paralelas cargadas. ¿Cómo se compara el signo del cambio en d de su energía potencial electrostática, con el signo del cambio en el potencial electrostático que experimenta: a) ambos son positivos, b) el cambio de energía es positivo, el cambio de potencial es negativo, c) el cambio de energía es negativo, el cambio de potencial es positivo o d) ambos son negativos?
- PC** ¿Cuál es la diferencia a) entre energía potencial electrostática y potencial eléctrico y b) entre diferencia de potencial eléctrico y voltaje?
- PC** Cuando un protón se acerca a otro protón fijo, ¿qué sucede a) a la energía cinética del protón que se aproxima, b) a la energía potencial eléctrica del sistema y c) a la energía total del sistema?
- PC** Utilizando el lenguaje de potencial y energía eléctricos (no fuerzas), explique por qué las cargas positivas aceleran conforme se aproximan a las cargas negativas.
- PC** Se libera un electrón en una región donde el potencial eléctrico disminuye a la izquierda. ¿De qué forma se moverá el electrón? Explique.
- PC** Se libera un electrón en una región donde el potencial eléctrico es constante. ¿De qué forma acelerará el electrón?
- PC** Si dos localidades están al mismo potencial, ¿cuánto trabajo se requiere para mover una carga de la primera localidad a la segunda? Explique.
- Un par de placas paralelas están cargadas por una batería de 12 V. ¿Cuánto trabajo se requiere para mover una partícula con una carga de $-4.0 \mu\text{C}$ de la placa positiva a la negativa?
- Si se requieren $+1.6 \times 10^{-5} \text{ J}$ para mover una partícula con carga positiva entre dos placas paralelas cargadas, a) ¿cuál será la magnitud de la carga si las placas están conectadas a una batería de 6.0 V? b) Se movió ésta de la placa negativa a la positiva, o de la placa positiva a la negativa?
- ¿Cuáles son la magnitud y dirección del campo eléctrico entre las dos placas paralelas cargadas en el ejercicio 11, si las placas están 4.0 mm separadas?
- En una máquina dental de rayos X, un haz de electrones se acelera mediante una diferencia de potencial de 10 kV. Al final de la aceleración, ¿cuánta energía cinética tiene cada electrón si todos partieron del reposo?
- Un electrón es acelerado por un campo eléctrico uniforme (1000 V/m) que señala verticalmente hacia arriba. Use las leyes de Newton para determinar la velocidad del electrón después que éste se mueve 0.10 cm desde el reposo.

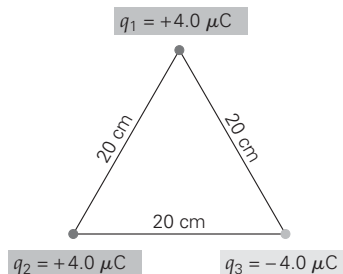
15. ● *a)* Repita el ejercicio 14, pero encuentre la rapidez usando métodos de energía. Obtenga la dirección en que se está moviendo el electrón, considerando cambios de energía potencial eléctrica. *b)* ¿El electrón gana o pierde energía potencial?
16. **EI** ● Considere dos puntos a diferentes distancias de una carga puntual positiva. *a)* El punto más cercano a la carga tiene un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el punto más alejado de la carga. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la diferencia de potencial entre dos puntos a 20 y 40 cm de una carga de $5.5 \mu\text{C}$?
17. **EI** ●● *a)* A un tercio de la distancia original desde una carga puntual positiva, ¿por qué factor cambia el potencial eléctrico? 1) $1/3$, 2) 3 , 3) $1/9$ o 4) 9 . ¿Por qué? *b)* ¿Qué tan lejos de una carga de $+1.0 \mu\text{C}$ está un punto con un potencial eléctrico de 10 kV ? *c)* ¿Qué cambio en potencial ocurriría si el punto se moviera a tres veces esa distancia?
18. **EI** ●● En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el electrón puede existir sólo en órbitas circulares de ciertos radios alrededor de un protón. *a)* ¿Una órbita mayor tendrá un potencial eléctrico 1) mayor, 2) igual o 3) menor que una órbita más pequeña? ¿Por qué? *b)* Determine la diferencia de potencial entre dos órbitas de radios 0.21 y 0.48 nm .
19. ●● En el ejercicio 18, ¿cuánto cambia la energía potencial del átomo si el electrón va *a)* de la órbita inferior a la superior, *b)* de la órbita superior a la inferior y *c)* de la órbita mayor a una distancia muy grande?
20. ●● ¿Cuánto trabajo se requiere para separar completamente dos cargas (cada una de $-1.4 \mu\text{C}$) y dejarlas en reposo, si inicialmente estaban a 8.00 mm de distancia?
21. ●● En el ejercicio 20, si las dos cargas son liberadas en su distancia de separación inicial, ¿cuánta energía cinética tendría cada una cuando ellas estén muy distantes una de otra?
22. ●● Toma $+6.0 \text{ J}$ de trabajo mover dos cargas desde una distancia grande a 1.0 cm una de otra. Si las cargas tienen la misma magnitud, *a)* ¿qué grande es cada carga y *b)* qué se puede decir acerca de sus signos?
23. ●● Una carga de $+2.0 \mu\text{C}$ está inicialmente a 0.20 m de una carga fija de $-5.0 \mu\text{C}$ y luego se mueve a una posición a 0.50 m de la carga fija. *a)* ¿Qué trabajo se requirió para mover la carga? *b)* ¿Depende el trabajo de la trayectoria sobre la cual se movió la carga?
24. ●● Se traslada un electrón del punto A al punto B y luego al punto C a lo largo de dos lados de un triángulo equilátero, cuyos lados tienen longitud de 0.25 m (▼ figura 2.23). Si el campo eléctrico horizontal es de 15 V/m ,



◀ **FIGURA 2.23**
Trabajo y energía
Véase el ejercicio 24.

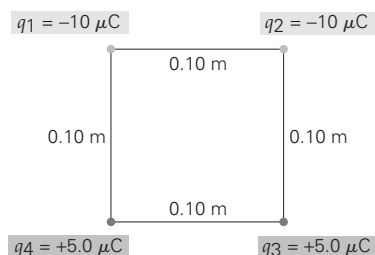
- a)* ¿cuál es la magnitud del trabajo requerido? *b)* ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y C? *c)* ¿Qué punto está a un potencial mayor?

25. ●● Calcule la energía necesaria para juntar las cargas (desde una distancia muy grande) en la configuración mostrada en la ▼ figura 2.24.



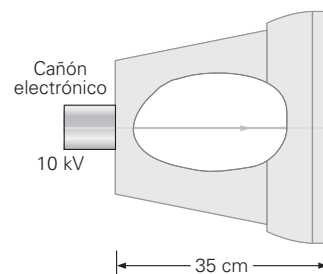
◀ **FIGURA 2.24** Un triángulo de carga Véanse los ejercicios 25 y 27.

26. ●● Calcule la energía necesaria para juntar las cargas (desde una distancia muy grande) en la configuración mostrada en la ▼ figura 2.25.



◀ **FIGURA 2.25** Un rectángulo de carga Véanse los ejercicios 26 y 28.

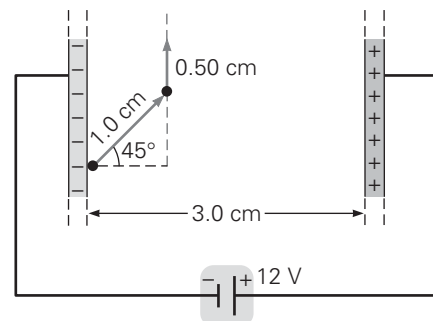
27. ●●● ¿Cuál es el valor del potencial eléctrico *a)* en el centro del triángulo y *b)* a medio punto entre q_2 y q_3 en la figura 2.24?
28. ●●● ¿Cuál es valor del potencial eléctrico en *a)* el centro del cuadrado y *b)* en un punto a la mitad entre q_2 y q_4 en la figura 2.25?
29. **EI** ●●● En el monitor de una computadora, los electrones se aceleran desde el reposo a través de una diferencia de potencial en un arreglo de "cañón electrónico" (▼ figura 16.26). *a)* ¿El lado izquierdo del cañón debería estar a un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el lado derecho? ¿Por qué? *b)* Si la diferencia de potencial en el cañón es de 5.0 kV , ¿cuál será la "velocidad inicial" de los electrones que salen del cañón? *c)* Si el cañón está dirigido a una pantalla a 35 cm , ¿qué tiempo tomará a los electrones llegar a la pantalla?



◀ **FIGURA 2.26** Rapidez del electrón Véase el ejercicio 29.

2.2 Superficies equipotenciales y el campo eléctrico

30. **OM** En una superficie equipotencial *a*) el potencial eléctrico es constante, *b*) el campo eléctrico es cero, *c*) el potencial eléctrico es cero, *d*) debe haber iguales cantidades de carga negativa y positiva.
31. **OM** Las superficies equipotenciales son *a*) paralelas al campo eléctrico, *b*) perpendiculares al campo eléctrico o *c*) forman cualquier ángulo con respecto al campo eléctrico.
32. **OM** Un electrón se mueve de una superficie equipotencial de +5.0 V a una de +10.0 V. En general, se mueve en una dirección *a*) paralela al campo eléctrico, *b*) opuesta al campo eléctrico, *c*) en la misma dirección que el campo eléctrico.
33. **PC** Esboce el mapa topográfico que esperaría usted al alejarse del mar caminando por una playa uniforme con suave pendiente ascendente. Rotule las equipotenciales gravitacionales respecto a sus alturas relativas y potenciales. Muestre cómo predecir, a partir del mapa, en qué dirección acelerará una pelota si se encuentra inicialmente a cierta distancia del agua.
34. **PC** Explique por qué dos superficies equipotenciales no pueden intersectarse.
35. **PC** Suponga que usted comienza con una carga en reposo sobre una superficie equipotencial, la mueve fuera de la superficie, luego la regresa a la superficie y, finalmente, la lleva al reposo. ¿Cuánto trabajo requirió hacer esto? Explíquelo.
36. **PC** ¿Qué forma geométrica tienen las superficies equipotenciales entre dos placas paralelas cargadas?
37. **PC** *a*) ¿Cuál es la forma aproximada de las superficies equipotenciales dentro de la membrana de la celda de un axón? (Véase la figura 1, p. 552.) *b*) Bajo condiciones de potencial en reposo, ¿dónde está la región de máximo potencial eléctrico dentro de la membrana? *c*) ¿Qué puede decir respecto a las condiciones durante polaridad inversa?
38. **PC** Cerca de una carga puntual positiva fija, si usted va de una superficie equipotencial a otra con un menor radio, *a*) ¿qué le pasa al valor del potencial? *b*) ¿Cuál fue su dirección general con respecto al campo eléctrico?
39. **PC** *a*) Si un protón se acelera a partir del reposo mediante una diferencia de potencial de 1 millón de volts, ¿cuánta energía cinética gana? *b*) ¿Cómo cambiaría su respuesta al inciso *a* si la partícula acelerada tuviera el doble de carga del protón (pero igual signo) y cuatro veces su masa?
40. **PC** *a*) ¿El campo eléctrico en un punto puede ser cero mientras hay un potencial eléctrico diferente de cero en ese punto? *b*) ¿El potencial eléctrico en un punto puede ser cero mientras hay un campo eléctrico diferente de cero en ese punto? Explique su respuesta. Si la respuesta a cualquiera de los incisos es sí, dé un ejemplo.
41. ● Para una carga puntual de +3.50 μC , ¿cuál será el radio de la superficie equipotencial cuyo potencial es de 2.50 kV?
42. ● Un campo eléctrico uniforme de 10 kV/m señala verticalmente hacia arriba. ¿Qué tan separados están los planos equipotenciales que difieren en 100 V?
43. ● En el ejercicio 42, si el suelo tiene potencial cero, ¿qué tan arriba del suelo estará la superficie equipotencial correspondiente a 7.0 kV?
44. ● Determine el potencial a 2.5 mm de la placa negativa de un par de placas paralelas separadas 10 mm y conectadas a una batería de 24 V.
45. ● Con relación a la placa positiva del ejercicio 44, ¿dónde está el punto con un potencial de 20 V?
46. ● Si el radio de la superficie equipotencial de la carga puntual está a 14.3 m a un potencial de 2.20 kV, ¿cuál será la magnitud de la carga puntual que genera el potencial?
47. **EI** ● *a*) La forma de una superficie equipotencial a cierta distancia de una carga puntual consiste en 1) esferas concéntricas, 2) cilindros concéntricos o 3) planos. ¿Por qué? *b*) Calcule la cantidad de trabajo (en eV) que tomaría mover un electrón de 12.6 a 14.3 m desde una carga puntual de +3.50 μC .
48. ● La diferencia de potencial implicada en la descarga de un relámpago puede ser hasta de 100 MV (1 millón de volts). ¿Cuál sería la ganancia de energía cinética de un electrón después de moverse a través de esta diferencia de potencial? Dé su respuesta en tanto en eV como en joules. (Suponga que no hay colisiones.)
49. ● En un acelerador lineal Van de Graaff típico, los protones se aceleran a través de una diferencia de potencial de 20 MV. ¿Cuál será su energía cinética si parten desde el reposo? Dé su respuesta en *a*) eV, *b*) keV, *c*) MeV, *d*) GeV y *e*) joules.
50. ● En el ejercicio 49, ¿cómo cambian sus respuestas si es una partícula alfa doblemente cargada (+2e) la que se acelera? (Recuerde que una partícula alfa consiste en dos neutrones y dos protones.)
51. ●● En los ejercicios 49 y 50, calcule la rapidez del protón y la partícula alfa al ser acelerados.
52. ●● Calcule el voltaje requerido para acelerar un haz de protones inicialmente en reposo, y calcule su rapidez si tienen una energía cinética de *a*) 3.5 eV, *b*) 4.1 keV y *c*) 8.0×10^{-16} J.
53. ●● Repita el cálculo en el ejercicio 52 para electrones en vez de protones.
54. ●●● Dos grandes placas paralelas están separadas 3.0 cm y conectadas a una batería de 12 V. Comenzando en la placa negativa y moviéndose 1.0 cm hacia la placa positiva según un ángulo de 45° (▼ figura 2.27), *a*) ¿qué valor



▲ FIGURA 2.27 Alcanzar nuestro potencial
Véanse los ejercicios 54 y 55.

de potencial se alcanza, suponiendo que la placa negativa se define con un potencial cero? *b*) ¿Cuál sería el valor del potencial si luego se moviera 0.50 cm paralelo a las placas?

55. ●●● Considere un punto a medio camino entre las dos grandes placas cargadas en la figura 2.27. Calcule el cambio en potencial eléctrico, si desde ahí usted se moviera *a*) 1.0 mm hacia la placa positiva, *b*) 1.0 mm hacia la placa negativa y *c*) 1.0 mm en forma paralela a ambas placas.
56. ●●● Utilizando los resultados del ejercicio 55, determine el campo eléctrico (dirección y magnitud) en un punto a la mitad del camino entre las placas.

2.3 Capacitancia

57. **OM** Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Su capacitancia: *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante?
58. **OM** Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Cómo cambia la carga en una de sus placas: *a*) aumenta, *b*) disminuye o *c*) permanece constante?
59. **OM** Un condensador se conecta primero a una batería de 6.0 V y luego se desconecta para conectarse a otra de 12.0 V. ¿Por cuánto cambia la intensidad del campo eléctrico entre sus placas: *a*) dos veces, *b*) cuatro veces o *c*) permanece constante?
60. **OM** La distancia entre las placas de un condensador se reduce a la mitad. ¿Por qué factor cambia su capacitancia: *a*) disminuye a la mitad, *b*) se reduce a una cuarta parte de su valor original, *c*) se duplica o *d*) se cuadruplica?
61. **OM** Si el área de las placas de un condensador se reduce, ¿cómo ajustaría la distancia entre esas placas para mantener constante la capacitancia: *a*) aumentándola, *b*) reduciéndola o *c*) cambiar la distancia no compensa el cambio en el área de las placas?
62. **PC** Si las placas de un condensador de placas paralelas aislado se acercan entre sí, ¿la energía almacenada aumenta, disminuye o permanece igual? Explíquelo.
63. **PC** Si la diferencia de potencial a través de un condensador se duplica, ¿qué sucede a *a*) la carga sobre el condensador y *b*) a la energía almacenada en el condensador?
64. **PC** Un condensador está conectado a una batería de 12 V. Si la separación de las placas se triplica y el condensador permanece conectado a la batería, ¿en factor cambia la carga sobre el condensador?
65. ● ¿Cuánta carga fluye por una batería de 12 V cuando se conecta un condensador de 2.0 μF entre sus terminales?
66. ● Un condensador de placas paralelas tiene una área de placa de 0.50 m^2 y una separación de placas de 2.0 mm. ¿Cuál será su capacitancia?
67. ● ¿Qué separación entre placas se requiere para un condensador de placas paralelas que tenga una capacitancia de 5.0×10^{-9} F, si el área de la placa es de 0.40 m^2 ?
68. **EI** ● *a*) Para un condensador de placas paralelas, una área mayor de placa resulta en una capacitancia 1) mayor,

2) igual o 3) menor. ¿Por qué? *b*) Un condensador de placas paralelas de 2.5×10^{-9} F tiene una área de placa de 0.425 m^2 . Si se duplica la capacitancia, ¿cuál será el área requerida de placa?

69. ●● Una batería de 12.0 V se conecta a un condensador de placas paralelas con área de placa de 0.20 m^2 y una separación de placas de 5.0 mm. *a*) ¿Cuál es la carga resultante sobre el condensador? *b*) ¿Cuánta energía se almacena en el condensador?
70. ●● Si la separación de las placas del condensador en el ejercicio 69 cambió a 10 mm después que el condensador se desconectó de la batería, ¿cómo cambian sus respuestas a ese ejercicio?
71. ●●● Los condensadores modernos son capaces de almacenar muchas veces la energía de los antiguos. Un condensador así, con una capacitancia de 1.0 F, es capaz de encender una pequeña bombilla de luz de 0.50 W a plena potencia durante 5.0 s antes de que se apague. ¿Cuál es el voltaje terminal de la batería que cargó el condensador?
72. ●●● Un condensador de 1.50 F se conecta a una batería de 12.0 V durante un tiempo prolongado, y luego se desconecta. El condensador pone en funcionamiento un motor de juguete de 1.00 W durante 2.00 s. Después de este tiempo, *a*) ¿por cuánto disminuyó la energía almacenada en el condensador. *b*) ¿Cuál es el voltaje a través de las placas? *c*) ¿Cuánta carga se almacena en el condensador? *d*) ¿Por cuánto tiempo más podría el condensador hacer funcionar el motor, suponiendo que éste opera a toda potencia hasta el final?
73. ●●● Dos placas paralelas tienen un valor de capacitancia de 0.17 μF cuando están separadas 1.5 mm. Están conectadas de forma permanente a un suministro de potencia de 100 V. Si las placas se separan una distancia de 4.5 mm, *a*) ¿cuál sería el campo eléctrico entre ellas? *b*) ¿Por cuánto cambiaría la carga del condensador? *c*) ¿Por cuánto cambiaría su energía almacenada? *d*) Repita estos cálculos suponiendo que el suministro de potencia se desconecta antes de separar las placas.

2.4 Dieléctricos

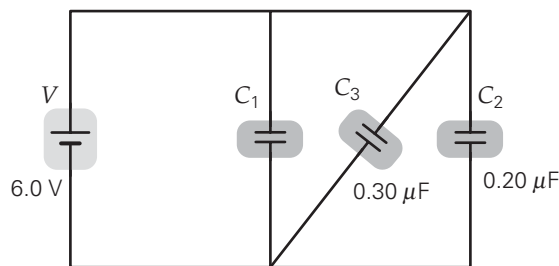
74. **OM** Si se pone un dieléctrico en un condensador cargado de placas paralelas que no está conectado a una batería, *a*) disminuye la capacitancia, *b*) disminuye el voltaje, *c*) aumenta la carga o *d*) causa una descarga porque el dieléctrico es un conductor.
75. **OM** Un condensador de placas paralelas se conecta a una batería. Si un dieléctrico se inserta entre las placas, *a*) la capacitancia disminuye, *b*) el voltaje aumenta, *c*) el voltaje decrece o *d*) la carga aumenta.
76. **OM** Un condensador de placas paralelas se conecta a una batería y luego se desconecta. Si entonces se inserta un dieléctrico entre las placas, ¿qué sucede a la carga de éstas? *a*) La carga disminuye, *b*) la carga aumenta o *c*) la carga permanece constante.
77. **PC** Dé varias razones por las que un conductor no sería una buena opción como dieléctrico para un condensador.
78. **PC** Un condensador de placas paralelas está conectado a una batería. Si un dieléctrico se inserta entre las placas, ¿qué sucede *a*) a la capacitancia y *b*) al voltaje?

79. **PC** Explique claramente por qué el campo eléctrico entre dos placas paralelas de un condensador disminuye cuando un dieléctrico se inserta, si el condensador no está conectado a un suministro de potencia, pero permanece constante cuando está conectado a un suministro de potencia.
80. ● Un condensador tiene una capacitancia de 50 pF, que aumenta a 150 pF cuando un material dieléctrico se inserta entre sus placas. ¿Cuál será la constante dieléctrica del material?
81. ● Un condensador de 50 pF se sumerge en aceite silicónico ($\kappa = 2.6$). Cuando el condensador está conectado a una batería de 24 V, ¿cuál será la carga sobre el condensador y la cantidad de energía almacenada?
82. ●● El dieléctrico de un condensador de placas paralelas se construye de vidrio que llena completamente el volumen entre las placas. El área de cada placa es de 0.50 m^2 . a) ¿Qué espesor debe tener el vidrio para que la capacitancia sea de $0.10 \mu\text{F}$? b) ¿Cuál es la carga sobre el condensador si éste se conecta a una batería de 12 V?
83. ●●● Un condensador de placas paralelas tiene una capacitancia de $1.5 \mu\text{F}$ con aire entre las placas. El condensador está conectado a una batería de 12 V y se carga. Luego se retira la batería. Cuando un dieléctrico se coloca entre las placas, se mide una diferencia de potencial de 5.0 V a través de las placas. a) ¿Cuál será la constante dieléctrica del material? b) La energía almacenada en el condensador aumentó, disminuyó o permaneció igual? c) ¿Cuánto cambió la energía almacenada en este condensador cuando se insertó el dieléctrico?
84. **EI** ●●● Un condensador de placas paralelas lleno de aire tiene placas rectangulares que miden $6.0 \times 8.0 \text{ cm}$. Está conectado a una batería de 12 V. Mientras la batería permanece conectada, se inserta una hoja de Teflón de 1.5 mm de grosor ($\kappa = 2.1$), de forma que llene por completo el espacio entre las placas. a) Mientras se insertaba el dieléctrico, 1) la carga fluía hacia el condensador, 2) la carga fluía fuera del condensador, 3) no fluía carga. b) Determine el cambio en la carga que almacena este condensador como resultado de la inserción del dieléctrico.

2.5 Condensadores en serie y en paralelo

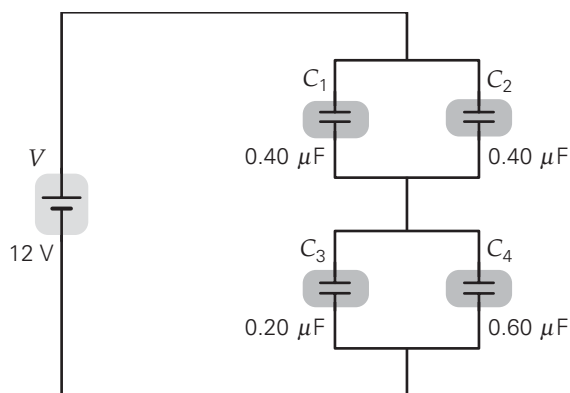
85. **OM** Los condensadores en serie tienen el mismo a) voltaje, b) carga o c) almacenamiento de energía.
86. **OM** Los condensadores en paralelo tienen el mismo a) voltaje, b) carga o c) almacenamiento de energía.
87. **OM** Los condensadores 1, 2 y 3 tienen el mismo valor de capacitancia C . Los condensadores 1 y 2 están en serie y su combinación está en paralelo con el 3. ¿Cuál será su capacitancia efectiva total? a) C , b) $1.5C$, c) $3C$ o d) $C/3$.
88. **PC** ¿Bajo qué condiciones dos condensadores en serie tendrían el mismo voltaje?
89. **PC** ¿Bajo qué condiciones dos condensadores en paralelo tendrían la misma carga?
90. **PC** Si usted tiene dos condensadores, ¿cómo debería conectarlos para obtener a) una capacitancia equivalente máxima y b) una capacitancia equivalente mínima?

91. **PC** Usted tiene N (un número par ≥ 2) condensadores idénticos, cada uno con una capacitancia de C . En términos de N y C , ¿cuál es su capacitancia efectiva total si a) están conectados en serie, b) están conectados en paralelo, c) dos mitades ($N/2$) están conectadas en serie y estos dos conjuntos están conectados en paralelo?
92. ● ¿Cuál es la capacitancia equivalente de dos condensadores con capacitancias de 0.40 y $0.60 \mu\text{F}$ cuando están conectados a) en serie y b) en paralelo?
93. **EI** ● a) Dos condensadores pueden conectarse a una batería en combinación en serie o en paralelo. La combinación en paralelo extraerá 1) más, 2) igual o 3) menos energía de una batería que la combinación en serie. ¿Por qué? b) Cuando una combinación en serie de dos condensadores descargados se conecta a una batería de 12 V, se extraen $173 \mu\text{J}$ de energía de la batería. Si uno de los condensadores tiene una capacitancia de $4.0 \mu\text{F}$, ¿cuál será la capacitancia del otro?
94. ●● Para el arreglo de tres condensadores en la **figura 2.28**, ¿qué valor de C_1 dará una capacitancia equivalente total de $1.7 \mu\text{F}$?



▲ **FIGURA 2.28** Una tríada de condensador
Véanse ejercicios 94 y 98.

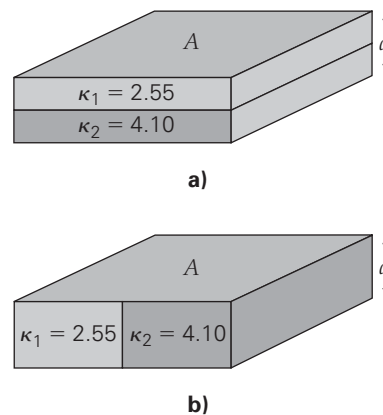
95. **EI** ●● a) Tres condensadores de igual capacitancia se conectan en paralelo a una batería, y juntos extraen una cierta cantidad de carga Q de la batería. ¿La carga en cada condensador será 1) Q , 2) $3Q$ o 3) $Q/3$? b) Tres condensadores de $0.25 \mu\text{F}$ cada uno están conectados en paralelo a una batería de 12 V. ¿Cuál será la carga en cada condensador? c) ¿Cuánta carga se extrae de la batería?
96. **EI** ●● a) Si le dan tres condensadores idénticos, usted puede obtener 1) tres, 2) cinco o 3) siete valores diferentes de capacitancia. b) Si los tres condensadores tienen cada uno una capacitancia de $1.0 \mu\text{F}$, ¿cuáles son los valores diferentes de capacitancia equivalente?
97. ●● ¿Cuáles son las capacitancias máxima y mínima equivalentes que se pueden obtener combinando tres condensadores de 1.5 , 2.0 y $3.0 \mu\text{F}$?
98. ●●● Si la capacitancia $C_1 = 0.10 \mu\text{F}$, ¿cuál será la carga en cada uno de los condensadores en el circuito de la figura 2.28?
99. ●●● Cuatro condensadores están conectados en un circuito como se ilustra en la **figura 2.29**. Encuentre la carga sobre cada uno de los condensadores, y la diferencia de voltaje a través de éstos.



▲ FIGURA 2.29 Doble paralelo en serie Véase el ejercicio 99.

Ejercicios adicionales

100. **EI** Una diminuta partícula de polvo en forma de aguja larga y delgada tiene cargas de ± 7.14 pC en su extremo. La longitud de la partícula es de $3.75 \mu\text{m}$. *a)* ¿Qué localidad tiene el potencial más alto? 1) $7.65 \mu\text{m}$ por arriba del extremo positivo, 2) $5.15 \mu\text{m}$ por encima del extremo positivo o 3) ambos lugares tienen el mismo potencial. *b)* Calcule el potencial en los dos puntos del inciso *a*. *c)* Utilice su respuesta al inciso *b* para determinar el trabajo necesario para mover un electrón del punto cercano al punto lejano.
101. Un tubo de vacío tiene una altura vertical de 50.0 cm. Un electrón sale de la parte superior con una rapidez de 3.2×10^6 m/s hacia abajo y se somete a un campo terrestre "típico" de 150 V/m hacia abajo. *a)* Utilice métodos de energía para determinar si alcanza la superficie inferior del tubo. *b)* Si es así, ¿con qué rapidez la golpea; si no, ¿qué tan cerca llega de la superficie inferior?
102. **PC** Haga un bosquejo de las superficies equipotenciales y del patrón de líneas del campo eléctrico afuera de un largo cable cargado. Etiquete las superficies con valor potencial relativo e indique la dirección del campo eléctrico.
103. Un átomo de helio con un electrón ya removido (un ion de helio positivo) consiste en un solo electrón en órbita y un núcleo de dos protones. Si el electrón está en su radio orbital mínimo de 0.027 nm, *a)* ¿cuál será la energía potencial del sistema? *b)* ¿Cuál será la aceleración centrípeta del electrón? *c)* ¿Cuál será la energía total del sistema? *d)* ¿Cuál será la energía mínima requerida para ionizar estos átomos de manera que el electrón salga por completo?
104. Suponga que los tres condensadores en la figura 2.22 tienen los siguientes valores: $C_1 = 0.15 \mu\text{F}$, $C_2 = 0.25 \mu\text{F}$ y $C_3 = 0.30 \mu\text{F}$. *a)* ¿Cuál será la capacitancia equivalente de este arreglo? *b)* ¿Cuánta carga se extraerá de la batería? *c)* ¿Cuál es el voltaje a través de cada condensador?
105. **EI** Dos placas paralelas horizontales muy grandes están separadas 1.50 cm. Un electrón se suspende en el aire entre ellas. *a)* La placa superior estará a un potencial 1) mayor, 2) igual o 3) menor respecto a la placa inferior. ¿Por qué? *b)* ¿Qué voltaje se requiere a través de las placas? *c)* ¿El electrón se colocó a la mitad entre las placas, o es adecuada cualquier ubicación entre las placas?
106. (Vea la sección A fondo sobre potencial eléctrico y transmisión de señales nerviosas de la p. 50 y el recuadro Aprender dibujando sobre las relaciones gráficas entre \vec{E} y V de la p. 45.) Suponga que la membrana celular de un axón está experimentando el final de un estímulo y que el voltaje instantáneo a través de la membrana celular es de 30 mV. Suponga que la membrana mide 10 nm de grosor. En este punto, la bomba molecular de Na/K-ATPasa comienza a mover el exceso de iones Na^+ de regreso al exterior. *a)* ¿Cuánto trabajo se requiere para que la bomba mueva el primer ion de sodio? *b)* Estime el campo eléctrico (incluida la dirección) de la membrana en estas condiciones. *c)* ¿Cuál será el campo eléctrico (incluida la dirección) en condiciones normales cuando el voltaje a través de la membrana es de -70 mV?
107. En el ejercicio 106, suponga que las superficies interior y exterior de la membrana del axón actúan como un condensador de placas paralelas con una área de 1.1×10^{-9} m². *a)* Estime la capacitancia de una membrana de axón, suponiendo que está llena de lípidos con una constante dieléctrica de 3.0 . *b)* ¿Cuánta carga habría en cada superficie en condiciones potenciales de reposo?
108. Dos placas paralelas, de 9.25 cm por lado, están separadas 5.12 mm. *a)* Determine su capacitancia si el volumen de una placa hacia la mitad del plano está lleno con un material cuya constante dieléctrica es de 2.55 y el resto está lleno con un material diferente (constante dieléctrica de 4.10). Véase la figura 2.30a. [Sugerencia: ¿ve dos condensadores en serie?] *b)* Repita el inciso *a*, excepto que ahora el volumen que va de un borde a la mitad está lleno con los mismos dos materiales. Véase la figura 2.30b. (¿Ve dos condensadores en paralelo?)



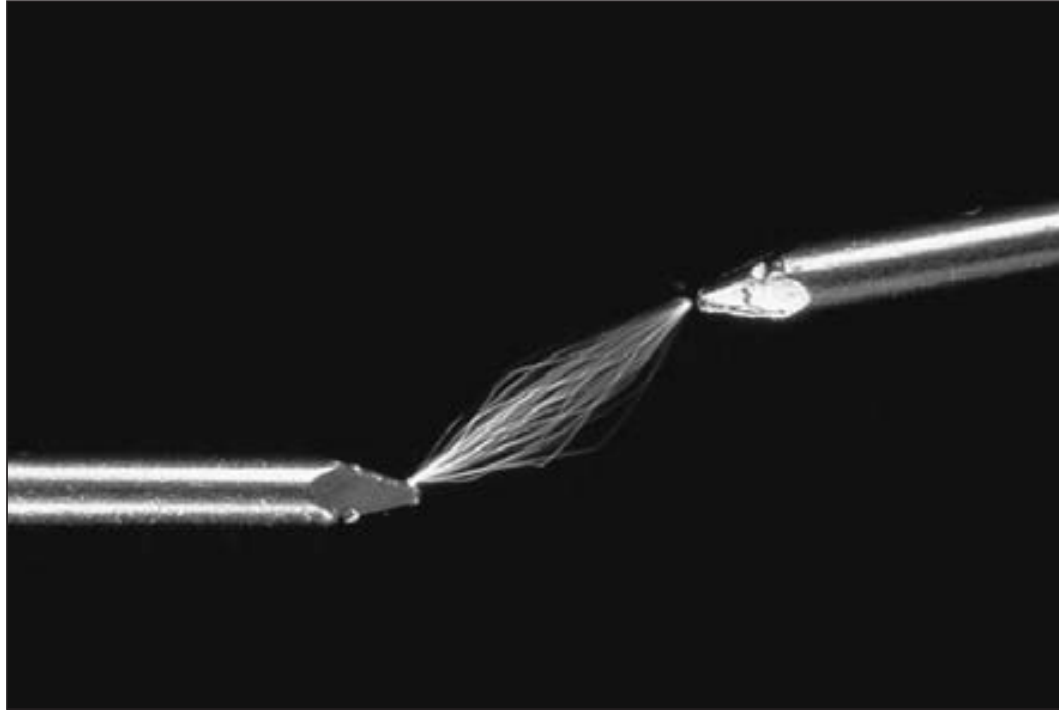
▲ FIGURA 2.30 Condensador de doble material Véase el ejercicio 108.

CORRIENTE ELÉCTRICA Y RESISTENCIA

| | | |
|-----|---------------------------------|----|
| 3.1 | Baterías y corriente directa | 67 |
| 3.2 | Corriente y velocidad de deriva | 69 |
| 3.3 | Resistencia y ley de Ohm | 71 |
| 3.4 | Potencia eléctrica | 78 |

HECHOS DE FÍSICA

- André Marie Ampère (1775-1836) fue un físico matemático conocido por su trabajo con las corrientes eléctricas. Su nombre se utiliza para designar la unidad de corriente del SI, el ampere (que con frecuencia se abrevia como *amp*). También realizó investigación en química, pues participó en la clasificación de los elementos y en el descubrimiento del flúor. En física, Ampère es famoso por ser uno de los primeros en intentar una teoría que combinara la electricidad y el magnetismo. La ley de Ampère, que describe el campo *magnético* creado por un flujo de carga *eléctrica*, es una de las cuatro ecuaciones fundamentales del electromagnetismo clásico.
- En un alambre de metal, la *energía* eléctrica viaja a la rapidez de la luz (en el alambre), que es mucho mayor que la rapidez de los portadores de carga por sí solos. La rapidez de estos últimos es apenas de unos cuantos milímetros por segundo.
- La unidad de resistencia eléctrica del SI, el ohm (Ω), recibió ese nombre en honor de Georg Simon Ohm (1789-1854), un matemático y físico alemán. Una cantidad llamada conductividad eléctrica, proporcional al *inverso* de la resistencia, se nombró, apropiadamente, el mho (el apellido Ohm al revés).
- Utilizando un voltaje superior a los 600 volts, las anguilas eléctricas y las rayas, por breves momentos, pueden descargar tanto como 1 ampere de corriente a través de la carne. La energía se transmite a una tasa de 600 J/s, o aproximadamente tres cuartos de un caballo de potencia.



Si le pidieran a usted que pensara acerca de la electricidad y sus usos, vendrían a su mente muchas imágenes favorables, incluidas diversas aplicaciones como lámparas, controles remotos de televisión y sopladores eléctricos de hojas del jardín. Quizá también vengan a su mente imágenes desfavorables como los peligrosos relámpagos, o las chispas que brotan de un tomacorriente sobrecargado.

Común a todas esas imágenes es el concepto de energía eléctrica. Para un dispositivo eléctrico, la energía es suministrada por la corriente eléctrica que viaja por cables; en el caso de los relámpagos o de las chispas, viaja por el aire. En cualquier caso, la luz, el calor o la energía mecánica liberada es simplemente energía eléctrica convertida a una forma diferente. Por ejemplo, en la fotografía de esta página, la luz que emana la chispa es emitida por las moléculas del aire.

En este capítulo nos ocuparemos de los principios fundamentales que rigen los circuitos eléctricos. Esos principios nos permitirán responder preguntas como las siguientes: ¿qué es la corriente eléctrica y cómo viaja? ¿Qué causa que una corriente eléctrica se mueva por un aparato cuando accionamos un interruptor? ¿Por qué la corriente eléctrica hace brillar intensamente el filamento de una bombilla de luz, pero no afecta a los alambres conductores de la misma manera? Podemos aplicar los principios eléctricos para comprender un amplio rango de fenómenos, desde la operación de aparatos domésticos hasta los espectaculares juegos de luces que generan los relámpagos.

3.1 Baterías y corriente directa

OBJETIVOS: a) Describir las propiedades de una batería, b) explicar cómo una batería produce una corriente directa en un circuito y c) aprender varios símbolos de circuitos para dibujar diagramas de circuito.

Después de estudiar la fuerza y la energía eléctrica en los capítulos 1 y 2, usted probablemente supone lo que se requiere para producir una *corriente eléctrica*, o un flujo de carga. Presentaremos algunas analogías para ayudarle. El agua fluye de manera natural colina abajo, desde áreas de mayor a menor energía potencial gravitacional (a causa de una *diferencia* en la energía potencial gravitacional). El calor fluye de manera natural a causa de las *diferencias* de temperatura. Para la electricidad, un flujo de carga eléctrica es el resultado de una *diferencia* de potencial eléctrico, al que llamamos “voltaje”.

En los conductores sólidos, particularmente en los metales, los electrones externos de los átomos tienen una libertad relativa para moverse. (En los conductores líquidos y gases cargados llamados *plasmas*, los iones positivos y negativos, al igual que los electrones, se mueven.) Para mover una carga eléctrica se requiere energía. La energía eléctrica se genera por la conversión de otras formas de energía, lo que produce una diferencia de potencial, o voltaje. Cualquier dispositivo capaz de producir y mantener diferencias de potencial se llama, de manera general, *suministro de potencia*.

Funcionamiento de una batería

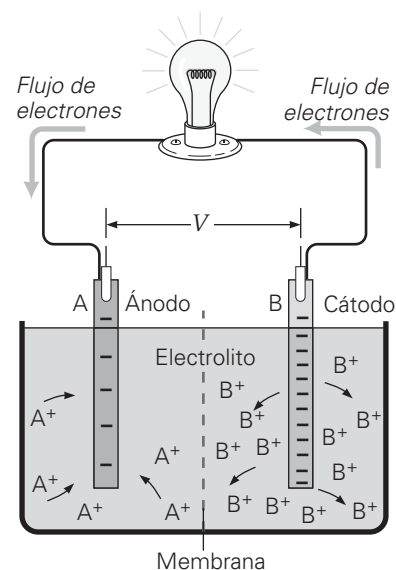
Un tipo común de suministro de potencia es la batería. Una **batería** convierte la energía potencial *química* almacenada en energía eléctrica. El científico italiano Alessandro Volta construyó una de las primeras baterías prácticas. Una batería simple consiste en dos *electrodos* metálicos diferentes en un *electrolito*, una solución que conduce electricidad. Con los electrodos y electrolito apropiados, se desarrolla una diferencia de potencial entre los electrodos como resultado de una acción química (►figura 3.1).

Cuando se forma un circuito completo, por ejemplo, conectando una bombilla de luz y unos alambres (figura 3.1), los electrones del electrodo más negativo (B) se moverán por el alambre y la bombilla hacia el electrodo menos negativo (A).* El resultado es un flujo de electrones en el alambre. Conforme los electrones se mueven por el filamento de la bombilla, entrando en colisión y transfiriendo energía a sus átomos (por lo general, de tungsteno), el filamento alcanza una temperatura suficiente para emitir luz visible (brillo). Como los electrones tienden a moverse a regiones de mayor potencial, el electrodo A debe estar a un potencial eléctrico mayor que el electrodo B. Así, la acción de la batería crea una *diferencia* de potencial (V) entre las terminales de la batería. El electrodo A se llama **ánodo** y se denota con un signo (+). El electrodo B se llama **cátodo** y se reconoce por un signo (-). Es fácil recordar esta convención de signos porque los electrones están negativamente cargados y se mueven por el alambre de B (-) a A (+).

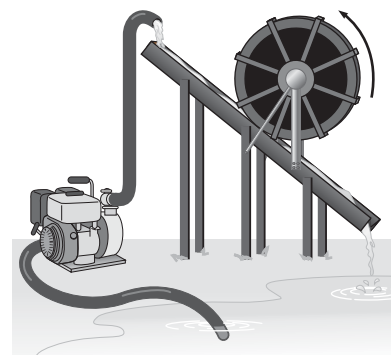
Con el fin de estudiar los circuitos eléctricos, podemos representar una batería como una “caja negra” que mantiene una diferencia de potencial constante entre sus terminales. Insertada en un circuito, una batería es capaz de realizar trabajo sobre los electrones en el alambre y transferirles energía (a costa de su propia energía química interna), y el alambre, por su parte, entrega esa energía a elementos del circuito externos a la batería. En esos elementos, la energía se convierte en otras formas, por ejemplo, movimiento mecánico (ventiladores eléctricos), calor (calentadores de inmersión) y luz (bombillas). Otras fuentes de voltaje, como generadores y fotoceldas, se analizarán más adelante.

Para comprender mejor el papel de una batería en un circuito, considere la analogía gravitacional en la ►figura 3.2. Una bomba de gasolina (de forma análoga a una batería) realiza trabajo sobre el agua y la sube. El aumento en energía potencial gravitacional del agua se realiza en detrimento de la energía potencial química de las moléculas de gasolina. El agua entonces regresa a la bomba, fluyendo hacia abajo por la canaleta (analogía con el alambre) hacia el estanque. Camino abajo, el agua efectúa trabajo sobre la rueda, lo que da por resultado energía cinética de rotación, de forma análoga a como los electrones transfieren energía a las bombillas.

*Como veremos dentro de poco, un *círculo completo* es cualquier ciclo completo que consiste en cables y dispositivos eléctricos (como baterías y bombillas de luz).

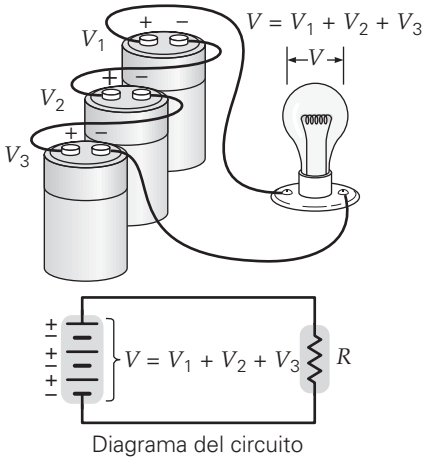
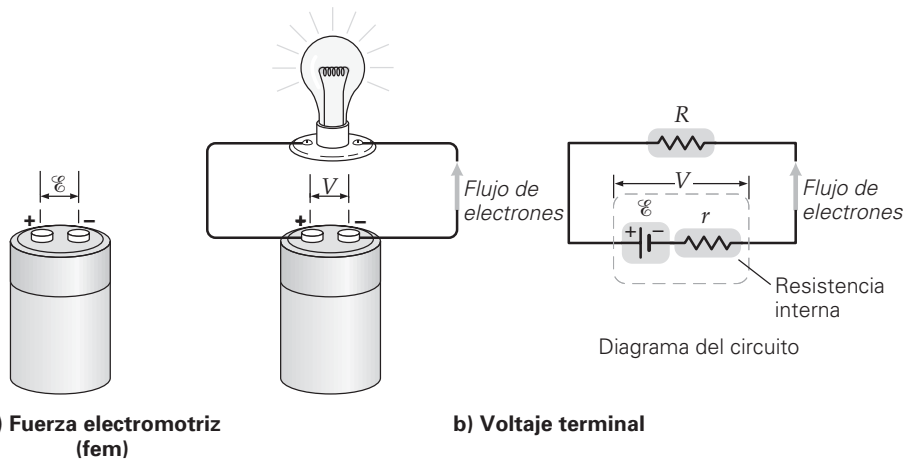


▲ **FIGURA 3.1** Acción de una batería en una batería o celda química Los procesos químicos en los que participan un electrolito y dos electrodos metálicos diferentes ocasionan que los iones de ambos metales se disuelvan en la solución a tasas diferentes. Así, un electrodo (el cátodo) queda con más carga negativa que el otro (el ánodo). El ánodo está a un mayor potencial que el cátodo. Por convención, el ánodo se designa como la terminal positiva y el cátodo como la negativa. Esta diferencia de potencial (V) puede generar una corriente, o un flujo de carga (electrones), en el alambre. Los iones positivos migran, como se observa en la figura. (Es necesaria una membrana para impedir la mezcla de los dos tipos de iones; ¿por qué?)

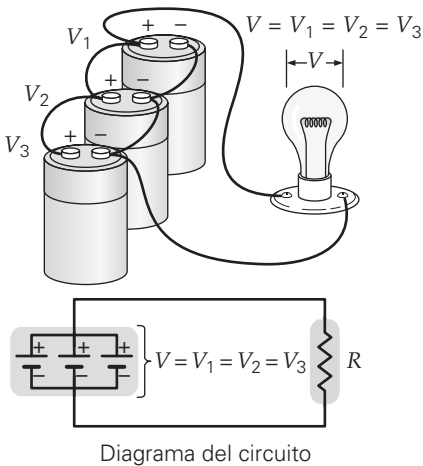


▲ **FIGURA 3.2** Analogía gravitacional entre una batería y una bombilla de luz Una bomba de gasolina sube agua de un estanque, incrementando la energía potencial del agua. Cuando el agua fluye hacia abajo, transfiere energía a una rueda hidráulica (es decir, efectúa trabajo sobre ella), haciendo que la rueda gire. Esta acción es análoga a la entrega de energía por parte de una corriente eléctrica a una bombilla de luz (por ejemplo, como en la figura 3.1).

► **FIGURA 3.3** Fuerza electromotriz (fem) y voltaje terminal *a*) La fem (\mathcal{E}) de una batería es la máxima diferencia de potencial entre sus terminales. Este máximo ocurre cuando la batería no está conectada a un circuito externo, *b*) A causa de la resistencia interna (r) el voltaje terminal V cuando la batería está en operación es menor que la fem (\mathcal{E}). Aquí, R es la resistencia de la bombilla.



a) Baterías en serie



b) Baterías en paralelo (voltajes iguales)

▲ **FIGURA 3.4** Baterías en serie y en paralelo *a*) Cuando las baterías están conectadas en serie, sus voltajes se suman y el voltaje a través de la resistencia R es la suma de los voltajes. *b*) Cuando baterías del mismo voltaje están conectadas en paralelo, el voltaje a través de la resistencia es la misma, como si sólo una sola batería estuviera presente. En este caso, cada batería suministra parte de la corriente total.

fem y voltaje terminal de una batería

La diferencia de potencial entre las terminales de una batería *cuando no está conectada* a un circuito se llama **fuerza electromotriz (fem)** de la batería y se designa con el símbolo \mathcal{E} . El nombre es algo confuso, porque la fuerza electromotriz *no* es una fuerza, sino una diferencia de potencial, o voltaje. Para evitar confusiones con el concepto de fuerza, llamaremos a la fuerza electromotriz meramente “fem”. La fem de una batería es el trabajo que ésta efectúa *por coulomb* de carga que pasa por ella. Si una batería realiza 1 joule de trabajo sobre 1 coulomb de carga, entonces su fem es de 1 joule por coulomb (1 J/C) o de 1 volt (1 V).

La fem, en realidad, representa la máxima diferencia de potencial entre las terminales de la batería (▲ figura 3.3a). En la práctica, cuando una batería está conectada a un circuito y fluye carga, el voltaje a través de las terminales es siempre ligeramente *menor* que la fem. Este “voltaje de operación” (V) de una batería (el símbolo para una batería es el par de líneas paralelas de longitud desigual en la figura 3.3b) se llama su **voltaje terminal**. Las baterías en operación real son de sumo interés para nosotros y su voltaje terminal es lo que más nos interesa.

En muchas condiciones, la fem y el voltaje terminal, en esencia, son lo mismo. Cualquier diferencia se debe al hecho de que la batería misma ofrece *resistencia interna* (r), que se muestra de forma explícita en el diagrama del circuito en la figura 3.3b. (La resistencia, que se definirá en la sección 3.3, es una medida cuantitativa de la oposición a un flujo de carga.) Las resistencias internas, en general, son pequeñas, por lo que el voltaje terminal de una batería es esencialmente igual que la fem $V \approx \mathcal{E}$. Sin embargo, cuando una batería suministra una gran corriente o cuando su resistencia interna es alta (baterías viejas), el voltaje terminal puede caer apreciablemente por debajo de la fem. La razón es que se requiere algún voltaje justo para producir una corriente en la resistencia interna. Matemáticamente, el voltaje terminal está relacionado con la fem, la corriente y la resistencia interna mediante $V = \mathcal{E} - Ir$, donde I es la *corriente eléctrica* (sección 3.2) en la batería.

Por ejemplo, la mayoría de los automóviles modernos tienen un “lector de voltaje” de la batería. Al encender el automóvil, el voltaje de una batería de 12 V, por lo común, arroja una lectura de sólo 10 V (este valor es normal). A causa de la enorme corriente que se requiere en el arranque, el término Ir (2 V) reduce la fem unos 2 V al voltaje terminal medido de 10 V. Cuando el motor está encendido y suministra la mayor parte de la energía eléctrica que se necesita para las funciones del automóvil, la corriente requerida de la batería es esencialmente cero y el lector de ésta sube de regreso a los niveles normales de voltaje. Así, el voltaje terminal, y no la fem, es un indicador fidedigno del estado de la batería. A menos que se especifique otra cosa, supondremos que la resistencia interna es insignificante, de forma que $V \approx \mathcal{E}$.

Existe una amplia variedad de baterías. Una de las más comunes es la batería de 12 V para automóvil, que consiste en seis celdas de 2 V conectadas en *serie*.* Esto es, la terminal positiva de cada celda está conectada a la terminal negativa de la siguiente celda (observe las tres celdas en la ▲ figura 3.4a). Cuando las baterías o celdas están conectadas de esta manera, sus voltajes se suman. Si las celdas están conectadas en *paralelo*, todas sus terminales positivas están conectadas entre sí, al igual que sus terminales negativas (figura

*La energía química se convierte a energía eléctrica en una *celda* química. El término *batería* generalmente se refiere a un conjunto, o “batería”, de celdas.

3.4b). Cuando baterías idénticas están conectadas de esta manera, la diferencia de potencial o el voltaje terminal es igual para todas ellas. Sin embargo, cada una suministra una fracción de la corriente al circuito. Por ejemplo, si tenemos tres baterías con voltajes iguales, cada una suministra un tercio de la corriente. Una conexión en paralelo de dos baterías es el método más utilizado para encender el automóvil pasando corriente de otro vehículo. Para un arranque así, la batería débil (alta r) se conecta en paralelo a una batería normal (baja r), que entrega la mayor parte de la corriente para encender el automóvil.

Diagramas de circuitos y símbolos

Para analizar y visualizar circuitos, es común dibujar diagramas de circuitos que son representaciones esquemáticas de los alambres, baterías y aparatos, tal como están conectados. Cada elemento del circuito se representa por su propio símbolo en el diagrama del circuito. Como hemos visto en las figuras 3.3b y 3.4, el símbolo para una batería son dos líneas paralelas, la más larga de las cuales representa la terminal positiva (+) y la más corta la terminal negativa (-). Cualquier elemento de circuito (como una bombilla de luz o un aparato) que se *opone* al flujo de carga se representa mediante el símbolo $\text{---}\text{---}\text{---}$, que significa resistencia R . (La resistencia eléctrica se definirá en la sección 3.3; por el momento sólo presentamos su símbolo.) Los alambres de conexión se dibujan como líneas no interrumpidas y se supone que, a menos que se especifique otra cosa, que tienen resistencia insignificante. Cuando las líneas se cruzan, se supone que *no* están en contacto una con otra, a menos que tengan un punto resaltado en su intersección. Finalmente, los interruptores se representan como “puentes levadizos”, capaces de subir (para abrir el circuito y detener la corriente) y bajar (para cerrar el circuito y permitir el paso de la corriente). Estos símbolos, junto con el del condensador o capacitor (capítulo 2), están resumidos en la sección Aprender dibujando en esta página. En el siguiente ejemplo se presenta cómo se utilizan estos símbolos y los diagramas de circuito para comprender mejor el tema.

Ejemplo conceptual 3.1 ■ ¿Dormido en el interruptor?

La ►figura 3.5 ilustra un circuito que representa dos baterías idénticas (cada una con voltaje terminal V) conectadas en paralelo a una bombilla (representada por un resistor). Como se supone que los alambres no representan resistencia, sabemos que antes de abrir el interruptor S_1 , el voltaje a través de la bombilla es igual a V (esto es, $V_{AB} = V$). ¿Qué sucede al voltaje a través de la bombilla cuando se abre S_1 ? a) El voltaje permanece igual (V) que antes de abrir el interruptor. b) El voltaje cae a $V/2$, ya que sólo una batería está ahora conectada a la bombilla. c) El voltaje cae a cero.

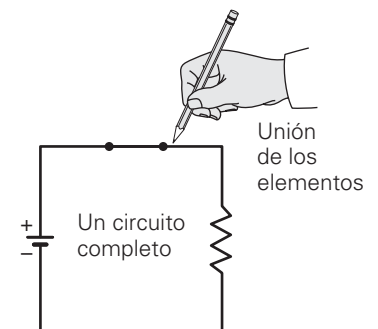
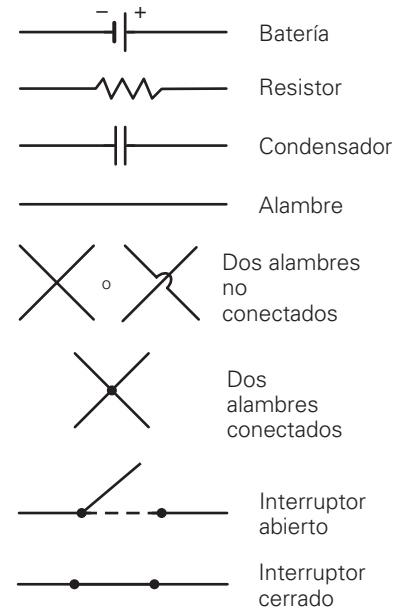
Razonamiento y respuesta. Podríamos sentirnos tentados a elegir la respuesta *b*, porque ahora sólo hay una batería. Pero observe de nuevo. La batería restante aún está conectada a la bombilla. Esto significa que debe haber *algún* voltaje a través de la bombilla, por lo que la respuesta no puede ser la *c*. Pero también significa que la respuesta correcta no es la *b*, porque la batería restante mantendrá por sí sola un voltaje de V a través de la bombilla. Por consiguiente, la respuesta correcta es la *a*.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuál sería la respuesta correcta si, además de abrir S_1 , también se abre el interruptor S_2 ? Explique su respuesta y razonamiento. (Las respuestas de todos los Ejercicios de refuerzo se presentan al final del libro.)

Nota: Recuerde que el término *voltaje* significa “diferencia en potencial eléctrico”.

APRENDER DIBUJANDO

Dibujo de circuitos



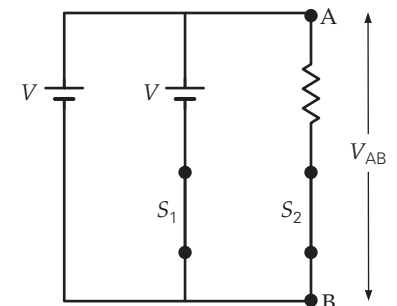
3.2 Corriente y velocidad de deriva

OBJETIVOS: a) Definir corriente eléctrica, b) distinguir entre flujo de electrones y corriente convencional y c) explicar el concepto de velocidad de deriva y transmisión de energía eléctrica

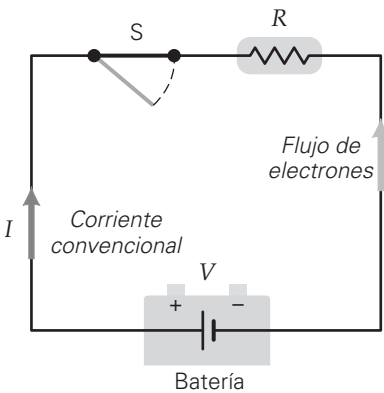
Como acabamos de ver, mantener una corriente eléctrica requiere de una fuente de voltaje y un **circuito completo**, es decir, una trayectoria continua de conducción. La gran mayoría de los circuitos tienen un interruptor que se usa para “abrir” o “cerrar” el circuito. Un circuito abierto elimina la continuidad de la trayectoria, lo que detiene el flujo de carga en los alambres.

Corriente eléctrica

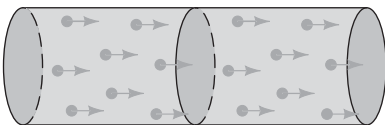
Como son electrones los que se mueven en los alambres del circuito, el flujo de carga se aleja de la terminal negativa de la batería. Sin embargo, históricamente, el análisis de



▲ FIGURA 3.5 ¿Qué le sucede al voltaje? Véase el ejemplo 3.1.



▲ **FIGURA 3.6** Corriente convencional Por razones históricas, el análisis de un circuito generalmente se realiza con corriente convencional. Esta última es en el sentido en que fluyen las cargas positivas, es decir, en sentido contrario al flujo de los electrones.



▲ **FIGURA 3.7** Corriente eléctrica La corriente eléctrica (I) en un alambre se define como la tasa a la que la carga neta (q) pasa por el área de la sección transversal del alambre: $I = q/t$. La unidad de I es el amperio (A), o *amp*, para abreviar.

los circuitos se ha realizado en términos de **corriente convencional**, que es en el sentido en que fluirán las cargas positivas, es decir, en sentido *contrario* al flujo de electrones (◀ figura 3.6). (Existen algunas situaciones en las que un flujo de carga positiva es responsable de la corriente, por ejemplo, en los semiconductores.)

Se dice que la batería *entrega* corriente a un circuito o a un componente de éste (un elemento de circuito). De manera alternativa, decimos que el circuito (o sus componentes) *extrae* corriente de la batería. Entonces la corriente regresa a la batería. Una batería sólo puede impulsar una corriente en una dirección. Este tipo de flujo de carga unidireccional se llama **corriente directa (cd)**. (Observe que si la corriente cambia de dirección y/o de magnitud, se convierte en *corriente alterna*.)

Cuantitativamente, la **corriente eléctrica (I)** se define como la tasa de flujo de la carga neta en función del tiempo. En este capítulo, nos ocuparemos principalmente del flujo de carga constante. En ese caso, si una carga neta q pasa a través de una área transversal en un intervalo de tiempo t (◀ figura 3.7), la corriente eléctrica se define como

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{corriente eléctrica} \quad (3.1)$$

Unidad SI de corriente: coulomb por segundo (C/s) o amperio (A)

El coulomb por segundo se designa como **amperio (A)** en honor del físico francés André Ampère (1775-1836), investigador pionero de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Comúnmente, el amperio se abrevia como *amp*. Una corriente de 10 A se lee como “diez amperes” o “diez amps”. Las corrientes pequeñas se expresan en *miliamperes* (mA o 10^{-3} A), *microamperes* (μA o 10^{-6} A) o *nanoamperes* (nA o 10^{-9} A). Estas unidades a menudo se abrevian como *miliamps*, *microamps* y *nanoamps*, respectivamente. En un típico circuito doméstico, es común que los alambres conduzcan varios amperes de corriente. Para comprender la relación entre carga y corriente, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 3.2 ■ Conteo de electrones: corriente y carga

Se tiene una corriente constante de 0.50 A en la bombilla de una linterna durante 2.0 minutos. ¿Cuánta carga pasa por la bombilla en este tiempo? ¿Cuántos electrones representa esto?

Razonamiento. La corriente y el tiempo transcurrido se conocen. La definición de corriente (ecuación 3.1) nos permite encontrar la carga q . Como cada electrón tiene una carga con una magnitud de 1.6×10^{-19} C, entonces es posible convertir q a un número específico de electrones.

Solución. Se lista los datos y se convierte el intervalo de tiempo a segundos:

Dado: $I = 0.50$ A **Encuentre:** q (cantidad de carga)
 $t = 2.0$ min = 1.2×10^2 s n (número de electrones)

De la ecuación (3.1), $I = q/t$, por lo que la magnitud de la carga está dada por

$$q = It = (0.50 \text{ A})(1.2 \times 10^2 \text{ s}) = (0.50 \text{ C/s})(1.2 \times 10^2 \text{ s}) = 60 \text{ C}$$

Se resuelve para determinar el número de electrones (n), y se tiene

$$n = \frac{q}{e} = \frac{60 \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}} = 3.8 \times 10^{20} \text{ electrones}$$

(Lo que implica muchísimos electrones.)

Ejercicio de reforzamiento. Muchos instrumentos muy sensibles de laboratorio pueden medir fácilmente corrientes en el rango de nanoamperes, o aun menores. ¿Cuánto tiempo, en años, le tomaría a una carga de 1.0 C fluir por un punto dado en un alambre que conduce una corriente de 1.0 nA?

Velocidad de deriva, flujo de electrones y transmisión de energía eléctrica

Aunque a menudo mencionamos el flujo de carga en analogía al flujo de agua, la carga eléctrica que circula por un conductor no fluye de la misma forma en que el agua fluye por un tubo. En ausencia de una diferencia de potencial en un alambre metálico, los electrones libres se mueven al azar a grandes velocidades entrando en colisión muchas veces por segundo con los átomos del metal. En consecuencia, no hay un flujo neto promedio de carga, ya que cantidades iguales de carga pasan por un punto dado en sentidos opuestos durante un intervalo específico de tiempo.

Sin embargo, cuando una diferencia de potencial (voltaje) *se aplica* entre los extremos del alambre (por ejemplo, mediante una batería), en éste aparece un campo eléctrico en una dirección. Entonces se presenta un flujo de electrones que *se opone* a esa dirección (¿por qué?). Esto *no* significa que los electrones se están moviendo directamente de un extremo del alambre al otro, pues se siguen moviendo en todas direcciones al entrar en colisión con los átomos del conductor, pero ahora hay un componente que se *suma* (en una dirección) a sus velocidades (►figura 3.8). El resultado es que sus movimientos ahora son, en promedio, más hacia la terminal positiva de la batería que en sentido contrario.

Este flujo neto de electrones se caracteriza por una velocidad promedio llamada **velocidad de deriva**, que es mucho menor que las velocidades aleatorias (térmicas) de los electrones mismos. En general, la magnitud de la velocidad de deriva es del orden de 1 mm/s. De acuerdo con esto, un electrón tardaría aproximadamente 17 min en viajar 1 m a lo largo de un alambre. Sin embargo, una lámpara se enciende casi instantáneamente cuando accionamos el interruptor (para cerrar el circuito), y las señales electrónicas que transmiten conversaciones telefónicas viajan casi instantáneamente por millas de cable. ¿Cómo es posible esto?

Es evidente que *algo* debe estar moviéndose más rápidamente que los electrones de deriva. Por supuesto, se trata del campo eléctrico. Cuando se aplica una diferencia de potencial, el campo eléctrico asociado en el conductor viaja con una rapidez cercana a la de la luz (aproximadamente 10^8 m/s). Por tanto, el campo eléctrico influye en el movimiento de los electrones *a lo largo del conductor* casi instantáneamente. Esto significa que la corriente se inicia en todas partes del circuito casi de forma simultánea. No tenemos que esperar que los electrones “lleguen ahí” desde un lugar distante (por ejemplo, cerca del interruptor). Por ejemplo, en una bombilla, los electrones que *ya* están en el filamento comienzan a moverse casi inmediatamente para entregar energía y generar luz sin demora.

Este efecto es análogo a derribar una hilera de fichas de dominó. Cuando se derriba una ficha en un extremo, esa *señal* o energía se transmite rápidamente a lo largo de la hilera. Muy rápidamente, en el otro extremo, la última ficha cae (y entrega la energía). Es evidente que la ficha de dominó que entrega la señal o la energía *no* es la que usted empujó. Así, fue la energía —no las fichas de dominó— la que viajó a lo largo de la hilera.

3.3 Resistencia y ley de Ohm

OBJETIVOS: a) Definir resistencia eléctrica y explicar qué significa resistor óhmico, b) resumir los factores que determinan la resistencia y c) calcular el efecto de esos factores en situaciones simples.

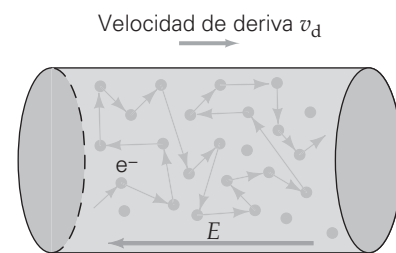
Si usted aplica un voltaje (diferencia de potencial) entre los extremos de un material conductor, ¿qué factores determinan la corriente? Como podría esperarse, en general, cuanto mayor es el voltaje, mayor es la corriente. Sin embargo, hay otro factor que influye en la corriente. Así como la fricción interna (viscosidad; véase el capítulo 7 de *Física 11*) afecta el flujo de los fluidos en los tubos, la resistencia del material del que está hecho el alambre afectará el flujo de carga. Cualquier objeto que ofrece resistencia considerable a la corriente eléctrica se llama *resistor* y se representa en los diagramas mediante el símbolo en zigzag (sección 3.1). Este símbolo se usa para representar todos los tipos existentes de “resistores”, desde los cilíndricos codificados en color sobre tableros de circuitos impresos a los dispositivos y aparatos eléctricos como secadoras de cabello y bombillas de luz (►figura 3.9).

Pero, ¿cómo se cuantifica la resistencia? Sabemos, por ejemplo, que si un gran voltaje se aplica a través de un objeto y produce sólo una pequeña corriente, entonces ese objeto presenta una elevada resistencia. Así, la **resistencia (R)** de cualquier objeto se define como la razón entre el voltaje a través del objeto y la corriente resultante a través de ese objeto. Por lo tanto, la resistencia se define como

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{resistencia eléctrica} \quad (3.2a)$$

Unidad SI de resistencia: volt por ampere (V/A), u ohm (Ω)

Las unidades de resistencia son volts por ampere (V/A), llamado **ohm (Ω)** en honor del físico alemán Georg Ohm (1789-1854), quien investigó la relación entre corriente y voltaje. Los grandes valores de la resistencia se expresan comúnmente en kilohms ($k\Omega$) y megahms ($M\Omega$). Un diagrama de un circuito que muestra cómo, en princi-



▲ **FIGURA 3.8** Velocidad de deriva A causa de las colisiones con los átomos del conductor, el movimiento de los electrones es al azar. Sin embargo, cuando el conductor está conectado, por ejemplo, a una batería, para formar un circuito completo, se tiene un pequeño movimiento neto en sentido opuesto al campo eléctrico [hacia la terminal de mayor potencial (positiva) o ánodo]. La rapidez y el sentido de este movimiento neto constituye la velocidad de deriva de los electrones.

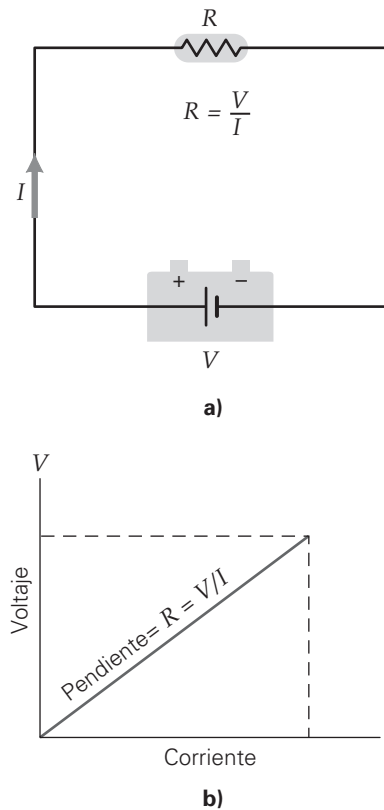
Nota: *resistor* es un término genérico para cualquier objeto que posee una resistencia eléctrica significativa.

Nota: Recuerde, V significa ΔV .

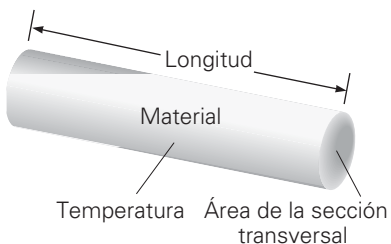


▲ **FIGURA 3.9** Resistores en uso Un tablero de circuito impreso, típicamente usado en computadoras, incluye resistores de diferentes valores. Los grandes cilindros rayados son resistores; sus códigos de bandas de cuatro colores indican sus resistencias en ohms.

Nota: *ohmico* significa “con resistencia constante”.



▲ **FIGURA 3.10** Resistencia y ley de Ohm a) En principio, cualquier resistencia eléctrica de un objeto se determina dividiendo el voltaje a través de él entre la corriente que fluye. b) Si el elemento obedece la ley de Ohm (aplicable sólo a una resistencia constante), entonces una gráfica del voltaje *versus* la corriente es una línea recta con pendiente igual a R , o resistencia del elemento. (Su resistencia no cambia con el voltaje.)



▲ **FIGURA 3.11** Factores de resistencia Los factores que afectan directamente la resistencia eléctrica de un conductor cilíndrico son el tipo de material del que está hecho, su longitud (L), el área de su sección transversal (A) y su temperatura (T).

pio, se determina la resistencia, aparece en la figura 3.10a. (En el capítulo 4 estudiaremos los instrumentos que se emplean para medir la corriente y el voltaje eléctricos, llamados *amperímetros* y *voltímetros*, respectivamente.)

Para algunos materiales, la resistencia es constante en un rango de voltajes. Se dice que un resistor que exhibe resistencia constante obedece la **ley de Ohm**, o que es *ohmico*. La ley se llamó así en honor de Ohm, quien encontró materiales que poseen esta propiedad. Una gráfica de voltaje *versus* corriente para un material con una resistencia óhmica es una línea recta con una pendiente igual a su resistencia R (figura 3.10b). Una forma común y práctica de la ley de Ohm es

$$V = IR \quad (\text{ley de Ohm}) \quad (3.2b)$$

(o $I \propto V$, sólo cuando R es constante)

La ley de Ohm no es una ley fundamental en el mismo sentido en que, por ejemplo, la ley de la conservación de la energía. No hay “ley” que establezca que los materiales *deben* tener resistencia constante. De hecho, muchos de nuestros avances en electrónica se basan en materiales como los semiconductores, que tienen relaciones *no lineales* entre voltaje y corriente.

A menos que se especifique otra cosa, supondremos que los resistores son óhmicos. Sin embargo, siempre recuerde que muchos materiales no son óhmicos. Por ejemplo, la resistencia de los filamentos de tungsteno de las bombillas de luz aumenta con la temperatura, y es mayor a la temperatura de operación que a temperatura ambiente. El siguiente ejemplo muestra cómo la resistencia del cuerpo humano puede hacer la diferencia entre la vida y la muerte.

Ejemplo 3.3 ■ Peligro en la casa: resistencia humana

Cualquier habitación en una casa expuesta al voltaje eléctrico y al agua representa peligro. (Véase el análisis de la seguridad eléctrica en la sección 4.5.) Por ejemplo, suponga que una persona sale de la ducha y, sin querer, toca con el dedo un alambre expuesto de 120 V (quizá un cordón deshilachado de una secadora). El cuerpo humano, cuando está mojado, tiene una resistencia eléctrica tan baja como 300Ω . Con base en este valor, estime la corriente en el cuerpo de esa persona.

Razonamiento. El alambre tiene un potencial eléctrico de 120 V por encima del piso, que es “tierra” y que está a 0 V. Por lo tanto, el voltaje (o diferencia de potencial) a través del cuerpo es de 120 V. Para determinar la corriente, utilizaremos la ecuación 3.2, que define la resistencia.

Solución. Se listan los datos,

Dado: $V = 120 \text{ V}$
 $R = 300 \Omega$

Encuentre: I (corriente en el cuerpo)

Usando la ecuación 3.2, tenemos

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120 \text{ V}}{300 \Omega} = 0.400 \text{ A} = 400 \text{ mA}$$

Si bien ésta es una pequeña corriente según los estándares diarios, es una corriente fuerte para el cuerpo humano. Una corriente de más de 10 mA provoca severas contracciones musculares, y corrientes del orden de 100 mA pueden detener el corazón. Así que esta corriente es potencialmente mortal. (Véase la sección A fondo sobre electricidad y seguridad personal, y la tabla 1 en el capítulo 4, p. 112.)

Ejercicio de refuerzo. Cuando el cuerpo humano está seco, su resistencia (a todo lo largo) llega a ser tan alta como $100 \text{ k}\Omega$. ¿Qué voltaje se requiere para producir una corriente de 1.0 mA (un valor que la gente apenas percibe)?

Factores que influyen en la resistencia

En el nivel atómico, la resistencia aparece cuando los electrones entran en colisión con los átomos que constituyen el material. Así, la resistencia depende parcialmente del tipo de material del que se compone el objeto. Sin embargo, los factores geométricos también influyen en la resistencia de un objeto. En resumen, la resistencia de un objeto de sección transversal uniforme, como un tramo de alambre, depende de cuatro propiedades: 1) el tipo de material, 2) su longitud, 3) su área transversal y 4) su temperatura (figura 3.11).

Como podría esperarse, la resistencia de un objeto (por ejemplo, un trozo de alambre) es *inversamente* proporcional al área de su sección transversal (A) y *directamente* proporcional a la longitud (L); esto es, $R \propto L/A$. Por ejemplo, un alambre metálico uniforme de 4 m de longitud ofrece el doble de resistencia que un alambre similar de 2 m de longitud, pero un alambre con un área transversal de 0.50 mm^2 tiene sólo la mitad de la resistencia de uno con área de 0.25 mm^2 . Esas condiciones geométricas de resistencia son análogas a las del flujo de un líquido en un tubo. Cuanto más largo es el tubo, mayor es su resistencia (arrastre), pero cuanto mayor es el área transversal del tubo, mayor es la cantidad de líquido que puede llevar. Para conocer más acerca de la resistencia en relación con la longitud y el área en los organismos vivos, véase en esta página la sección A fondo 3.1 sobre la “biogeneración” de alto voltaje.

A FONDO 3.1 LA “BIOGENERACIÓN” DE ALTO VOLTAJE

Usted sabe que dos metales diferentes inmersos en ácido generan una separación constante de carga (o voltaje) y, por lo tanto, producen corriente eléctrica. Sin embargo, los organismos vivos también crean voltajes mediante un proceso que, en ocasiones, se llama “biogeneración”. En particular, las anguilas eléctricas (véase la sección A fondo 1.2 de la p. 25) son capaces de generar 600 V, un voltaje más que suficiente para matar a un ser humano. Como veremos, el proceso tiene similitudes tanto con las “pilas secas” como con la transmisión de señales nerviosas.

Las anguilas tienen tres órganos relacionados con sus actividades eléctricas. El órgano de Sachs genera pulsaciones de bajo voltaje para la navegación. Los otros dos (el órgano de Hunter y el órgano de Main) son fuentes de alto voltaje (figura 1). En estos órganos, las células llamadas *electrocitos* o *electroplacas*, están apiladas. Cada célula tiene forma de disco plano. La columna de electroplacas es una conexión en serie similar a la de una batería de automóvil, en donde hay seis celdas de 2 V cada una, que producen un total de 12 V. Cada electroplaca es capaz de producir un voltaje de apenas 0.15 V, pero cuatro o cinco mil de ellas conectadas en serie generan un voltaje de 600 V. Las electroplacas son similares a las células musculares en que reciben impulsos nerviosos a través de conexiones sinápticas. Sin embargo, estos impulsos nerviosos no generan movimiento. En lugar de ello, desencadenan la generación de voltaje mediante el siguiente mecanismo.

Cada electroplaca tiene la misma estructura. Las membranas superior e inferior se comportan de manera similar a las membranas nerviosas. En condiciones de reposo, los iones de Na^+ no pueden penetrar en la membrana. Para equilibrar sus concentraciones en ambos lados, los iones permanecen cerca de la superficie exterior. Esto, a la vez, atrae (del interior) las proteínas negativamente cargadas hacia la superficie interna. Co-

mo resultado, el interior tiene un potencial 0.08 V más bajo que el exterior. Así, en condiciones de reposo, la superficie externa superior (la que da hacia la cabeza o la parte anterior de la anguila) y la superficie externa inferior (que da a la parte posterior) de *todas* las electroplacas son positivas (una de ellas se ilustra en la figura 2a) y no presenta voltaje ($\Delta V_1 = 0$). Por lo tanto, en condiciones de reposo, una columna de electroplacas en serie no tiene voltaje ($\Delta V_{\text{total}} = \sum \Delta V_i = 0$) de la parte superior a la inferior (figura 2b).

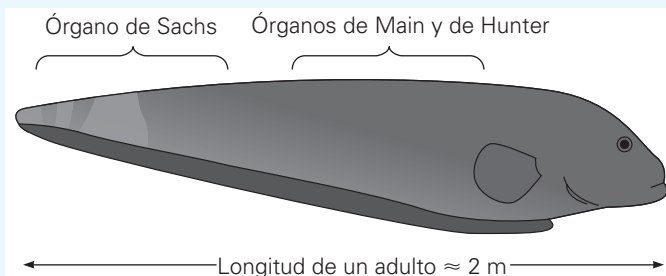


FIGURA 1 Anatomía de una anguila eléctrica El 80% del cuerpo de una anguila eléctrica está dedicado a la generación de voltaje. La mayor parte de esa porción contiene los dos órganos (de Main y de Hunter) responsables del alto voltaje que le permite matar a sus presas. El órgano de Sachs produce un voltaje de baja pulsación, que se utiliza para la navegación.

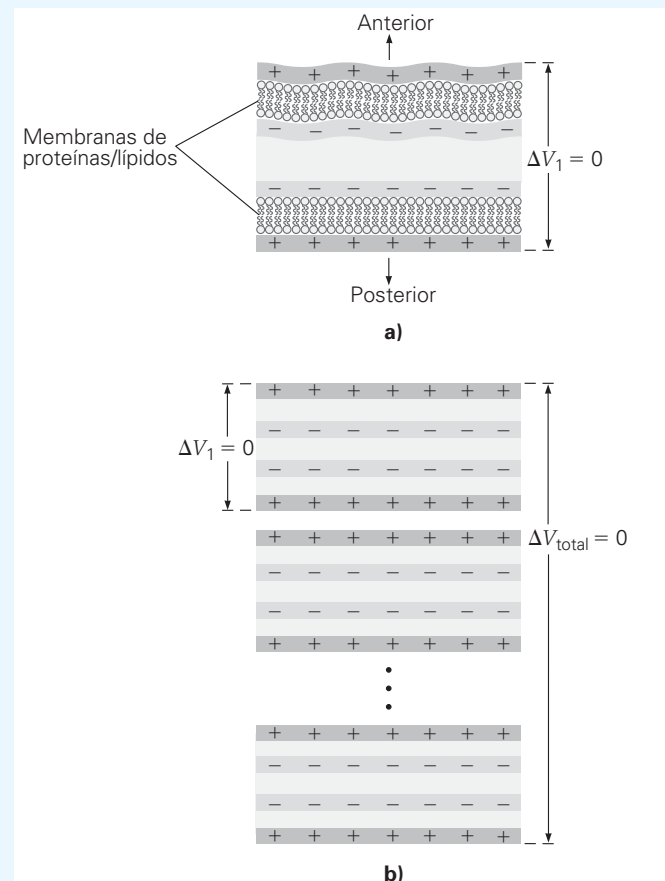


FIGURA 2 a) Una sola electroplaca en reposo Una de las miles de electroplacas en los órganos de la anguila tiene, en condiciones de reposo, iguales cantidades de carga positiva en la parte superior y en la inferior, lo que da por resultado un voltaje de 0. **b) Electroplacas en reposo conectadas en serie** Varios miles de electroplacas en serie, en condiciones de reposo, tienen un voltaje total de 0.

(continúa en la siguiente página)

Sin embargo, cuando una anguila localiza a su presa, su cerebro envía una señal a través de una neurona sólo a la *membrana inferior* de cada electroplaca (en la figura 3a se ilustra una célula). Una sustancia química (*acetilcolina*) se difunde a través de la sinapsis sobre la membrana, abriendo brevemente canales de iones y permitiendo que entre el Na^+ . Por unos cuantos milisegundos, se invierte la polaridad de la membrana inferior, creando un voltaje a través de la célula de $\Delta V_1 \approx 0.15 \text{ V}$. La columna entera de electroplacas realiza esto de manera simultánea, generando un gran voltaje entre los extremos de la columna ($\Delta V_{\text{total}} \approx 4000 \Delta V_1 = 600 \text{ V}$; véase la figura 3b). Cuando la anguila toca a su presa con los extremos de la columna de células, el pulso de corriente resultante que transmite a la presa (aproximadamente de 0.5 A) entrega suficiente energía para matarla o, al menos, para inmovilizarla.

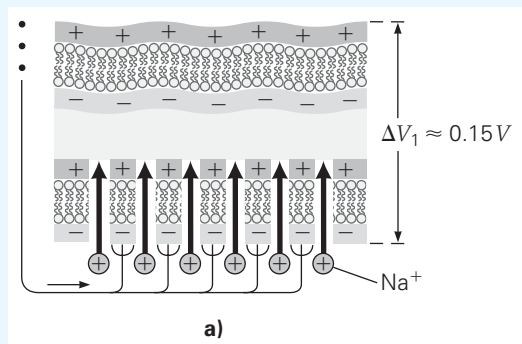
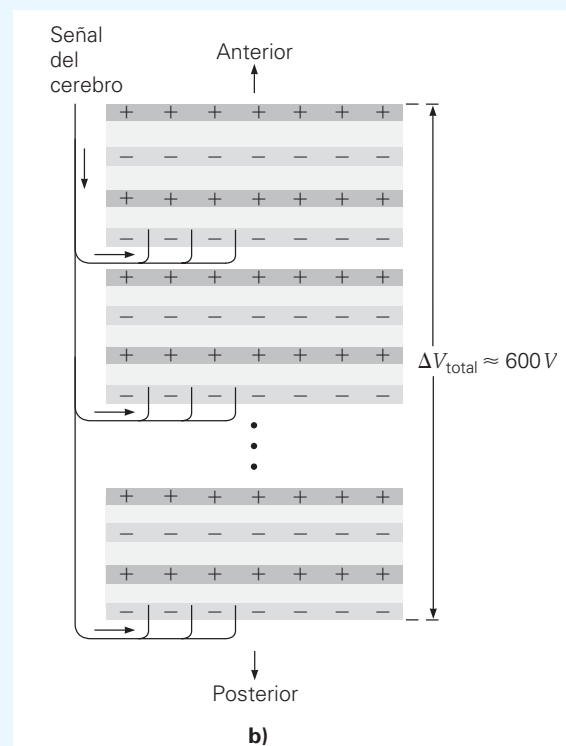


FIGURA 3 a) Una electroplaca en acción En la localización de la presa, una señal se envía desde el cerebro de la anguila a cada electroplaca a lo largo de una neurona conectada sólo a la parte inferior de la placa. Esto desencadena la breve apertura del canal de iones, permitiendo que los iones de Na^+ , entren e invierte temporalmente la polaridad en la membrana inferior. De esta forma, se registra una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) temporal entre las membranas superior e inferior. El voltaje de cada electroplaca, generalmente, es de varias décimas de volt. **b) Una columna de electroplacas en serie en acción** Cuando cada electroplaca en la columna es activada por la señal de la neurona inferior, esto da por resultado un gran voltaje entre la parte superior e inferior de la columna, por lo general, de unos 600 V . Este gran voltaje permite que la anguila aplique un pulso de corriente equivalente a varias décimas de un amperé al cuerpo de la presa. La energía depositada en la presa es suficiente para inmovilizarla o matarla.

Una configuración biológica interesante de “cableado” permite que todas las electroplacas se activen de manera simultánea, un requisito fundamental para la generación del máximo voltaje. Como cada electroplaca está a diferente distancia del cerebro, el potencial de acción que viaja por las neuronas debe estar perfectamente cronometrado. Para lograrlo, las neuronas conectadas a la parte superior de la columna de electroplacas (más cercana al cerebro) son más largas y más delgadas que aquellas conectadas con la parte inferior. A partir de lo que usted sabe sobre resistencia (véase, por ejemplo, la explicación de la ecuación 3.3 y de $R \propto L/A$, resulta claro que tanto una reducción en el área como un aumento en la longitud de las neuronas sirven para incrementar la resistencia de las neuronas en comparación con la de aquellas conectadas a electroplacas más distantes. El aumento de resistencia significa que el potencial de acción viaja más lentamente a través de las neuronas más cercanas y, por lo tanto, permite que las electroplacas que están más cerca reciban su señal al mismo tiempo que las más distantes, una aplicación muy interesante de la física (por supuesto, desde la perspectiva de la anguila, no de la presa.)



Nota: no confunda resistividad con densidad de masa, que tienen el mismo símbolo (ρ).

Resistividad

La resistencia de un objeto está determinada parcialmente por las propiedades atómicas del material que lo constituye, descritas cuantitativamente por la **resistividad** (ρ) del material. La resistencia de un objeto de sección transversal uniforme está dada por

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (3.3)$$

Unidad SI de resistividad: ohm-metro ($\Omega \cdot \text{m}$)

Las unidades de resistividad (ρ) son ohm-metros ($\Omega \cdot \text{m}$). (Usted debería demostrar esto.) Así, si se conoce la resistividad (del tipo del material) y utilizando la ecuación 3.3, podemos calcular la resistencia de cualquier objeto con área constante, siempre que se conozcan su longitud y área transversal.

TABLA 3.1 Resistividades (a 20°C) y coeficientes de temperatura de la resistividad para varios materiales*

| | ρ ($\Omega \cdot m$) | α (1/C°) | | ρ ($\Omega \cdot m$) | α (1/C°) |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| <i>Conductores</i> | | | <i>Semiconductores</i> | | |
| Aluminio | 2.82×10^{-8} | 4.29×10^{-3} | Carbono | 3.6×10^{-5} | -5.0×10^{-4} |
| Cobre | 1.70×10^{-8} | 6.80×10^{-3} | Germanio | 4.6×10^{-1} | -5.0×10^{-2} |
| Hierro | 10×10^{-8} | 6.51×10^{-3} | Silicio | 2.5×10^2 | -7.0×10^{-2} |
| Mercurio | 98.4×10^{-8} | 0.89×10^{-3} | | | |
| Nicromo (aleación de níquel y cromo) | 100×10^{-8} | 0.40×10^{-3} | <i>Aislantes</i> | | |
| Níquel | 7.8×10^{-8} | 6.0×10^{-3} | Vidrio | 10^{12} | |
| Platino | 10×10^{-8} | 3.93×10^{-3} | Caucho | 10^{15} | |
| Plata | 1.59×10^{-8} | 4.1×10^{-3} | Madera | 10^{10} | |
| Tungsteno | 5.6×10^{-8} | 4.5×10^{-3} | | | |

*Los valores para los semiconductores son generales, y las resistividades para los aislantes son órdenes de magnitud típicas.

Los valores de resistividad de algunos conductores, semiconductores y aislantes se presentan en la tabla 3.1. Los valores son aplicables a 20°C, porque la resistividad puede depender de la temperatura. Los cables más comunes están hechos de cobre o aluminio con áreas de sección transversal de 10^{-6} m^2 o 1 mm^2 . Para una longitud de 1.5 m, usted seguramente podrá demostrar que la resistencia de un cable de cobre con esta área es aproximadamente de 0.025Ω (= $25 \text{ m}\Omega$). Esto explica por qué las resistencias de los cables se ignoran en los circuitos (sus valores son mucho menores que la mayoría de los aparatos domésticos).

Una aplicación médica interesante y potencialmente importante implica la medición de la resistencia del ser humano y su relación con la grasa corporal. (Véase la sección A fondo sobre el análisis de la impedancia bioeléctrica en la p. 76.) Para tener una idea de las magnitudes de estas cantidades en los tejidos vivos, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 3.4 ■ Anguilas eléctricas: ¿cocinando con bioelectricidad?

Suponga que una anguila eléctrica toca la cabeza y cola de un pez con forma cilíndrica y que le aplica un voltaje de 600 V. (Véase la sección A fondo 3.1 en la p. 73.) Si la corriente resultante es de 0.80 A (que probablemente matará a la presa), estime la resistividad promedio de la carne del pez, suponiendo que éste mide 20 cm de longitud y 4.0 cm de diámetro.

Razonamiento. Si el pez tiene una forma cilíndrica y conocemos su longitud, podemos determinar su área transversal a partir de las dimensiones que nos dan. Por lo que se refiere a su resistencia, podemos determinarla a partir del voltaje y de la corriente. Por último, su resistividad se estimará utilizando la ecuación 3.3.

Solución. Se listan los datos:

Dado: $L = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$ **Encuentre:** f (resistividad)
 $d = 4.0 \text{ cm} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $V = 600 \text{ V}$
 $I = 0.80 \text{ A}$

El área transversal del pez es

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{\pi(2.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{4} = 3.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

También se sabe que la resistencia general del pez es $R = \frac{V}{I} = \frac{600 \text{ V}}{0.80 \text{ A}} = 7.5 \times 10^2 \Omega$. A partir de la ecuación 3.3, se tiene

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{(7.5 \times 10^2 \Omega)(3.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{0.20 \text{ m}} = 1.2 \Omega \cdot \text{m} \text{ o bien } 120 \Omega \cdot \text{cm}$$

(continúa en la siguiente página)

Al comparar este resultado con los valores en la tabla 3.1, se podrá ver —como se esperaba— que la carne del pez es mucho más resistiva que los metales, pero, por supuesto, no es un gran aislante. El valor está en el rango de las resistividades que se han medido en diferentes tejidos humanos; por ejemplo, el músculo cardiaco tiene una resistividad de $175 \Omega \cdot \text{cm}$, y el hígado de $200 \Omega \cdot \text{cm}$. Resulta claro que nuestra respuesta es un promedio de todo el cuerpo del pez y no nos dice nada acerca de las diferentes partes de su organismo.

Ejercicio de refuerzo. Suponga que para su siguiente comida, la anguila de este ejemplo elige una especie diferente de pez, que tiene el doble de la resistividad promedio, la mitad de la longitud y la mitad del diámetro del primer pez. ¿Qué corriente se esperaría en este pez si la anguila le aplica 400 V en el cuerpo?

Para muchos materiales, especialmente los metales, la dependencia de la resistividad con respecto a la temperatura es casi lineal si el cambio de temperatura no es demasiado grande. Esto es, la resistividad a una temperatura T después de un cambio de temperatura $\Delta T = T - T_0$ está dada por

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad \begin{array}{l} \text{variación de la resistividad} \\ \text{por la temperatura} \end{array} \quad (3.4)$$

donde α es una constante (generalmente sólo en un cierto rango de temperatura) llamada **coeficiente de temperatura de la resistividad** y ρ_0 es una resistividad de referencia a T_0 (por lo general a 20°C). La ecuación 3.4 se rescribe como

$$\Delta\rho = \rho_0\alpha\Delta T \quad (3.5)$$

Nota: compare la forma de la ecuación 3.5 con la ecuación 8.10 para la expansión lineal de un sólido.

donde $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ es el cambio en resistividad que ocurre cuando la temperatura cambia en ΔT . La razón $\Delta\rho/\rho_0$ es adimensional, por lo que α tiene unidades de grados Celsius a la inversa, que se escriben como $1/^\circ\text{C}$. Físicamente, α representa el cambio fraccional en resistividad ($\Delta\rho/\rho_0$) por grado Celsius. Los coeficientes de temperatura de la resistividad para algunos materiales se presentan en la tabla 3.1. Se supone que esos coeficientes son constantes en rangos normales de temperatura. Observe que para los semiconductores y los aislantes, los coeficientes, en general, son órdenes de magnitud y no son constantes.

A FONDO 3.2 ANÁLISIS DE IMPEDANCIA BIOELÉCTRICA (AIB)

Los métodos tradicionales (y poco precisos) para determinar los porcentajes de grasa en el cuerpo humano implican el uso de tanques de flotación (para mediciones de densidad) o de calibres para medir el grosor de la masa corporal. En años recientes, se han diseñado experimentos de resistencia eléctrica para medir la grasa del cuerpo humano.* En teoría, esas mediciones (llamadas *análisis de impedancia bioeléctrica* o AIB) tienen el potencial para determinar, con más precisión que los métodos tradicionales, el contenido total de agua en el cuerpo, la masa de grasa libre y la grasa corporal (*tejido adiposo*).

El principio del AIB se basa en el contenido de agua del cuerpo humano. El agua en el cuerpo humano es relativamente un buen conductor de la corriente eléctrica, gracias a la presencia de iones como el potasio (K^+) y el sodio (Na^+). Como el tejido muscular guarda más agua por kilogramo que la grasa, es un mejor conductor que esta última. Así, para un voltaje dado, la diferencia en corrientes debería ser un buen indicador del porcentaje de grasa y músculo presentes en el cuerpo.

En la práctica, al realizar un AIB, un electrodo con un bajo voltaje se conecta a la muñeca y el otro al tobillo opuesto. Por fines de seguridad, la corriente se mantiene por debajo de 1 mA, siendo comunes las de $800 \mu\text{A}$. El paciente no percibe esta pe-

queña corriente. Los valores típicos de la resistencia son de aproximadamente 250Ω . A partir de la ley de Ohm, podemos estimar el voltaje requerido: $V = IR = (8 \times 10^{-4} \text{ A})(250 \Omega) = 0.200 \text{ V}$, o aproximadamente 200 mV. En realidad, el voltaje alterna en polaridad a una frecuencia de 50 kHz, porque se sabe que este rango de frecuencia no activa eléctricamente tejidos excitables, como los nervios y el músculo cardiaco.

Seguramente usted comprende algunos de los factores implicados en interpretar los resultados de las mediciones de la resistencia humana. La resistencia que se mide es en realidad la resistencia total. Sin embargo, la corriente viaja no a través de un conductor uniforme, sino más bien por el brazo, tronco y pierna. Cada una de esas partes del cuerpo no sólo tiene una proporción diferente de grasa y músculo, lo que afecta la resistividad (ρ), sino que todas ellas tienen diferente longitud (L) y área transversal (A). Así, el brazo y la pierna, constituidos en su mayor parte por músculo, y con una pequeña área transversal, ofrecen la mayor resistencia. Por el contrario, el tronco, que por lo general contiene un porcentaje relativamente alto de grasa y que tiene una área transversal grande, presenta una resistencia baja.

Al someter el AIB al análisis estadístico, los investigadores esperan entender cómo el amplio rango de parámetros físicos y genéticos presentes en los seres humanos afectan las mediciones de la resistencia. Entre esos parámetros están la altura, el peso, la complexión y el origen étnico. Una vez comprendidas las correlaciones, el AIB se convierte en una valiosa herramienta médica en el diagnóstico de diversas enfermedades.

*Técnicamente, este procedimiento mide la *impedancia* del cuerpo, lo que incluye efectos de capacitancia y efectos magnéticos, así como la resistencia. Sin embargo, estas contribuciones representan un 10% del total. Así que la palabra que usaremos aquí es la de *resistencia*.

La resistencia es directamente proporcional a la resistividad (ecuación 3.3). Esto significa que la resistencia de un objeto presenta la misma dependencia con respecto a la temperatura que la resistividad (ecuaciones 3.3 y 3.4). La resistencia de un objeto de sección transversal uniforme varía en función de la temperatura:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad \text{o} \quad \Delta R = R_0\alpha\Delta T \quad \begin{array}{l} \text{variación de la resistencia} \\ \text{con la temperatura} \end{array} \quad (3.6)$$

Aquí, $\Delta R = R - R_0$ es el cambio en la resistencia relativa con respecto a su valor de referencia R_0 , que generalmente se toma a 20°C . La variación de la resistencia con la temperatura ofrece una forma de medir temperaturas por medio de un *termómetro de resistencia eléctrica*, como se ilustra en el siguiente ejemplo:

Ejemplo 3.5 ■ Un termómetro eléctrico: variación de la resistencia con la temperatura

Un alambre de platino tiene una resistencia de 0.50Ω a 0°C , y es puesto en un baño de agua, donde su resistencia se eleva a un valor final de 0.60Ω . ¿Cuál es la temperatura del baño?

Razonamiento. A partir del coeficiente de temperatura de la resistividad para el platino que se indica en la tabla 3.1, podemos despejar ΔT de la ecuación 3.6 y sumarla a 0°C , la temperatura inicial, para encontrar la temperatura del baño.

Solución.

Dado: $T_0 = 0^\circ\text{C}$

$R_0 = 0.50 \Omega$

$R = 0.60 \Omega$

$\alpha = 3.93 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ (tabla 3.1)

Encuentre: T (temperatura del baño)

La razón $\Delta R/R_0$ es el cambio fraccional en la resistencia inicial R_0 (a 0°C). Despejamos ΔT de la ecuación 3.6, usando los valores dados:

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{\alpha R_0} = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{0.60 \Omega - 0.50 \Omega}{(3.93 \times 10^{-3}/^\circ\text{C})(0.50 \Omega)} = 51^\circ\text{C}$$

Así, el baño está a $T = T_0 + \Delta T = 0^\circ\text{C} + 51^\circ\text{C} = 51^\circ\text{C}$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si el material hubiera sido cobre, para el cual $R_0 = 0.50 \Omega$, en vez de platino, ¿cuál sería su resistencia a 51°C ? A partir de ello, usted podría explicar qué material constituye el termómetro más "sensible": uno con un alto coeficiente de temperatura de resistividad o uno con un bajo valor.

Superconductividad

El carbono y otros semiconductores tienen coeficientes de temperatura de resistividad negativos. Sin embargo, muchos materiales tienen coeficientes de temperatura de resistividad positivos, por lo que sus resistencias aumentan conforme se incrementa la temperatura. Usted quizá se pregunte cuánto se reduce la resistencia eléctrica al bajar la temperatura. En ciertos casos, la resistencia puede llegar a cero, es decir, no sólo cerca de cero, sino *exactamente* cero. Este fenómeno se llama **superconductividad**, y fue Heike Kamerlingh Onnes, un físico holandés, quien lo descubrió en 1911. Actualmente, las temperaturas requeridas para estos materiales son de 100 K o menores, y su uso está restringido a aparatos de laboratorio de alta tecnología y equipo de investigación.

Sin embargo, la superconductividad tiene potencial para diversas aplicaciones novedosas e importantes, especialmente si se encuentran materiales cuya temperatura de superconducción esté cercana a la temperatura ambiente. Entre las aplicaciones están los imanes superconductores (que se utilizan ya en laboratorios y en unidades de propulsión naval a pequeña escala). Si no hay resistencia, son posibles corrientes elevadas y campos magnéticos de gran intensidad (capítulo 5). Utilizados en motores y máquinas, los electromagnetos superconductores serían más eficientes y entregarían más potencia para la misma entrada de energía. Los superconductores también podrían usarse como cables de transmisión de electricidad sin pérdidas por resistividad. Algunos imaginan memorias de computadoras sumamente rápidas a base superconductores. La ausencia de resistencia eléctrica abre un sinfín de posibilidades. Es probable que usted escuche más acerca de las aplicaciones de los superconductores en el futuro conforme se desarrollen nuevos materiales.

3.4 Potencia eléctrica

OBJETIVOS: a) Definir potencia eléctrica, b) calcular la entrega de potencia de circuitos eléctricos simples y c) explicar el calentamiento de joule y su significado.

Cuando en un circuito existe una corriente sostenida, los electrones reciben energía de la fuente de voltaje, por ejemplo, de una batería. Conforme esos portadores de carga pasan por componentes del circuito, entran en colisión con los átomos del material (es decir, encuentran resistencia) y pierden energía. La energía transferida en las colisiones da por resultado un incremento en la temperatura de los componentes. De esta manera, la energía eléctrica se transforma, por lo menos parcialmente, en energía térmica.

Sin embargo, la energía eléctrica también puede convertirse en otras formas de energía, como luz (en las bombillas eléctricas) y movimiento mecánico (en las perforadoras). De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, cualquier forma que ésta tome, la energía *total* que entrega la batería a los portadores de carga debe transferirse *por completo* a los elementos del circuito (ignorando las pérdidas de energía en los cables). Esto es, al regresar a la fuente de voltaje o batería, un portador de carga pierde toda la energía potencial eléctrica que ganó de esa fuente y está listo para repetir el proceso.

La energía ganada por una cantidad de carga q a partir de una fuente de voltaje (voltaje V) es qV [en unidades, C(J/C) = J]. En un intervalo de tiempo t , la *tasa* a la que la energía se entrega quizá no sea constante. La tasa promedio de entrega de energía se llama **potencia eléctrica** promedio, \bar{P} , y está dada por

$$\bar{P} = \frac{W}{t} = \frac{qV}{t}$$

En el caso especial en que la corriente y el voltaje son constantes en el tiempo (como sucede con una batería), entonces la potencia promedio es la misma que la potencia en todo momento. Para corrientes constantes (cd), $I = q/t$ (ecuación 3.1). Así, podemos reescribir la ecuación de potencia anterior como:

$$P = IV \quad \text{potencia eléctrica} \quad (3.7a)$$

Como recordará del capítulo 3 de *Física 11*, la unidad SI de potencia es el watt (W). El ampere (la unidad de corriente I) multiplicado por el volt (la unidad de voltaje V) da el joule por segundo (J/s), o watt. (Debería verificar esto.)

Una analogía mecánica visual que ayuda a explicar la ecuación 3.7a se presenta en la [figura 3.12](#), que ilustra un simple circuito eléctrico como un sistema para transferir energía, en analogía a un sistema de entrega por medio de una banda transportadora.

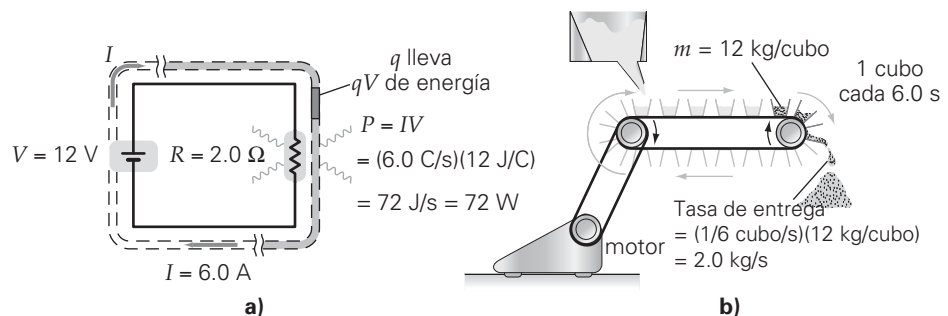
Como $R = V/I$, la potencia puede expresarse en tres formas equivalentes:

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2R \quad \text{potencia eléctrica} \quad (3.7b)$$

► **FIGURA 3.12** Analogía de la potencia eléctrica. Los circuitos eléctricos pueden considerarse como sistemas de entrega de energía muy similares a una banda transportadora. *a*) Imagine la corriente hecha de segmentos consecutivos de carga $q = 1.0$ C, cada uno de los cuales porta $qV = 12$ J de energía que suministra la batería. La corriente es $I = V/R = 6.0$ A, o 6.0 C/s. Así, la potencia (o tasa de entrega de energía) al resistor es $(6.0$ C/s)(12 J/C) = 72 J/s = 72 W. *b*) La banda transportadora comprende una serie de cubos, cada uno de los cuales lleva 12 kg de arena (de forma análoga a la energía que porta cada carga q); un cubo llega a su destino cada 6.0 s (de manera análoga a la corriente I). La tasa de entrega en kg/s es análoga a la potencia en J/s en el inciso *a*.

Calor de joule

A la energía térmica consumida en un resistor portador de corriente se le llama **calor de joule**, o **pérdidas I^2R** (que se lee como “ I cuadrada R ”). En muchos casos (por ejemplo en líneas de transmisión eléctrica), el calor de joule tiene efectos colaterales indeseables. Sin embargo, en otras situaciones, el objetivo principal es la conversión de energía eléctrica a energía térmica. Las aplicaciones térmicas incluyen los elementos



calentadores (quemadores) de las estufas eléctricas, secadores de cabello, calentadores por inmersión y tostadores.

Las bombillas de luz se clasifican de acuerdo con su potencia en watts, por ejemplo, 60 W (►figura 3.13a). Las lámparas incandescentes son relativamente ineficientes como fuentes de luz. Por lo general, menos del 5% de la energía eléctrica se convierte a luz visible; la mayor parte de la energía producida es radiación infrarroja invisible y calor.

Los aparatos eléctricos llevan indicadas sus clasificaciones de potencia. Se dan los requisitos de voltaje y potencia o los de voltaje y corriente (figura 3.13b). En cualquier caso, es posible calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva. Los requisitos de potencia de algunos aparatos domésticos se presentan en la tabla 3.2. Aunque los aparatos más comunes especifican un voltaje de operación nominal de 120 V, hay que hacer notar que el voltaje doméstico varía entre 110 y 120 V y aun así se considera en el rango “normal”.

Ejemplo integrado 3.6 ■ Un dilema moderno: usar la computadora o comer

a) Considere dos aparatos que operan al mismo voltaje. El aparato A tiene una potencia nominal mayor que el aparato B. a) ¿Cómo es la resistencia de A con respecto a la de B? 1) Mayor, 2) menor, o 3) es igual. b) Un sistema de computadora incluye un monitor a color, con un requerimiento de potencia de 200 W, mientras que un horno tostador y asador tiene un requerimiento de 1500 W. ¿Cuál es la resistencia de cada uno si ambos están diseñados para funcionar a 120 V?

a) Razonamiento conceptual. La potencia depende de la corriente y del voltaje. Como los dos aparatos operan al mismo voltaje, no pueden llevar la misma corriente y, por lo tanto, tienen diferentes requerimientos de potencia. Por consiguiente, la respuesta 3 no es correcta. Como ambos aparatos operan con el mismo voltaje, el que tiene mayor potencia (A) debe llevar la mayor corriente. Para que A lleve más corriente al mismo voltaje que B, debe tener menos resistencia que B. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 2; esto es, A tiene menos resistencia que B.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. La definición de resistencia es $R = V/I$ (ecuación 3.2). Para usar esta definición, necesitamos la corriente, que se determina con la ecuación 3.7 ($P = IV$). Esta operación se hará dos veces, una para el monitor y luego para el asador/tostador. Se listan los datos, donde usamos el subíndice m para el monitor y b para el asador/tostador:

Dado: $P_m = 200 \text{ W}$ **Encuentre:** R (resistencia de cada aparato)
 $P_b = 1500 \text{ W}$
 $V = 120 \text{ V}$

La corriente del monitor es (utilizando la ecuación 3.7)

$$I_m = \frac{P_m}{V} = \frac{200 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 1.67 \text{ A}$$

y la del asador/tostador es

$$I_b = \frac{P_b}{V} = \frac{1500 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 12.5 \text{ A}$$

Las resistencias son

$$R_m = \frac{V}{I_m} = \frac{120 \text{ V}}{1.67 \text{ A}} = 71.9 \Omega$$

y

$$R_b = \frac{V}{I_b} = \frac{120 \text{ V}}{12.5 \text{ A}} = 9.60 \Omega$$

Como los dos operan al mismo voltaje, la salida de potencia de un aparato está controlada por su resistencia. La resistencia del aparato está *inversamente* relacionada con su requerimiento de potencia.

Ejercicio de refuerzo. Un calentador de inmersión es un “aparato” común en la mayoría de los dormitorios universitarios, y resulta útil para calentar agua para té, café o sopa. Suponiendo que el 100% del calor va al agua, ¿cuál debe ser la resistencia del calentador (que opera a 120 V) para calentar una taza de agua (cuya masa es de 250 g) de la temperatura ambiente (20°C) al punto de ebullición en 3.00 minutos?



a)



b)

▲ **FIGURA 3.13** Clasificación de potencia a) Las bombillas de luz se clasifican según sus watts. Al operar a 120 V, esta bombilla de 60 W consume 60 J de energía cada segundo. b) Las clasificaciones de los aparatos indican el voltaje y la potencia, o bien, el voltaje y la corriente. A partir de esos datos es posible calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva. Aquí, un aparato es de 120 V y 18 W, mientras que el otro es de 120 V y 300 mA. ¿Podría calcular la corriente y resistencia del primero y la potencia requerida y la resistencia del segundo?

TABLA 3.2 Requerimientos típicos de potencia y corriente para varios dispositivos domésticos (120 V)

| Aparato | Potencia | Corriente | Aparato | Potencia | Corriente |
|--------------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Acondicionador de aire de habitación | 1500 W | 12.5 A | Calentador portátil | 1500 W | 12.5 A |
| Acondicionador de aire central | 5000 W | 41.7 A* | Horno de microondas | 900 W | 5.2 A |
| Mezcladora | 800 W | 6.7 A | Radio, reproductor de casetes | 14 W | 0.12 A |
| Secador de ropa | 6000 W | 50 A* | Refrigerador, no formador de escarcha | 500 W | 4.2 A |
| Lavadora de ropa | 840 W | 7.0 A | Estufa, quemadores superiores | 6000 W | 50.0 A* |
| Cafetera | 1625 W | 13.5 A | Estufa, horno | 4500 W | 37.5 A* |
| Lavavajillas | 1200 W | 10.0 A | Televisión a color | 100 W | 0.83 A |
| Cobertor eléctrico | 180 W | 1.5 A | Tostador | 950 W | 7.9 A |
| Secadora de cabello | 1200 W | 10.0 A | Calentador de agua | 4500 W | 37.5 A* |

*Un aparato de alta potencia como éste se conecta a un suministro casero de 240 V para reducir la corriente a la mitad de esos valores (sección 4.5).

Ejemplo 3.7 ■ Una reparación potencialmente peligrosa: ¡nunca lo intente!

Una secadora de cabello está clasificada a 1200 W para un voltaje de operación de 115 V. El filamento del cable uniforme se rompe cerca de un extremo, y el propietario lo repara cortando una sección cerca de la ruptura y simplemente lo reconecta. Entonces, el filamento es 10.0% más corto que su longitud original. ¿Cuál será la salida de potencia del aparato después de esta “reparación”?

Razonamiento. El cable siempre opera a 115 V. Así que al acortar el cable, lo que disminuye su resistencia, dará por resultado una mayor corriente. Con este aumento de corriente, uno esperaría que se incrementa la salida de potencia.

Solución. Usaremos el subíndice 1 para indicar la situación “antes de la ruptura” y el subíndice 2 para “después de la reparación”. Se listan los datos,

Dado: $P_1 = 1200 \text{ W}$ **Encuentre:** P_2 (salida de potencia después de la reparación)
 $V_1 = V_2 = 115 \text{ V}$
 $L_2 = 0.900L_1$

Después de la reparación, el cable tiene el 90.0% de su resistencia original, porque (véase la ecuación 3.3) la resistencia de un cable es directamente proporcional a su longitud. Para mostrar la reducción del 90% de forma explícita, vamos a expresar la resistencia después de la reparación ($R_2 = \rho L_2/A$) en términos de la resistencia original ($R_1 = \rho L_1/A$):

$$R_2 = \rho \frac{L_2}{A} = \rho \frac{0.900L_1}{A} = 0.900 \left(\rho \frac{L_1}{A} \right) = 0.900R_1$$

como se esperaba.

La corriente aumentará porque el voltaje es el mismo ($V_2 = V_1$). Este requerimiento se expresa como $V_2 = I_2R_2 = V_1 = I_1R_1$. De manera que la nueva corriente en términos de la corriente original es

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) I_1 = \left(\frac{R_1}{0.900R_1} \right) I_1 = (1.11)I_1$$

lo que significa que la corriente después de la reparación es 11% mayor que antes.

La potencia original es $P_1 = I_1V = 1200 \text{ W}$. La potencia después de la reparación es $P_2 = I_2V$ (observe que los voltajes no tienen subíndices porque permanecieron igual y se anularán). Expresando una razón da

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2V}{I_1V} = \frac{I_2}{I_1} = 1.11$$

de donde se despeja P_2 :

$$P_2 = 1.11P_1 = 1.11(1200 \text{ W}) = 1.33 \times 10^3 \text{ W}$$

La salida de potencia de la secadora aumentó 120 W. ¡Nunca intente hacer ese trabajo de reparación!

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, determine a) las resistencias inicial y final y b) las corrientes inicial y final.

A menudo nos quejamos acerca de lo que tenemos que pagar por consumo de electricidad, pero ¿por qué pagamos en realidad? Lo que pagamos es *energía* eléctrica medida en unidades de **kilowatt-hora (kWh)**. La potencia es la tasa a la que se realiza trabajo ($P = W/t$ o $W = Pt$), por lo que el trabajo tiene unidades de watt-segundo (potencia \times tiempo). Al convertir esta unidad a la mayor unidad de kilowatt-horas (kWh), vemos que el kilowatt-hora es una unidad de trabajo (o energía), equivalente a 3.6 millones de joules, porque:

$$1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W})(3600 \text{ s}) = (1000 \text{ J/s})(3600 \text{ s}) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

Así, pagamos a la compañía de “luz” la energía eléctrica que usamos para efectuar trabajo con nuestros aparatos domésticos.

El costo de la energía eléctrica varía según el lugar. En Estados Unidos, el costo va de unos cuantos centavos de dólar (por kilowatt-hora) a varias veces ese valor. En los últimos años, las tarifas de energía eléctrica se han liberado. Aunada a una creciente demanda (sin un aumento correspondiente en el suministro), la eliminación del control de precios ha provocado un aumento estratosférico en las tarifas en algunas zonas del país. ¿Sabe cuál es el precio de la electricidad en su localidad? Consulte una tabla de tarifas para averiguarlo, especialmente si usted vive en alguna de las áreas afectadas por el alza de tarifas. Veamos cuál es el costo de la electricidad para operar un aparato doméstico en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 3.8 ■ Costo de la energía eléctrica: el precio del enfriamiento

Si el motor de un refrigerador que no forma escarcha funciona el 15% del tiempo, ¿cuánto cuesta operarlo por mes (al centavo más cercano) si la compañía de luz cobra 11 centavos por kilowatt-hora? (Suponga que el mes es de 30 días.)

Razonamiento. De la potencia y la cantidad de tiempo que el motor está encendido por día, podemos calcular la energía eléctrica que consume el refrigerador *diariamente* y luego calcularla para un mes de 30 días.

Solución. Al hablar de cantidades de energía eléctrica, se usan kilowatts-horas porque el joule es una unidad relativamente pequeña. Se listan los datos:

Dado: $P = 500 \text{ W}$ (tabla 17.2) **Encuentre:** costo de operación por mes
Costo = \$0.11/kWh

Como el motor del refrigerador opera el 15% del tiempo, en un día funciona $t = (0.15)(24 \text{ h}) = 3.60 \text{ h}$. Como $P = W/t$, la energía eléctrica que se consume *por día*, es

$$W = Pt = (500 \text{ W})(3.60 \text{ h/día}) = 1.80 \times 10^3 \text{ Wh} = 1.80 \text{ kWh/día}$$

Entonces, el costo por día es

$$\left(\frac{1.80 \text{ kWh}}{\text{día}}\right)\left(\frac{\$0.11}{\text{kWh}}\right) = \frac{\$0.20}{\text{día}}$$

o 20 centavos por día. Así, para un mes de 30 días el costo es

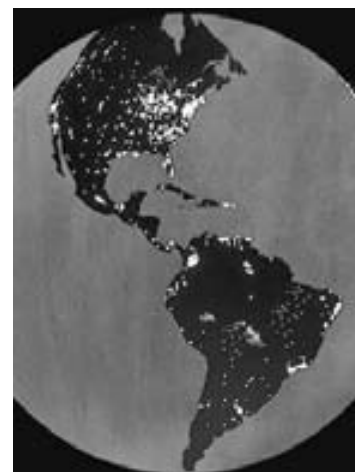
$$\left(\frac{\$0.20}{\text{día}}\right)\left(\frac{30 \text{ día}}{\text{mes}}\right) \approx \$6 \text{ por mes}$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Cuánto tiempo tendría usted que dejar encendida una bombilla de luz de 60 W para usar la misma cantidad de energía eléctrica que el motor del refrigerador en este ejemplo consume cada hora que está encendido?

Eficiencia eléctrica y recursos naturales

Aproximadamente el 25% de la electricidad generada en Estados Unidos se usa para el alumbrado (►figura 3.14). Este porcentaje es casi equivalente a la producción de 100 plantas generadoras de electricidad. Los refrigeradores consumen aproximadamente el 7% de la electricidad generada en Estados Unidos (lo que equivale a la producción de 28 plantas generadoras).

Este enorme (y creciente) consumo de energía eléctrica en Estados Unidos, ha inducido al gobierno federal y a muchos gobiernos estatales a establecer límites mínimos de eficiencia para refrigeradores, congeladores, sistemas acondicionadores de aire y calenta-



▲ **FIGURA 3.14** Todo iluminado
Una imagen nocturna del Continente Americano tomada desde un satélite. ¿Podría identificar los principales centros de población en Estados Unidos y en otros países? Las manchas en el centro de Sudamérica indican incendios forestales. La pequeña mancha al sur de México representa las llamas del gas ardiendo en los sitios de producción de petróleo. En el extremo superior derecho de la imagen alcanzan a verse las luces de algunas ciudades europeas. La imagen fue registrada por un sistema de infrarrojo visible.



▲ **FIGURA 3.15** Guía de energía
Los consumidores pueden conocer las eficiencias de los aparatos domésticos en términos del costo anual promedio de operación. En algunos casos, el costo anual está dado para diferentes tarifas de kilowatt-hora (kWh), que varían en diferentes zonas de Estados Unidos.

dores de agua (figura 3.15). Además, se han desarrollado lámparas fluorescentes más eficientes y se ha generalizado su uso. Estas lámparas ahora consumen aproximadamente entre 25 y 30% menos de energía que la lámpara fluorescente promedio y cerca del 75% menos de energía que las lámparas incandescentes con salida de luz equivalente.

El resultado de todas esas medidas ha sido un ahorro considerable de energía conforme los nuevos aparatos más eficientes reemplazan gradualmente a los antiguos modelos menos eficientes. La energía ahorrada se traduce directamente en ahorro de combustible y de otros recursos naturales, así como en una reducción de los daños ambientales, tales como la contaminación química y el calentamiento global. Para ver qué tipo de resultados se logran aplicando un estándar de eficiencia de energía, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 3.9 ■ Lo que podemos ahorrar: incremento de la eficiencia eléctrica

La mayoría de las plantas modernas generadoras de potencia producen electricidad a razón de 1.0 GW (salida de gigawatt de potencia eléctrica). Estime cuántas menos de esas plantas necesitaría el estado de California, si todas las casas habitación cambiaran sus refrigeradores de 500 W del ejemplo 3.8 a refrigeradores más eficientes de 400 W. (Suponga que hay aproximadamente 10 millones de hogares en California con un promedio de 1.2 refrigeradores operando por hogar.)

Razonamiento. Los resultados del ejemplo 3.8 se utilizarán para calcular el efecto total.

Solución.

Dado: Tasa de la planta = 1.0 GW = 1.0×10^6 kW **Encuentre:** ¿cuántas plantas
Requisito de energía, modelo de generadoras menos se
500 watts = 1.80 kWh/día (ejemplo 3.8) requerirán al cambiar a
Número de hogares = 10×10^6 refrigeradores más
Número de refrigeradores por hogar = 1.2 eficientes?

Para todo el estado, el uso de energía por día con refrigeradores menos eficientes es

$$\left(\frac{1.80 \text{ kWh/día}}{\text{refrigerador}}\right)(10 \times 10^6 \text{ hogares})\left(\frac{1.2 \text{ refrigeradores}}{\text{hogar}}\right) = 2.2 \times 10^7 \frac{\text{kWh}}{\text{día}}$$

Los refrigeradores más eficientes en su uso de energía, usan sólo el 80% ($400 \text{ W}/500 \text{ W} = 0.80$) de esta cantidad, o aproximadamente $1.7 \times 10^7 \text{ kWh/día}$. La diferencia, $5.0 \times 10^6 \text{ kWh/día}$, es la razón a la que se ahorra energía eléctrica. Una planta generadora de 1.0 GW produce

$$\left(1.0 \times 10^6 \frac{\text{kW}}{\text{planta}}\right)\left(24 \frac{\text{h}}{\text{día}}\right) = 2.4 \times 10^7 \frac{\text{kWh/planta}}{\text{día}}$$

De manera que los refrigeradores de reemplazo ahorrarían aproximadamente

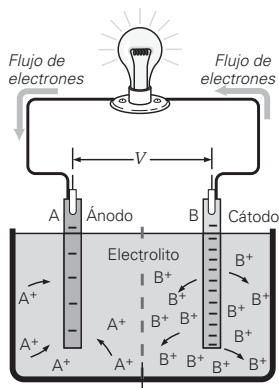
$$\frac{5.0 \times 10^6 \text{ kWh/día}}{2.4 \times 10^7 \text{ kWh/(planta-día)}} = 0.21 \text{ planta}$$

o cerca del 20% de la producción de una planta típica. Adverta que este ahorro sería resultado del cambio de un *solo* aparato doméstico. Imagine lo que podría hacerse si todos los aparatos domésticos, incluidos los que se encargan de la iluminación, fueran más eficientes. El desarrollo y uso de aparatos eléctricos más eficientes es la manera de evitar tener que construir nuevas plantas generadoras de energía eléctrica.

Ejercicio de refuerzo. Se dice a menudo que los calentadores de agua, eléctricos y de gas son igualmente eficientes, con aproximadamente 95% de eficiencia. En realidad, mientras que los calentadores de gas alcanzan una eficiencia del 95%, sería más preciso decir que los calentadores eléctricos de agua tienen un 33% de eficiencia, aun cuando aproximadamente el 95% de la *energía eléctrica* que consumen se transfiere al agua en forma de calor. Explique esta situación. [Sugerencia: ¿cuál es la fuente de energía de un calentador eléctrico de agua? Compare esto con la energía que entrega el gas natural. Recuerde el análisis de generación eléctrica en la sección 10.4 y la eficiencia de Carnot en la sección 10.5 de *Física 11*.]

Repaso del capítulo

- Una **batería** genera una **fuerza electromotriz (fem)**, o un voltaje, entre sus terminales. La terminal de alto voltaje es el **ánodo**, y la terminal de bajo voltaje es el **cátodo**.

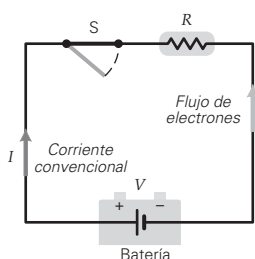


- La **fuerza electromotriz (fem \mathcal{E})** se mide en volts y representa el número de joules de energía que una batería (o cualquier suministro de potencia) entrega a 1 coulomb de carga que pasa a través de ella ($1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$).



- La **corriente eléctrica (I)** es la razón a la que fluye la carga. Su dirección es la de la **corriente convencional**, que es en la dirección en que la carga positiva realmente fluye o parece fluir. En los metales, el flujo de carga se debe a los electrones y, por consiguiente, la dirección de la corriente convencional es contraria a la dirección de flujo de los electrones. La corriente se mide en amperes ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$) como

$$I = \frac{q}{t} \tag{3.1}$$

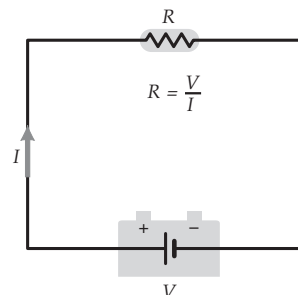


- Para que una corriente eléctrica exista en un circuito, éste debe ser un **circuito completo**, es decir, un circuito (o conjunto de elementos de circuito y cables) que conecte ambas terminales de una batería o suministro de potencia sin interrupción.

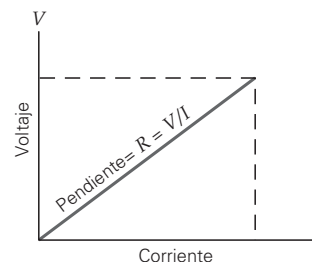
- La **resistencia eléctrica (R)** de un objeto es el voltaje a través del objeto dividido entre la corriente en ella, o

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{o} \quad V = IR \tag{3.2}$$

Las unidades de resistencia son el **ohm** o el volt por amper.

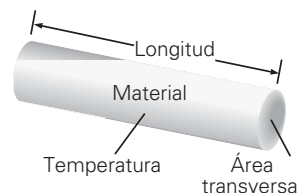


- Un elemento de circuito obedece la **ley de Ohm** si ese elemento presenta una resistencia eléctrica constante. La ley de Ohm se escribe comúnmente como $V = IR$, donde R es constante.



- La resistencia de un objeto depende de la **resistividad (ρ)** del material del que está hecho (propiedades atómicas), del área transversal A , y de la longitud L . Para objetos con sección transversal uniforme,

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \tag{3.3}$$



- La **potencia eléctrica (P)** es la tasa a la que una batería (suministro de potencia) efectúa trabajo, o la tasa a la que se transfiere energía a un elemento de un circuito. La entrega de potencia a un elemento de un circuito depende de la resistencia del elemento, de la corriente en él y del voltaje que se le aplica. La potencia eléctrica se expresa de tres maneras equivalentes:

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2R \tag{3.7b}$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

En este capítulo suponga que todas las baterías tienen una resistencia interna insignificante a menos que se indique lo contrario.

3.1 Baterías y corriente directa

- OM** Cuando una batería es parte de un circuito completo, el voltaje a través de sus terminales es su *a)* fem, *b)* voltaje terminal, *c)* salida de potencia, *d)* todas las opciones anteriores son válidas.
- OM** Conforme una batería envejece, su *a)* fem aumenta, *b)* fem disminuye, *c)* voltaje terminal aumenta, *d)* voltaje terminal disminuye.
- OM** Cuando cuatro baterías de 1.5 V se conectan, el voltaje de salida de la combinación es 1.5. Estas baterías están conectadas *a)* en serie, *b)* en paralelo, *c)* un par están conectadas en paralelo y el otro par en serie, *d)* ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
- OM** Cuando se ayuda a alguien cuyo automóvil tiene una batería "muerta", ¿cómo debería conectarse la batería del automóvil de usted en relación con la batería "muerta"? *a)* En serie, *b)* en paralelo o *c)* tanto en serie como en paralelo funcionaría bien.
- OM** Cuando varias baterías de 1.5 V están conectadas en serie, la salida de voltaje total de la combinación se mide en 12 V. ¿Cuántas baterías se necesitan para obtener este voltaje? *a)* Dos, *b)* diez, *c)* ocho o *d)* seis.
- PC** ¿Por qué el diseño de la batería que se ilustra en la figura 17.1 requiere una membrana química?
- PC** Se mide el voltaje de una batería mientras se encuentra sobre el banco de trabajo y un técnico lee la especificación del fabricante, que es de 12 V. ¿Esto significa que funcionará como se espera cuando se coloque en el circuito completo? Explique su respuesta.
- PC** Dibuje los siguientes circuitos *completos*, utilizando los símbolos mostrados en la sección Aprender dibujando de la p. 69. *a)* Dos baterías ideales de 6.0 V en serie conectadas a un condensador seguido de un resistor. *b)* Dos baterías ideales de 12.0 V en paralelo, conectadas como una unidad a dos resistores idénticos en serie uno con otro. *c)* Una batería no ideal (una con resistencia interna) conectada a dos condensadores idénticos que están en paralelo uno con otro, seguidos de dos resistores en serie uno con otro.
- a)** Tres pilas secas de 1.5 V están conectadas en serie. ¿Cuál es el voltaje total de la combinación? *b)* ¿Cuál sería el voltaje total si las pilas estuvieran conectadas en paralelo?
- a)** ¿Cuál es el voltaje a través de seis baterías de 1.5 V cuando están conectadas *a)* en serie y *b)* en paralelo?
- a)** Dos baterías de 6.0 V y una de 12 V están conectadas en serie. *a)* ¿Cuál es el voltaje a través de todo el arreglo? *b)* ¿Qué arreglo de esas tres baterías daría un voltaje total de 12 V?
- a)** Dadas tres baterías con voltajes de 1.0, 3.0 y 12 V, respectivamente, ¿cuántos voltajes diferentes podrían obtenerse conectando una o más de las baterías en serie o en paralelo, y cuáles serían esos voltajes?
- a)** Se tienen cuatro pilas AA de 1.5 V cada una. Las pilas están agrupadas en pares. En el arreglo A, las dos pilas en cada par están en serie, y luego los pares están conectados en paralelo. En el arreglo B, las dos pilas en cada par están en paralelo y luego los pares están conectados en serie. *a)* Comparado con el arreglo B, ¿el arreglo A tendrá un voltaje total 1) mayor, 2) igual o 3) menor? *b)* ¿Cuáles son los voltajes totales de cada arreglo?

3.2 Corriente y velocidad de deriva

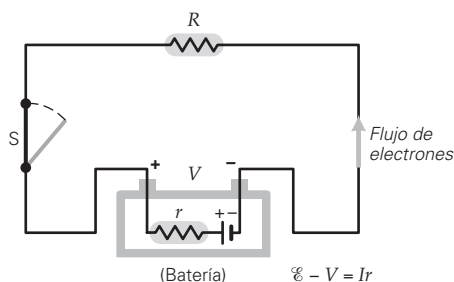
- OM** ¿En cuál de estas situaciones fluye más carga por un punto dado en un cable: cuando este último tiene *a)* una corriente de 2.0 A durante 1.0 min, *b)* 4.0 A durante 0.5 min, *c)* 1.0 A durante 2.0 min o *d)* todas tienen la misma carga.
- OM** ¿Cuál de estas situaciones implica la menor corriente? Un cable que tiene *a)* 1.5 C que pasa por un punto dado en 1.5 min, *b)* 3.0 C que pasan por un punto dado en 1.0 min o *c)* 0.5 C que pasan por un punto dado en 0.10 min.
- OM** En una máquina dental de rayos X, el movimiento de electrones acelerados es hacia el este. ¿En qué dirección es la corriente asociada con estos electrones? *a)* Este, *b)* oeste o *c)* cero.
- PC** En el circuito que se ilustra en la figura 3.4a, ¿cuál es la dirección de *a)* el flujo de electrones en el resistor, *b)* la corriente en el resistor y *c)* la corriente en la batería.
- PC** La velocidad de deriva, o velocidad promedio con que los electrones viajan en un circuito completo, es de varios mm por segundo. Sin embargo, una lámpara que está a 3 m de distancia se enciende instantáneamente cuando usted acciona el interruptor. Explique esta aparente paradoja.
- a)** Una carga neta de 30 C pasa por el área transversal de un cable en 2.0 min. ¿Cuál es la corriente en el cable?
- a)** ¿Cuánto tiempo le tomaría a una carga neta de 2.5 C pasar por un punto de un cable para producir una corriente constante de 5.0 mA?
- a)** Un carrito de juguete extrae una corriente de 0.50 mA de una batería nicad (de níquel-cadmio). En 10 min de operación, *a)* ¿cuánta carga fluye por el carrito de juguete y *b)* cuánta energía pierde la batería?
- a)** El arrancador del motor de un automóvil extrae 50 A de la batería al echarlo a andar. Si el tiempo de arranque es de 1.5 s, ¿cuántos electrones pasan por un punto dado en el circuito durante ese tiempo?

23. ●● Una carga neta de 20 C pasa por un punto en un cable en 1.25 min. ¿Cuánto tardará una carga neta de 30 C en pasar por ese punto si la corriente en el cable se duplica?
24. ●●● Las baterías de automóvil a menudo están clasificadas en "ampere-horas" o $A \cdot h$. a) Demuestre que $A \cdot h$ tiene unidades de carga y que el valor de $1 A \cdot h$ es 3600 C. b) Una batería completamente cargada, de uso rudo, es de $100 A \cdot h$ y entrega una corriente de 5.0 A de manera constante hasta que se agota. ¿Cuál es el tiempo máximo que esta batería podrá entregar corriente, suponiendo que no se recarga? c) ¿Cuánta carga entregará la batería en este tiempo?
25. El ●●● Imagine que algunos protones se mueven hacia la izquierda al mismo tiempo que algunos electrones se mueven hacia la derecha por el mismo lugar. a) La corriente neta será 1) hacia la derecha, 2) hacia la izquierda, 3) cero o 4) ninguna de las opciones anteriores es correcta. b) En 4.5 s, 6.7 C de electrones fluyen hacia la derecha al mismo tiempo que 8.3 C de protones fluyen hacia la izquierda. ¿Cuál es la magnitud de la corriente total?
26. ●●● En un acelerador lineal de protones, una corriente de protones de 9.5 mA golpea un blanco. a) ¿Cuántos protones golpean el blanco cada segundo? b) ¿Cuál es la energía entregada al blanco cada segundo si los protones tienen, cada uno, una energía cinética de 20 MeV y pierden su energía en el blanco?

3.3 Resistencia y ley de Ohm*

27. OM El ohm es sólo otro nombre para el a) volt por ampe- re, b) ampere por volt, c) watt o d) volt.
28. OM Dos resistores óhmicos se colocan a través de una batería de 12 V, uno a la vez. La corriente resultante en el resistor A, según las mediciones, es el doble de la del resistor B. ¿Qué podría decir acerca de sus valores de resistencia? a) $R_A = 2R_B$, b) $R_A = R_B$, c) $R_A = R_B/2$ o d) ninguna de las opciones anteriores es válida.
29. OM Un resistor óhmico se coloca a través de dos baterías diferentes. Cuando se conecta a la batería A, la corriente resultante, según las mediciones, es tres veces la corriente que cuando el resistor está conectado a la batería B. ¿Qué podría decir acerca de los voltajes de las baterías? a) $V_A = 3V_B$, b) $V_A = V_B$, c) $V_B = 3V_A$ o d) ninguna de las opciones anteriores es válida.
30. OM Si se duplica el voltaje a través de un resistor óhmico y al mismo tiempo se reduce su resistencia a un tercio de su valor original, ¿qué sucede a la corriente en el resistor? a) Se duplica, b) se triplica, c) se multiplica seis veces o d) no es posible determinarlo a partir de los datos.
31. PC Si se traza una gráfica de voltaje (V) versus corriente (I) para dos conductores óhmicos con diferentes resistencias, ¿cómo podría usted decir cuál es menos resistivo?
32. PC Los filamentos de las bombillas de luz generalmente fallan justo después de que se encienden y no luego de que han estado encendidos un cierto tiempo. ¿Por qué?

33. PC Un alambre está conectado a través de una fuente permanente de voltaje. a) Si ese alambre se reemplaza por otro del mismo material pero con el doble de longitud y el doble de área transversal, ¿cómo se verá afectada la corriente que pasa por él? b) ¿Cómo resultará afectada la corriente si, en lugar de lo anterior, el nuevo alambre tiene la misma longitud, pero la mitad del diámetro del primero?
34. PC Una batería real siempre tiene alguna resistencia interna r (▼ figura 3.16) que aumenta con la edad de la batería. Explique por qué el voltaje terminal cae cuando la resistencia interna aumenta.



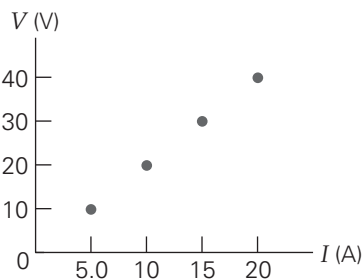
▲ FIGURA 3.16 Fem y voltaje terminal Véanse los ejercicios 34 y 35.

35. ● Una batería de 12.0 V suministra 1.90 A a un resistor de 6.00Ω (figura 3.16). a) ¿Cuál es el voltaje terminal de la batería? b) ¿Cuál es su resistencia interna?
36. ● ¿Cuál es la fem de una batería con una resistencia interna de 0.15Ω si la batería entrega 1.5 A a un resistor de 5.0Ω conectado externamente?
37. El ● Algunos estados permiten el uso de alambre de aluminio en las casas en lugar de los de cobre. a) Si usted quiere que la resistencia de sus alambres de aluminio sea igual que con alambres de cobre, el alambre de aluminio debe tener 1) un mayor diámetro, 2) un menor diámetro o 3) el mismo diámetro que el alambre de cobre. b) Calcule la razón entre los espesores del alambre de aluminio y el de cobre.
38. ● ¿Cuánta corriente se extrae de una batería de 12 V cuando un resistor de 15Ω se conecta a través de sus terminales?
39. ● ¿Qué voltaje debe tener una batería para producir una corriente de 0.50 A a través de un resistor de 2.0Ω ?
40. ● Durante un experimento sobre la conducción de corriente en el cuerpo humano, un técnico conecta un electrodo a la muñeca y otro al hombro de una persona. Si se aplican 100 mV a través de los dos electrodos y la corriente resultante es de 12.5 mA, ¿cuál es la resistencia total del brazo de la persona?
41. ●● Un alambre de cobre de 0.60 m de longitud tiene un diámetro de 0.10 cm. ¿Cuál es su resistencia?
42. ●● Un material se utiliza para formar una varilla larga con sección transversal cuadrada de 0.50 cm de lado. Cuando un voltaje de 100 V se aplica a lo largo de 20 m de longitud de la varilla, se presenta una corriente de 5.0 A. a) ¿Cuál es la resistividad del material? b) ¿El material es un conductor, un aislante o un semiconductor?

*Suponga que los coeficientes de temperatura de la resistividad que aparecen en la tabla 3.1 se aplican a grandes rangos de temperatura.

43. ●● Dos alambres de cobre tienen áreas transversales iguales y longitudes de 2.0 y 0.50 m, respectivamente. *a)* ¿Cuál es la razón de la corriente en el alambre más corto con respecto a la de la corriente en el más largo si están conectados a la misma fuente de potencia? *b)* Si se desea que los dos alambres conduzcan la misma corriente, ¿cuál tendría que ser la razón de sus áreas transversales? (Dé su respuesta como una razón del alambre más largo al más corto.)
44. **EI** ●● Dos alambres de cobre tienen igual longitud, pero el diámetro de uno es tres veces el del otro. *a)* La resistencia del alambre más delgado es 1) 3, 2) $\frac{1}{3}$, 3) 9 o 4) $\frac{1}{9}$ veces la resistencia del alambre más grueso. ¿Por qué? *b)* Si el alambre más grueso tiene una resistencia de 1.0Ω , ¿cuál es la resistencia del más delgado?
45. ●● El alambre de un elemento calefactor de un quemador de estufa eléctrica tiene una longitud efectiva de 0.75 m y una área transversal de $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. *a)* Si el alambre se hace de hierro y opera a una temperatura de 380°C , ¿cuál es su resistencia operativa? *b)* ¿Cuál es su resistencia cuando la estufa está apagada?
46. ●● *a)* ¿Cuál es la variación porcentual de la resistividad del cobre sobre el rango de temperaturas que va de la temperatura ambiente (20°C) a 100°C ? *b)* Suponga que la resistencia del alambre de cobre cambia sólo a causa de los cambios de resistividad sobre este rango de temperatura. Después suponga que el alambre se conecta al mismo suministro de potencia. ¿Por qué porcentaje cambiaría su corriente? ¿Aumentaría o disminuiría?
47. ●● Un alambre de cobre tiene una resistencia de $25 \text{ m}\Omega$ a 20°C . Cuando el alambre lleva una corriente, el calor que genera la corriente hace que la temperatura del alambre aumente en 27°C . *a)* ¿Cuál es el cambio en la resistencia del alambre? *b)* Si su corriente original era de 10.0 mA , ¿cuál es su corriente final?
48. ●● Cuando un resistor está conectado a una fuente de 12 V , extrae una corriente de 185 mA . El mismo resistor conectado a una fuente de 90 V extrae una corriente de 1.25 A . ¿El resistor es óhmico? Justifique su respuesta matemáticamente.
49. ●● Una aplicación particular requiere que un alambre de aluminio de 20 m de longitud tenga una resistencia de $0.25 \text{ m}\Omega$ a 20°C . ¿Cuál debe ser el diámetro del alambre?
50. ●● Si la resistencia del alambre en el ejercicio 49 no puede variar en más de $\pm 5.0\%$, ¿cuál es el rango de temperaturas de operación del alambre?
51. **EI** ●●● Cuando un alambre se estira y su longitud aumenta, su área transversal disminuye, en tanto que su volumen total permanece constante. *a)* La resistencia del alambre después de estirarse será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que antes de estirarse. *b)* Un alambre de cobre de 1.0 m de longitud y 2.0 mm de diámetro se estira; su longitud aumenta 25% mientras que su área transversal disminuye, pero permanece uniforme. Calcule la razón de su resistencia (la final con respecto a la inicial).

52. ●●● La \blacktriangledown figura 3.17 muestra los datos de la dependencia de la corriente a través de un resistor sobre el voltaje a través de ese resistor. *a)* ¿El resistor es óhmico? Explique su respuesta. *b)* ¿Cuál es su resistencia? *c)* Utilice los datos para predecir qué voltaje se necesitará para producir una corriente de 4.0 A en el resistor.



◀ **FIGURA 3.17** ¿Un resistor óhmico? Véase el ejercicio 52.

53. ●●● A 20°C , una barra de silicio está conectada a una batería con un voltaje terminal de 6.0 V y se produce una corriente de 0.50 A . La temperatura de la barra aumenta entonces a 25°C . Suponga que el coeficiente de temperatura de la resistencia es constante. *a)* ¿Cuál es su nueva resistencia? *b)* ¿Cuánta corriente lleva entonces la barra? *c)* Si se desea reducir la corriente de su valor a temperatura ambiente de 0.50 a 0.40 A , ¿a qué temperatura debería estar la muestra?
54. **EI** ●●● Un alambre de platino está conectado a una batería. *a)* Si la temperatura aumenta, ¿la corriente en el alambre 1) aumentará, 2) permanecerá igual o 3) disminuirá? ¿Por qué? *b)* Un termómetro de resistencia eléctrica está hecho de alambre de platino que tiene una resistencia de 5.0Ω a 20°C . El alambre está conectado a una batería de 1.5 V . Cuando el termómetro se calienta a 2020°C , ¿por cuánto cambia la corriente?

3.4 Potencia eléctrica

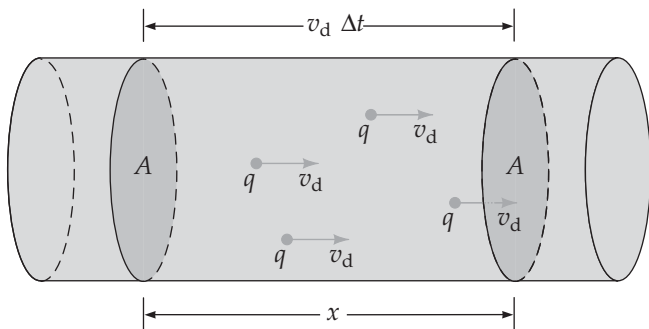
55. **OM** La unidad de potencia eléctrica, el watt, ¿es equivalente a qué combinación de unidades SI? *a)* $\text{A}^2 \cdot \Omega$, *b)* J/s , *c)* V^2/Ω o *d)* todas las opciones son válidas.
56. **OM** Si el voltaje a través de un resistor óhmico se duplica, la potencia gastada en el resistor *a)* aumenta por un factor de 2, *b)* aumenta por un factor de 4, *c)* disminuye a la mitad, *d)* ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
57. **OM** Si la corriente a través de un resistor óhmico se reduce a la mitad, la potencia gastada en el resistor *a)* aumenta por un factor de 2, *b)* aumenta por un factor de 4, *c)* disminuye a la mitad, *d)* disminuye por un factor de 4.
58. **PC** Suponiendo que la resistencia de su secadora de cabello obedece la ley de Ohm, ¿qué pasaría a su salida de potencia si la enchufara directamente a un tomacorriente de 240 V en Europa, en tanto que está diseñada para conectarse a tomacorrientes de 120 V en Estados Unidos?
59. **PC** La mayor parte de los filamentos de las bombillas de luz están hechos de tungsteno y son aproximadamente de la misma longitud. ¿Qué sería diferente en el filamento de una bombilla de 60 W comparado con el de una bombilla de 40 W ?
60. **PC** ¿Quién consume más potencia de una batería de 12 V , un resistor de 5.0Ω o uno de 10Ω ? ¿Por qué?

61. ● Un reproductor digital de video (DVD) está clasificado como de 100 W a 120 V. ¿Cuál es su resistencia?
62. ● Un congelador con $10\ \Omega$ de resistencia está conectado a una fuente de 110 V. ¿Cuál es la potencia entregada cuando este congelador está encendido?
63. ● La corriente a través de un refrigerador con una resistencia de $12\ \Omega$ es de 13 A (cuando el refrigerador está encendido). ¿Cuál es la potencia entregada al refrigerador?
64. ● Demuestre que la cantidad de volts al cuadrado por ohm (V^2/Ω) tiene unidades SI de potencia.
65. ● Un calentador eléctrico de agua está diseñado para producir 50 kW de calor cuando está conectado a una fuente de 240 V. ¿Cuál debe ser la resistencia del calentador?
66. ●● Suponiendo que el calentador en el ejercicio 65 tiene 90% de eficiencia, ¿cuánto tiempo le tomará calentar 50 gal de agua de 20 a 80°C ?
67. **EI** ●● Un resistor óhmico en un circuito está diseñado para operar a 120 V. *a)* ¿Si usted conecta el resistor a una fuente de potencia de 60 V, el resistor disipará calor a 1) 2, 2) 4, 3) $\frac{1}{2}$ o 4) $\frac{1}{4}$ veces la potencia designada? ¿Por qué? *b)* Si la potencia designada es de 90 W a 120 V, pero el resistor está conectado a 40 V, ¿cuál es la potencia entregada al resistor al menor voltaje?
68. ●● Un juguete eléctrico con una resistencia de $2.50\ \Omega$ opera con una batería de 1.50 V. *a)* ¿Qué corriente extrae el juguete? *b)* Suponiendo que la batería entrega una corriente constante durante la vida de 6.00 h del juguete, ¿cuánta carga pasa por éste? *c)* ¿Cuánta energía fue entregada al juguete?
69. ●● Una máquina soldadora extrae 18 A de corriente a 240 V. *a)* ¿Cuál es su tasa de consumo de energía? *b)* ¿Cuál es su resistencia?
70. ●● En promedio, un calentador eléctrico de agua opera 2.0 h cada día. *a)* Si el costo de la electricidad es de $\$0.15/\text{kWh}$, ¿cuál es el costo de operar el calentador durante un mes de 30 días? *b)* ¿Cuál es la resistencia de un calentador de agua típico? [*Sugerencia:* véase la tabla 3.2.]
71. ●● *a)* ¿Cuál es la resistencia de un serpentín de calefacción si genera 15 kJ de calor por minuto cuando está conectado a una fuente de 120 V? *b)* ¿Cómo cambiaría usted la resistencia si quisiera obtener 10 kJ de calor por minuto?
72. ●● Se suministra potencia a una computadora de 200 W durante 10 h por día. Si el costo de la electricidad es de $\$0.15/\text{kWh}$, ¿cuál es el costo (aproximando al dólar más cercano) de usar la computadora durante un año (365 días)?
73. ●● Un sistema acondicionador de aire de 120 V extrae 15 A de corriente. Si opera 20 min, *a)* ¿cuánta energía consume en kilowatts-hora? *b)* Si el costo de la electricidad es de $\$0.15/\text{kWh}$, ¿cuál es el costo (aproximando al centavo más cercano) de operar la unidad durante 20 min?
74. ●● Dos resistores de 100 y $25\ \Omega$ están especificados para una salida máxima de potencia de 1.5 y 0.25 W, respectivamente. ¿Cuál es el voltaje máximo que puede aplicarse con seguridad a cada resistor?
75. ●● Un alambre de 5.0 m de longitud y 3.0 mm de diámetro tiene una resistencia de $100\ \Omega$. Se aplica una diferencia de potencial de 15 V a través del alambre. Encuentre *a)* la corriente en el alambre, *b)* la resistividad de su material y *c)* la razón a la que se produce calor en el alambre.
76. **EI** ●● Cuando se conecta a una fuente de voltaje, una bobina de tungsteno disipa inicialmente 500 W de potencia. En un corto tiempo, la temperatura de la bobina aumenta en 150°C a causa del calentamiento de joule. *a)* ¿La potencia disipada 1) aumenta, 2) permanece igual o 3) disminuye? ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es el cambio correspondiente en la potencia?
77. ●● Un resistor de $20\ \Omega$ está conectado a cuatro baterías de 1.5 V. ¿Cuál es la pérdida de calor en joules por minuto en el resistor si las baterías están conectadas *a)* en serie y *b)* en paralelo?
78. ●● Un calentador de agua de 5.5 kW opera a 240 V. *a)* ¿El circuito del calentador debería tener un disyuntor de 20 A o uno de 30 A? (Un disyuntor es un dispositivo de seguridad que abre el circuito a su corriente estipulada.) *b)* Suponiendo una eficiencia del 85%, ¿cuánto tardará el calentador en calentar el agua en un tanque de 55 gal de 20 a 80°C ?
79. ●● Un estudiante usa un calentador de inmersión para calentar 0.30 kg de agua de 20 a 80°C para preparar té. Si el calentador tiene un 75% de eficiencia y tarda 2.5 min hacerlo, ¿cuál es su resistencia? (Suponga un voltaje doméstico de 120 V.)
80. ●● Un aparato óhmico está clasificado a 100 W cuando está conectado a una fuente de 120 V. Si la compañía de suministro eléctrico corta el voltaje en 5.0% para conservar energía, ¿cuál es *a)* la corriente en el aparato y *b)* la energía que consume después de la caída del voltaje?
81. ●● La salida de una bombilla de luz es de 60 W cuando opera a 120 V. Si el voltaje se reduce a la mitad y la potencia cae a 20 W durante un apagón parcial, ¿cuál es la razón entre la resistencia de la bombilla a toda potencia y su resistencia durante el apagón parcial?
82. ●● Para limpiar un sótano inundado, una bomba de agua debe trabajar (subir el agua) a razón de 2.00 kW. Si la bomba está conectada a una fuente de 240 V y su eficiencia es del 84%, *a)* ¿cuánta corriente extrae y *b)* cuál es su resistencia?
83. ●●● Calcule el costo mensual (30 días) total (aproximando al dólar más cercano) del uso de los siguientes aparatos eléctricos si la tarifa es de $\$0.12/\text{kWh}$: un sistema acondicionador de aire que funciona el 30% del tiempo; una mezcladora que se utiliza 0.50 h/mes; una máquina lavavajillas que se utiliza 8.0 h/mes; un horno de microondas que se ocupa 15 min/día; el motor de un refrigerador libre de escarcha que funciona 15% del tiempo; una estufa (quemadores más horno) que funciona un total de 10 h/mes; y un televisor a color que opera 120 h/mes. (Utilice la información de la tabla 3.2.)

Ejercicios adicionales

84. **EI** Una pieza de carbono y una pieza de cobre tienen la misma resistencia a temperatura ambiente. *a)* Si la temperatura de cada pieza se incrementa 10.0°C , la pieza de cobre tendrá 1) una mayor resistencia, 2) la misma resistencia o 3) menor resistencia que la pieza de carbono. ¿Por qué? *b)* Calcule la razón entre la resistencia del cobre y la del carbono.

85. Dos piezas de alambre, una de aluminio y la otra de cobre, son idénticas en longitud y diámetro. A cierta temperatura, uno de los alambres tendrá la misma resistencia que tiene el otro a 20°C. ¿Cuál es esa temperatura? (¿Hay más de una temperatura?)
86. Una batería entrega 2.54 A a un resistor óhmico de 4.52 Ω. Cuando se conecta a un resistor de 2.21 Ω, entrega 4.98 A. Determine *a*) la resistencia interna (que se supone constante), *b*) la fem y *c*) el voltaje terminal (en ambos casos) de la batería.
87. Un resistor externo está conectado a una batería con una fem variable, pero resistencia interna constante. A una fem de 3.00 V, el resistor extrae una corriente de 0.500 A, y a 6.00 V, extrae una corriente de 1.00 A. ¿El resistor externo es óhmico? Pruebe su respuesta.
88. Una anguila eléctrica aplica una corriente de 0.75 A a una pequeña presa con forma de lápiz, que mide 15 cm de largo. Si la “biobatería” de la anguila se cargó a 500 V y fue constante durante 20 ms antes de caer a cero, estime *a*) la resistencia del pez, *b*) la energía que recibió el pez y *c*) el campo eléctrico promedio (la magnitud) en la carne del pez.
89. La mayoría de los televisores modernos tienen una función de “calentamiento instantáneo”. Aunque el aparato parece estar apagado, sólo está “apagado” en el sentido de que no hay imagen ni audio. Para volver a ofrecer una imagen “instantánea”, el televisor tiene una función que le permite tener siempre listo su sistema electrónico. Esto implica consumir unos 10 W de energía eléctrica de forma constante. Suponga que hay un televisor de este tipo por cada dos hogares y estime cuántas plantas de energía eléctrica se necesitan en Estados Unidos para tener activa esta función.
90. ▼ La figura 3.18 ilustra unos portadores de carga, cada uno con carga q y una velocidad v_d (velocidad de deriva) en un conductor de área transversal A . Sea n el número de portadores de carga libre por volumen unitario. *a*) Demuestre que la carga total (ΔQ) libre para moverse en el elemento de volumen mostrado está dada por $\Delta Q = (nAx)q$. *b*) Demuestre que la corriente en el conductor está dada por $I = nqv_dA$.



▲ FIGURA 3.18 Carga y corriente totales Véanse los ejercicios 90 y 91.

91. Un alambre de cobre con área transversal de 13.3 mm² (AWG Núm. 6) conduce una corriente de 1.2 A. Si el alambre contiene 8.5×10^{22} electrones libres por centímetro cúbico, ¿cuál es la velocidad de deriva de los electrones? [Sugerencia: véase el ejercicio 90 y la figura 3.18.]
92. Una unidad de CD-ROM de una computadora que opera con 120 V tiene clasificación de 40 W cuando está funcionando. *a*) ¿Cuánta corriente extrae la unidad? *b*) ¿Cuál es su resistencia?
93. El filamento de tungsteno de una lámpara incandescente tiene una resistencia de 200 Ω a temperatura ambiente. ¿Cuál será su resistencia a una temperatura operativa de 1600°C?
94. Un panorama común en nuestro mundo moderno incluye líneas de transmisión de alto voltaje tendidas a lo largo de enormes distancias desde la planta generadora de energía hasta áreas habitadas. El voltaje que corre por estas líneas es, por lo común, de 500 kV, pero para cuando la energía llega a nuestros hogares el voltaje es de 120 V (véase el capítulo 6 para saber cómo se logra esto). *a*) Explique claramente por qué la energía eléctrica tiene que recorrer grandes distancias a altos voltajes cuando sabemos que éstos son peligrosos. *b*) Calcule la razón de la pérdida por calor en una longitud dada de cable (que se supone óhmico) cuando conduce corriente a 500 kV y cuando opera a 120 V.
95. En el campo es común observar halcones que se posan sobre las líneas eléctricas de alto voltaje mientras tratan de ubicar a sus presas (▼ figura 3.19). Para comprender por qué esta ave no se electrocuta, hagamos una estimación del voltaje entre sus patas. Suponga que las condiciones son de cd en el cable, que éste mide 1.0 km de longitud, tiene una resistencia de 30 Ω, y que está a un potencial eléctrico de 250 kV por encima del otro cable (en el que no está el halcón), que está puesto a tierra o a cero volts. *a*) Si los cables conducen energía a una tasa de 100 MV, ¿cuál es la corriente en ellos? *b*) Suponiendo que las patas del halcón están separadas 15 cm, ¿cuál es la resistencia de ese segmento de cable de alta tensión? *c*) ¿Cuál es la diferencia de voltaje entre las patas del ave? Comente su respuesta y diga si esto le parece peligroso. *d*) ¿Cuál es la diferencia de voltaje entre las patas del halcón si coloca una sobre el cable a tierra mientras sigue en contacto con el cable de alta tensión? Comente su respuesta y diga si esto le parece peligroso.



▼ FIGURA 3.19 Aves sobre una línea eléctrica Véase el ejercicio 95.

CIRCUITOS ELÉCTRICOS BÁSICOS

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo | 90 |
| 4.2 | Circuitos de múltiples mallas y reglas de Kirchhoff | 97 |
| 4.3 | Circuitos RC | 102 |
| 4.4 | Amperímetros y voltímetros | 105 |
| 4.5 | Circuitos domésticos y seguridad eléctrica | 109 |

HECHOS DE FÍSICA

- Física para los padres de adolescentes: no es recomendable conectar más de una secadora para el cabello en el mismo circuito doméstico sin activar el disyuntor. Se necesitan dos circuitos separados en el baño, o alguien tendrá que irse a otra habitación y utilizar un circuito distinto.
- Un amperímetro conectado *incorrectamente* en paralelo con un elemento de circuito no sólo mide mal la corriente, sino que corre el riesgo de quemarse. Por eso, todos los amperímetros tienen fusibles de protección. Por otra parte, si un voltímetro está conectado *incorrectamente* en serie con un elemento de circuito, la corriente del circuito se desploma a cero, y aunque la medición del voltaje será incorrecta, no hay riesgo de daño.
- Menos de 0.01 de un ampere de corriente a través del cuerpo humano causa parálisis muscular. Si la persona no puede alejarse del cable expuesto, podría morir si la corriente pasa por un órgano vital, como el corazón.
- Las *células marcapaso* (o células P), localizadas en una pequeña región del corazón, provocan el latido cardíaco. Sus señales eléctricas viajan a través del corazón en unos 50 ms. Si estas células fallan, otras partes del sistema eléctrico del corazón asumen su función como respaldo. Las células marcapaso reciben influencia del sistema nervioso del cuerpo, de manera que la tasa a la que le indican al corazón que lata varía drásticamente (por ejemplo, de 60 latidos por minuto cuando se está dormido a más de 100 por minuto cuando se realiza ejercicio físico).



Por lo general, pensamos que los alambres metálicos son los “conectores” entre los resistores en un circuito. Sin embargo, los alambres no son los únicos conductores de electricidad, como se observa en la fotografía. Como la bombilla de luz está encendida, el circuito debe estar completo. Por tanto, podemos concluir que el “plomo” en un lápiz (en realidad, una forma de carbono llamado *grafito*) es un buen conductor de electricidad. Lo mismo debe ser cierto para el líquido en el vaso de precipitados, en este caso, una solución de agua y sal de mesa.

Los circuitos eléctricos son de muchos tipos y se diseñan para diversos fines, como hervir agua e iluminar un árbol de Navidad. Los circuitos que contienen conductores “líquidos” (como el de esta fotografía) tienen aplicaciones prácticas en el laboratorio y en la industria; por ejemplo, pueden servir para sintetizar o purificar sustancias químicas y para *galvanizar* metales. (La galvanización significa aplicar químicamente metales a superficies utilizando técnicas eléctricas, como al hacer chapado en plata.) Con los principios aprendidos en los capítulos 1, 2 y 3, usted está ahora listo para analizar algunos circuitos eléctricos. Con este análisis tendrá una mejor apreciación de cómo trabaja en realidad la electricidad.

El análisis de circuitos trata muy a menudo con voltajes, corrientes y requisitos de potencia. Es posible analizar teóricamente un circuito antes de ensamblarlo. El análisis podría mostrar que el circuito no funcionará apropiadamente tal como se ha diseñado o que podría representar un problema de seguridad (por ejemplo, a causa de sobrecalentamiento por calor de joule). Como ayuda en el análisis, nos apoyaremos considerablemente en los diagramas de circuitos para visualizar y comprender sus funciones. Algunos de esos diagramas se incluyeron en el capítulo 3.

Comenzaremos nuestro análisis de circuitos fijándonos en los arreglos de los elementos resistivos, como bombillas de luz, tostadores y calentadores de inmersión.

4.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo

OBJETIVOS: a) Determinar la resistencia equivalente de resistores combinados en serie, paralelo y serie-paralelo y b) usar resistencias equivalentes para analizar circuitos simples.

El símbolo de resistencia $\sim\sim\sim$ puede representar *cualquier* tipo de elemento de circuito, por ejemplo, una bombilla de luz o un tostador. Aquí suponemos que todos los elementos son óhmicos (con resistencia constante), a menos que se indique otra cosa. (Hay que hacer notar que las bombillas de luz, en particular, no son óhmicas porque su resistencia aumenta de forma significativa conforme se calientan.) Además, como es costumbre, la resistencia de los alambres se considerará insignificante.

Resistores en serie

Al analizar un circuito, como el voltaje representa energía por carga unitaria, para conservar la energía, la *suma de los voltajes alrededor de una malla en un circuito es cero*. Recuerde que *voltaje* significa siempre “cambio en el potencial eléctrico”, así que las ganancias y pérdidas de voltaje se representan mediante los signos + y -, respectivamente. Por ejemplo, para el circuito en la \blacktriangledown figura 4.1a, por la conservación de la energía (por coulomb) los voltajes individuales (V_i , donde $i = 1, 2$ o 3) a través de los resistores se suman para igualar el voltaje (V) a través de las terminales de la batería. Cada resistor en serie lleva la misma corriente (I) porque la carga no puede “acumularse” o “fugarse” en ningún punto del circuito. Al sumar las ganancias y pérdidas de voltaje, tenemos $V - \Sigma V_i = 0$. Finalmente, sabemos cómo se relaciona el voltaje con la resistencia para cada resistor, $V_i = IR_i$. Al sustituir esta expresión en la ecuación anterior, obtenemos,

$$V - \Sigma(IR_i) = 0 \quad \text{o} \quad V = \Sigma(IR_i) \quad (4.1)$$

Se dice que los elementos del circuito en la figura 4.1a están conectados en **serie**, o conectados, extremo a extremo. Cuando los resistores están en serie, la corriente debe ser la misma a través de todos los resistores, como se requiere por la conservación de carga. Si esto no fuera cierto, entonces la carga aumentaría o desaparecería, lo cual no es posible. La \blacktriangleright figura 4.2 muestra el análogo flujo de agua a lo largo de una corriente interrumpida por una serie de rápidos (que representan la “resistencia”).

Si designamos la corriente común en los resistores como I , entonces la ecuación 4.1 puede escribirse explícitamente para tres resistores (como en la figura 4.1a):

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 \\ &= IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) \end{aligned}$$

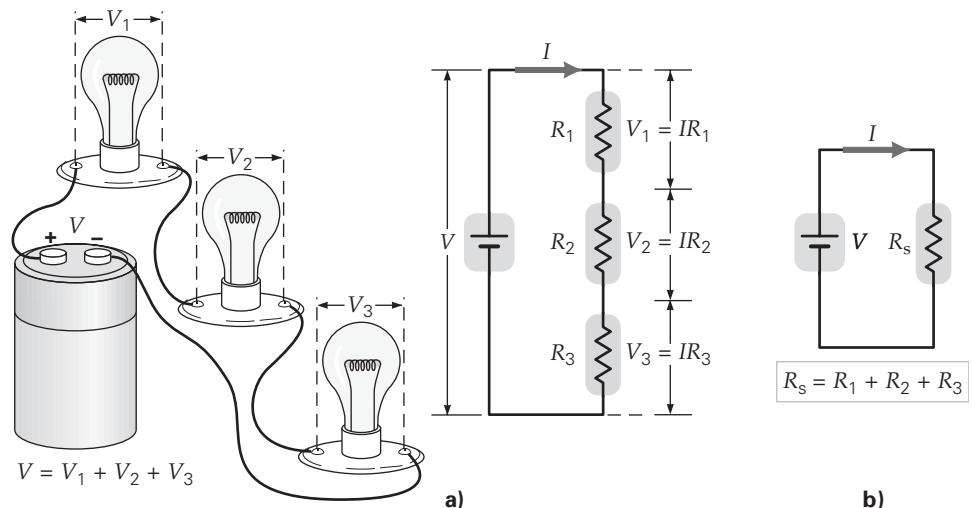
Para la **resistencia equivalente en serie (R_s)** es el valor de un solo resistor que podría reemplazar los tres resistores por un resistor R_s y mantener la misma corriente, necesitamos $V = IR_s$ o $R_s = V/I$. Por consiguiente, de la ecuación previa, los tres resistores en serie tienen una resistencia equivalente

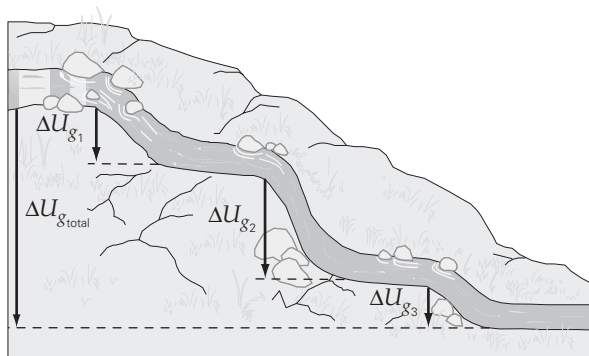
$$R_s = \frac{V}{I} = R_1 + R_2 + R_3$$

Nota: para resistores, $V = IR$.

Nota: para comprender mejor las conexiones de resistores, repase el análisis de los condensadores conectados en serie y en paralelo en el capítulo 2.

\blacktriangleright **FIGURA 4.1 Resistores en serie**
a) Cuando los resistores (que aquí representan las resistencias de las bombillas de luz) están en serie, la corriente a través de cada uno es la misma. ΣV_i , la suma de las caídas de voltaje a través de los resistores, es igual a V , el voltaje de la batería.
b) La resistencia equivalente R_s de los resistores en serie es la suma de las resistencias.





Esto es, la resistencia equivalente de resistores en serie es la suma de las resistencias individuales. Esto significa que los tres resistores (bombillas de luz) en la figura 4.1a podrían reemplazarse por un solo resistor de resistencia R_s (figura 4.1b) sin afectar la corriente. Por ejemplo, si cada resistor en la figura 4.1a tuviera un valor de 10Ω , entonces R_s sería de 30Ω . Observe que la resistencia equivalente en serie es mayor que la resistencia del mayor resistor en la serie.

Este resultado puede extenderse a cualquier número de resistores en serie:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \sum R_i \quad \text{resistencia equivalente en serie} \quad (4.2)$$

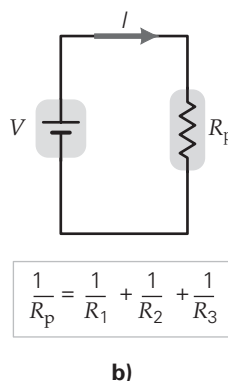
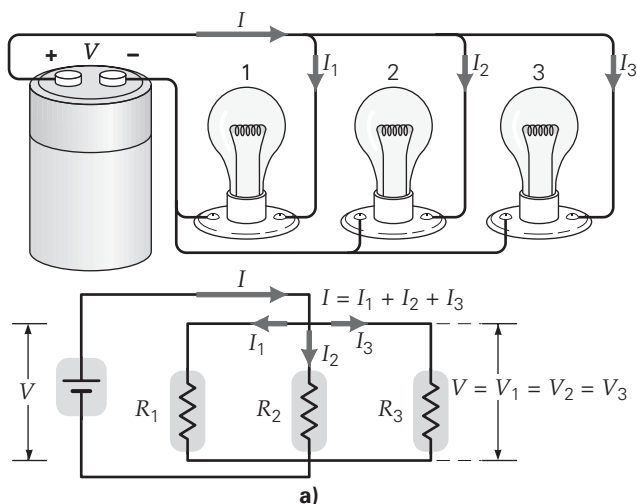
Las conexiones en serie no son comunes en algunos circuitos, tales como los cableados domésticos, porque presentan dos desventajas principales en comparación con las conexiones en paralelo. La primera es clara si se considera qué sucede cuando uno de las bombillas en la figura 4.1a se funde (o cuando se quiere apagar sólo esa bombilla). En ese caso, todas las bombillas se apagarían, porque el circuito ya no sería completo o continuo. En tal situación, se dice que el circuito está *abierto*. Un *circuito abierto* tiene una resistencia equivalente infinita, porque la corriente es cero, a diferencia del voltaje de la batería.

Una segunda desventaja de las conexiones en serie es que cada resistor opera a un voltaje menor que el de la batería (V). Considere qué sucedería si se agregara un cuarto resistor. El resultado sería que el voltaje a través de cada una de las tres primeras bombillas (y sus corrientes) disminuiría, entregando una menor potencia a todas las bombillas. Esto es, las bombillas no darían el mismo brillo o luz. Es claro que esta condición no es aceptable en un arreglo doméstico.

Resistores en paralelo

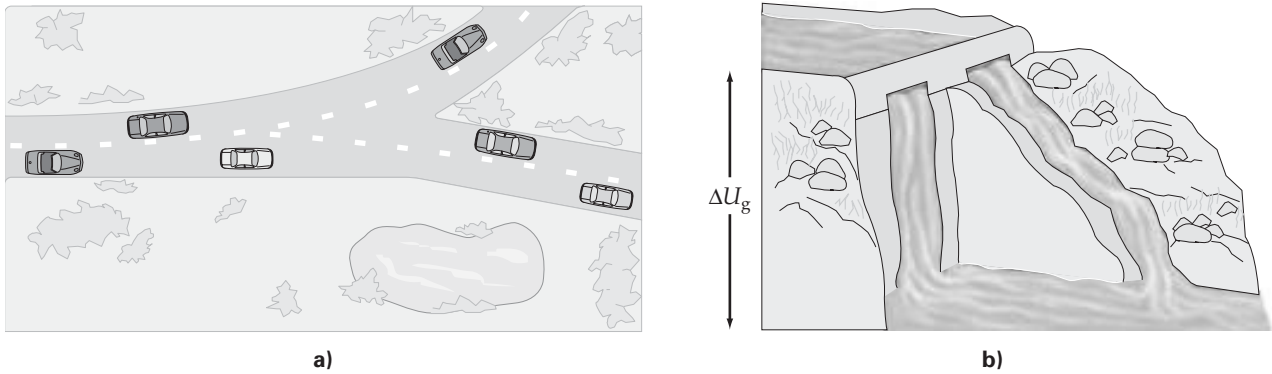
También podemos conectar resistores a una batería en **paralelo** (▼figura 4.3a). En este caso, todos los resistores tienen conexiones comunes, esto es, todos los conductores a un lado de los resistores están unidos juntos a una terminal de la batería. Todos los conductores al otro lado están unidos a la otra terminal. Cuando los resistores están conectados en paralelo a una fuente de fem, la caída de voltaje a través de cada resistor es la misma:

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$



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

◀ **FIGURA 4.3 Resistores en paralelo** a) Cuando los resistores están conectados en paralelo, la caída de voltaje a través de cada uno de los resistores es la misma. La corriente de la batería se divide (por lo general, de forma desigual) entre los resistores. b) Resistencia equivalente R_p de los resistores en paralelo está dada por una relación recíproca.



▲ FIGURA 4.4 Analogías de los resistores en paralelo *a)* Cuando un camino se bifurca, el número total de automóviles que entran a las dos ramas cada minuto es igual al número de autos que llegan a la bifurcación cada minuto. El movimiento de carga en una unión puede considerarse de la misma forma. *b)* Cuando el agua fluye desde una presa, la cantidad de energía potencial gravitacional que pierde (por kilogramo de agua) al caer corriente abajo es la misma independientemente de la trayectoria de descenso. Esta situación es análoga a los voltajes a través de resistores en paralelo.

Nota: en realidad, los cables del circuito no están arreglados en los impecables patrones rectangulares de un diagrama de circuito. La forma rectangular es simplemente una convención que permite una presentación más clara y una fácil visualización del circuito real.

ma. Tal vez no le sorprenda saber que los circuitos domésticos están conectados en paralelo. (Véase la sección 4.5.) Esto se debe a que cuando la conexión está en paralelo, cada aparato doméstico opera a pleno voltaje, y encender o apagar uno de ellos no afecta a los demás.

A diferencia del caso de los resistores en serie, la corriente en un circuito en paralelo se divide en trayectorias diferentes (figura 4.3a). Esto ocurre siempre que se tiene una *unión* (un lugar donde varios cables se juntan), en forma parecida a como lo hace el tránsito en una carretera al llegar a una bifurcación (▲ figura 4.4a). La corriente total que sale de la batería es igual a la suma de esas corrientes. Específicamente, para tres resistores en paralelo, $I = I_1 + I_2 + I_3$. Hay que hacer notar que si las resistencias son iguales, la corriente se dividirá de manera que cada resistor tenga la misma corriente. Sin embargo, en general, las resistencias no serán iguales y la corriente se dividirá entre los resistores en proporción inversa a sus resistencias. Esto significa que la mayor corriente tomará la trayectoria de mínima resistencia. Sin embargo, recuerde que un solo resistor no llevará toda la corriente.

La **resistencia equivalente en paralelo (R_p)** es el valor de un solo resistor que podría reemplazar a todos los resistores y mantener la misma corriente. Así, $R_p = V/I$ o $I = V/R_p$. Además, la caída de voltaje (V) es la misma a través de cada resistor. Para visualizar esta situación, imagine una analogía hidráulica. Considere dos trayectorias separadas para el agua; cada una va de la parte superior de una presa al fondo. El agua pierde la misma cantidad de energía potencial gravitacional (de forma análoga a V) independientemente de la trayectoria (figura 4.4b). Para la electricidad, una cantidad dada de carga pierde la misma cantidad de energía potencial eléctrica, independientemente del resistor en paralelo por el que pasa.

La corriente a través de cada resistor es $I_i = V/R_i$. (Aquí, el subíndice i representa cualquiera de los resistores: 1, 2, 3, ...) Al sustituir para cada corriente, obtenemos

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

Por lo tanto,

$$\frac{V}{R_p} = V \left(\frac{1}{R_p} \right) = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

Igualando las dos expresiones de resistencias entre paréntesis, vemos que la resistencia equivalente R_p está relacionada con las resistencias individuales mediante la ecuación recíproca

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

Este resultado puede generalizarse para incluir cualquier número de **resistores en paralelo**:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \Sigma \left(\frac{1}{R_i} \right) \quad \text{resistencia equivalente en paralelo} \quad (4.3)$$

Para el caso especial en que sólo hay dos resistores, la resistencia equivalente puede expresarse en forma no recíproca (utilizando un común denominador) como,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

o

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{(solo para dos resistores en paralelo)} \quad (4.3a)$$

Nota: R_p es menor que la resistencia más pequeña en un arreglo en paralelo.

Sugerencia para resolver problemas

Observe que la ecuación 4.3 da $1/R_p$, no R_p . Al final de cada cálculo, se debe tomar el recíproco para encontrar R_p . El análisis de las unidades mostrará que las unidades no son ohms hasta que se invierten. Como es costumbre, si lleva unidades como control en sus cálculos, será menos probable que cometa errores de este tipo.

La resistencia equivalente de resistores en paralelo siempre es menor que la menor resistencia en el arreglo. Por ejemplo, dos resistores en paralelo —digamos de 6.0 y 12.0 Ω — son equivalentes a uno solo con resistencia de 4.0 Ω (debería demostrar esto). Pero, ¿por qué esperar esta respuesta aparentemente extraña?

Físicamente, la razón se encuentra considerando una batería de 12V en un circuito completo con *un solo* resistor de 6.0 Ω . La corriente en el circuito es de 2.0 A ($I = V/R$). Ahora imagine que un resistor de 12.0 Ω se conecta en paralelo al resistor de 6.0 Ω . La corriente a través del resistor de 6.0 Ω no se verá afectada: permanecerá igual a 2.0 A. (¿Por qué?) Sin embargo, el nuevo resistor tendrá una corriente de 1.0 A (utilizando $I = V/R$ una vez más). Así que la corriente *total* en el circuito es 1.0 A + 2.0 A = 3.0 A. Veamos ahora el resultado final. Cuando el segundo resistor se conecta al primero *en paralelo*, la corriente total que entrega la batería aumenta. Como el voltaje no aumentó, la resistencia equivalente del circuito *debe haber disminuido* (por debajo de su valor inicial de 6.0 Ω) cuando se conectó el resistor de 12.0 Ω . En otras palabras, cada vez que se agrega una trayectoria extra en paralelo, el resultado es más corriente total. De manera que el circuito se comporta como si su resistencia equivalente *disminuyera*.

Observe que este razonamiento no depende del valor del resistor agregado. Lo que importa es que se ha añadido otra trayectoria con resistencia. (Intente esto utilizando un resistor de 2 Ω o uno de 2 M Ω en lugar del resistor de 12 Ω . De nuevo ocurre una reducción en la resistencia equivalente. Sin embargo, note que el *valor* de la resistencia equivalente será distinto.)

Entonces, en general, las conexiones en serie ofrecen una manera de incrementar la resistencia total, mientras que las conexiones en paralelo brindan una forma de disminuir la resistencia total. Para ver cómo funcionan estas ideas, considere el ejemplo 4.1.

Ejemplo 4.1 ■ Conteo de conexiones: resistores en serie y en paralelo

¿Cuál es la resistencia equivalente de tres resistores (1.0, 2.0 y 3.0 Ω) cuando se conectan a) en serie (figura 4.1a) y b) en paralelo (figura 4.3a)? c) ¿Cuánta corriente entregará una batería de 12V en cada uno de esos arreglos?

Razonamiento. Para encontrar las resistencias equivalentes para a y b, aplique las ecuaciones 4.2 y 4.3, respectivamente. Para encontrar la corriente en serie del inciso c, calcule la corriente a través de la batería tratando ésta como si estuviera conectada a un solo resistor, la resistencia equivalente en serie. Para el arreglo en paralelo, la corriente total se determina usando la resistencia equivalente en paralelo. Como sabemos que cada resistor en paralelo tiene el mismo voltaje, es posible calcular las corrientes individuales.

Solución. Se listan los datos

Dado: $R_1 = 1.0 \Omega$ **Encuentre:** a) R_s (resistencia en serie)
 $R_2 = 2.0 \Omega$ b) R_p (resistencia en paralelo)
 $R_3 = 3.0 \Omega$ c) I (corriente total para cada caso)
 $V = 12 \text{ V}$

a) La resistencia equivalente en serie (ecuación 4.2) es

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 = 1.0 \Omega + 2.0 \Omega + 3.0 \Omega = 6.0 \Omega$$

Nuestro resultado es mayor que la mayor resistencia, como se esperaba.

b) La resistencia equivalente en paralelo se determina con la ecuación 4.3

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_p} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1.0 \Omega} + \frac{1}{2.0 \Omega} + \frac{1}{3.0 \Omega} \\ &= \frac{6.0}{6.0 \Omega} + \frac{3.0}{6.0 \Omega} + \frac{2.0}{6.0 \Omega} = \frac{11}{6.0 \Omega} \end{aligned}$$

o, luego de hacer la inversión,

$$R_p = \frac{6.0 \Omega}{11} = 0.55 \Omega$$

que es un valor más bajo que el de la menor resistencia, como también se esperaba.

(continúa en la siguiente página)

c) A partir de la resistencia equivalente en serie y el voltaje de la batería:

$$I = \frac{V}{R_s} = \frac{12 \text{ V}}{6.0 \Omega} = 2.0 \text{ A}$$

Calculemos la caída de voltaje a través de cada resistor:

$$V_1 = IR_1 = (2.0 \text{ A})(1.0 \Omega) = 2.0 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2.0 \text{ A})(2.0 \Omega) = 4.0 \text{ V}$$

$$V_3 = IR_3 = (2.0 \text{ A})(3.0 \Omega) = 6.0 \text{ V}$$

Advierta que para garantizar que la corriente a través de cada resistor sea la misma, *los mayores resistores requieren más voltaje, cuando están en serie*. Como verificación, note que la suma de las caídas de voltaje en los resistores ($V_1 + V_2 + V_3$) es igual al voltaje de la batería.

Para el arreglo en paralelo, la corriente total es:

$$I = \frac{V}{R_p} = \frac{12 \text{ V}}{0.55 \Omega} = 22 \text{ A}$$

Observe que la corriente para la combinación en paralelo es mucho mayor que para la combinación en serie. (¿Por qué?) Ahora es posible determinar la corriente a través de cada uno de los resistores, ya que cada resistor tiene un voltaje de 12 V. Por lo tanto,

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{12 \text{ V}}{1.0 \Omega} = 12 \text{ A}$$

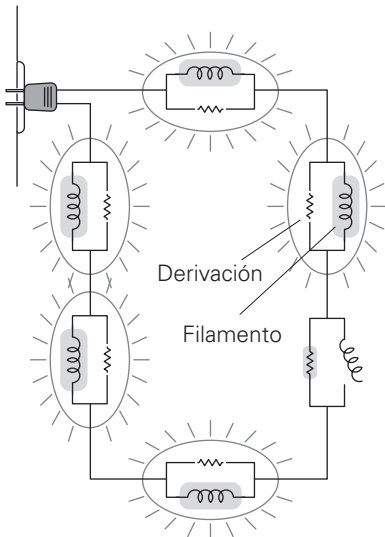
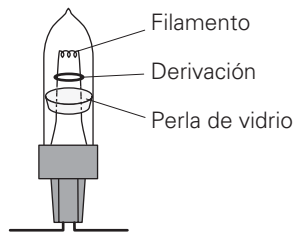
$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{12 \text{ V}}{2.0 \Omega} = 6.0 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{12 \text{ V}}{3.0 \Omega} = 4.0 \text{ A}$$

Para verificar, observe que la suma de las tres corrientes sea igual a la corriente a través de la batería.

Como podrá ver, para resistores en paralelo, el resistor con la menor resistencia recibe la mayor parte de la corriente total porque los resistores en paralelo experimentan el mismo voltaje. (Note que para los arreglos en paralelo, la menor resistencia nunca tiene *toda* la corriente, sólo la mayor parte.)

Ejercicio de refuerzo. a) Calcule la potencia entregada a cada resistor para ambos arreglos en este ejemplo. b) ¿Qué generalizaciones podría hacer a partir de esto? Por ejemplo, ¿qué resistor en serie recibe la mayor potencia? ¿Y en paralelo? c) Para cada arreglo, ¿la potencia total entregada a todos los resistores es igual a la salida de potencia de la batería? (Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo se presentan al final del libro.)



▲ **FIGURA 4.5** Luces de un árbol de Navidad cableadas en derivación Una derivación (puente o *shunt*) en paralelo con el filamento de la bombilla reestablece un circuito completo cuando uno de los filamentos se quema (abajo a la derecha). Sin la derivación, si una de las bombillas se fundiera, todas las demás se apagarían.

Como una aplicación para el cableado, considere las luces que se utilizan para adornar los árboles de Navidad. En el pasado, esas luces estaban conectadas en serie. Cuando una se fundía, todas las demás luces se apagaban y se tenía que localizar la bombilla defectuosa. Ahora, las nuevas guirnaldas de luces tienen bombillas más pequeñas y, aunque una se funda, las demás permanecen encendidas. ¿Significa esto que las luces están conectadas en paralelo? No, una conexión en paralelo daría una menor resistencia y una mayor corriente, lo que sería peligroso.

En lugar de ello, se utiliza una derivación, también conocida como puente o *shunt*, que se conecta en paralelo con el filamento de cada bombilla (◀ figura 4.5). Cuando una bombilla está en operación, la derivación no conduce corriente porque está aislada de los cables del filamento. Cuando el filamento se rompe y la bombilla “se quema”, momentáneamente el circuito queda abierto y no hay corriente en la guirnalda de luces. La diferencia de voltaje a través del circuito abierto en el filamento roto será entonces el voltaje doméstico de 120 V. Esto causará una chispa que quemará el material de aislamiento de la derivación. Al hacer contacto con los cables del filamento, la derivación completa de nuevo el circuito y el resto de las luces de la guirnalda continúan encendidas. (La derivación, un cable con muy poca resistencia, está señalada con el pequeño símbolo de resistencia en el diagrama del circuito de la figura 4.5. En operación normal, hay una abertura, el aislamiento, entre la derivación y el alambre del filamento.) Para comprender el efecto de una bombilla fundida sobre el resto de las luces, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo conceptual 4.2 ■ Las brillantes luces de un árbol de Navidad

Considere una guirnalda de luces para árbol de Navidad con puentes de derivación. Si el filamento de una bombilla se quema y la derivación completa el circuito, ¿las demás luces *a*) brillarán con más intensidad, *b*) brillarán un poco más débilmente o *c*) no se verán afectadas?

Razonamiento y respuesta. Si el filamento de una bombilla se quema y su derivación completa el circuito, habrá menos resistencia total en este último, porque la resistencia de la derivación es mucho menor que la resistencia del filamento. (Advierta que los filamentos de las bombillas buenas y la derivación de la bombilla quemada están en serie, por lo que las resistencias se suman.)

Con menos resistencia total, habrá más corriente en el circuito, y las bombillas buenas restantes brillarán con un poco más de fuerza porque la salida de luz de una bombilla está directamente relacionada con la potencia que recibe. (Recuerde que la potencia eléctrica está relacionada con la corriente mediante $P = I^2R$). La respuesta correcta es entonces la *a*. Por ejemplo, suponga que la guirnalda de luces tiene originalmente 18 bombillas idénticas. Como el voltaje total a lo largo de la guirnalda es de 120 V, la caída de voltaje en cualquiera de las bombillas es $(120 \text{ V})/18 = 6.7 \text{ V}$. Si una de ellas se quema (y se hace la derivación), el voltaje a través de cada una de las bombillas en funcionamiento sería de $(120 \text{ V})/17 = 7.1 \text{ V}$. Este voltaje incrementado hace que la corriente se incremente. Ambos incrementos contribuyen a que cada bombilla reciba más potencia y, por consiguiente, a que las luces sean más brillantes (recuerde la expresión alternativa para la potencia eléctrica, $P = IV$).

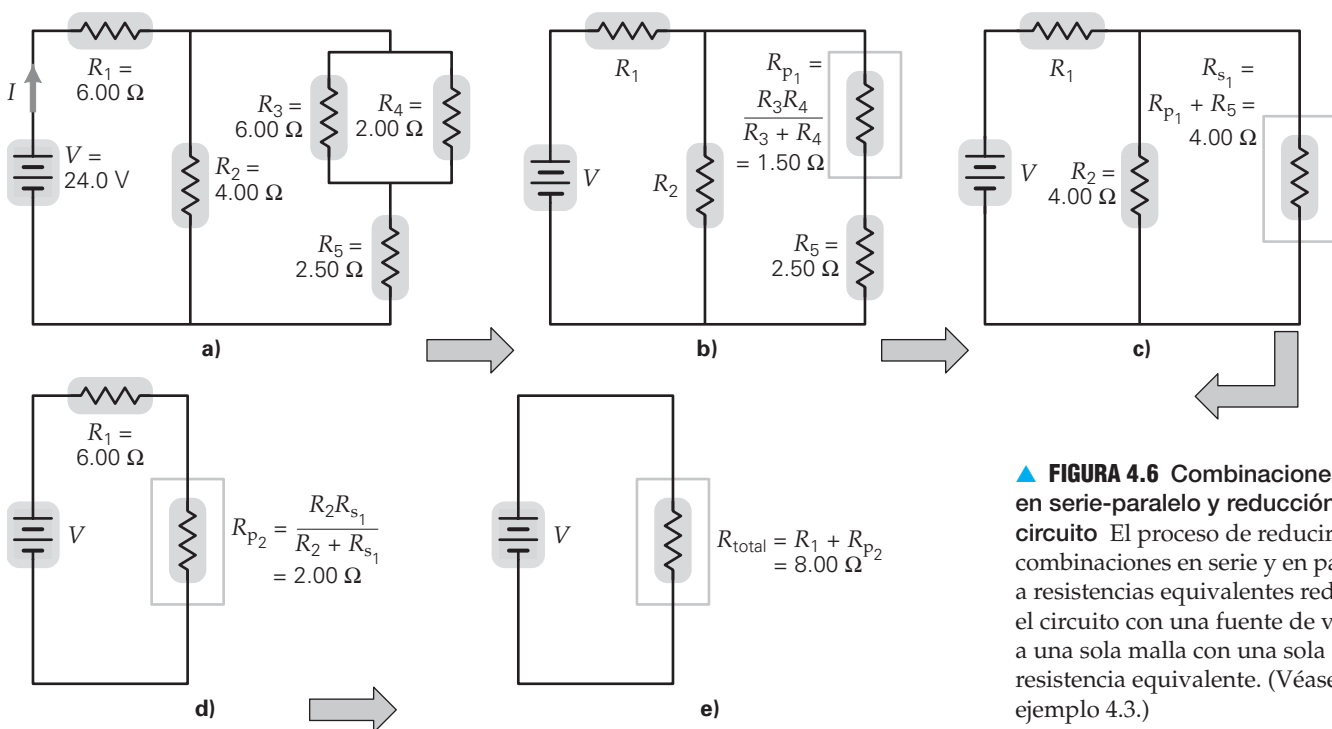
Ejercicio de reforzo. En este ejemplo, si usted retira una de las bombillas, ¿cuál sería el voltaje a través *a*) del enchufe vacío y *b*) cualquiera de las bombillas restantes? Explique su respuesta.

Combinaciones de resistores en serie-paralelo

Los resistores pueden conectarse en un circuito según varias combinaciones en serie-paralelo. Como se muestra en la figura 4.6, los circuitos con una sola fuente de voltaje en ocasiones se reducen a una sola malla equivalente, que contenga justo la fuente de voltaje y una resistencia equivalente, aplicando los resultados en serie y en paralelo.

A continuación se describe un procedimiento para analizar circuitos (determinando el voltaje y la corriente para cada elemento de circuito) para tales combinaciones:

1. Determine qué bloques de resistores están en serie y cuáles están en paralelo, y reduzca todos los bloques a resistencias equivalentes, usando las ecuaciones 4.2 y 4.3.



▲ FIGURA 4.6 Combinaciones en serie-paralelo y reducción de circuito El proceso de reducir combinaciones en serie y en paralelo a resistencias equivalentes reduce el circuito con una fuente de voltaje a una sola malla con una sola resistencia equivalente. (Véase el ejemplo 4.3.)

2. Reduzca más aún el circuito tratando las resistencias equivalentes separadas (del paso 1) como resistores individuales. Continúe hasta que obtenga una sola malla con un valor de la resistencia total (o equivalente).
3. Encuentre la corriente entregada al circuito reducido usando $I = V/R_{\text{total}}$.
4. Expanda el circuito reducido de regreso al circuito real invirtiendo los pasos de reducción, uno a la vez. Use la corriente del circuito reducido y encuentre las corrientes y voltajes para los resistores en cada paso.

Para ver cómo se utiliza este procedimiento, considere el siguiente ejemplo.

Ejemplo 4.3 ■ Combinación en serie-paralelo de resistores: ¿mismo voltaje o misma corriente?

¿Cuáles son los voltajes y la corriente en cada uno de los resistores R_1 a R_5 en la figura 4.6a?

Razonamiento. Aplicamos los pasos descritos previamente; antes de comenzar, es importante identificar las combinaciones en serie y en paralelo. Es claro que R_3 está en paralelo con R_4 (lo que se expresa como $R_3 \parallel R_4$). Esta combinación en paralelo está en serie con R_5 . Además, el tramo $R_3 \parallel R_4 + R_5$ están en paralelo con R_2 . Finalmente, esta combinación en paralelo está en serie con R_1 . Combinando los resistores paso a paso nos permite determinar la resistencia equivalente total del circuito (paso 2). A partir de ese valor, es posible calcular la corriente total. Luego, procediendo hacia atrás, podemos encontrar la corriente y el voltaje en cada resistor.

Solución. Para evitar errores de redondeo, los resultados se tomarán con tres cifras significativas.

Dado: Valores en la figura 4.6a

Encuentre: Corriente y voltaje en cada resistor (figura 4.6a)

La combinación en paralelo en el lado derecho del diagrama del circuito se reduce a la resistencia equivalente R_{p_1} (véase la figura 4.6b), mediante la ecuación 4.3:

$$\frac{1}{R_{p_1}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{6.00 \, \Omega} + \frac{1}{2.00 \, \Omega} = \frac{4}{6.00 \, \Omega}$$

Esta expresión es equivalente a

$$R_{p_1} = 1.50 \, \Omega$$

Esta operación deja una combinación en serie de R_{p_1} y R_5 de ese lado, que se reduce a R_{s_1} usando la ecuación 4.2 (figura 4.6c):

$$R_{s_1} = R_{p_1} + R_5 = 1.50 \, \Omega + 2.50 \, \Omega = 4.00 \, \Omega$$

Entonces, R_2 y R_{s_1} están en paralelo y se reducen (usando de nuevo la ecuación 4.3) a R_{p_2} (figura 4.6d):

$$\frac{1}{R_{p_2}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{s_1}} = \frac{1}{4.00 \, \Omega} + \frac{1}{4.00 \, \Omega} = \frac{2}{4.00 \, \Omega}$$

Esta expresión es equivalente a

$$R_{p_2} = 2.00 \, \Omega$$

Esta operación deja dos resistencias (R_1 y R_{p_2}) en serie. Estas resistencias se combinan para dar la resistencia equivalente total (R_{total}) del circuito (figura 4.6e):

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_{p_2} = 6.00 \, \Omega + 2.00 \, \Omega = 8.00 \, \Omega$$

Así, la batería entrega una corriente de

$$I = \frac{V}{R_{\text{total}}} = \frac{24.0 \, \text{V}}{8.00 \, \Omega} = 3.00 \, \text{A}$$

Ahora procedemos hacia atrás y “reconstruimos” el circuito real. Note que la corriente de la batería es la misma que la corriente por R_1 y R_{p_2} , ya que están en serie. (En la figura 4.6d, $I = I_1 = 3.00 \, \text{A}$ e $I = I_{p_2} = 3.00 \, \text{A}$.) Por lo tanto, los voltajes a través de esos resistores son

$$V_1 = I_1 R_1 = (3.00 \, \text{A})(6.00 \, \Omega) = 18.0 \, \text{V}$$

y

$$V_{p_2} = I_{p_2} R_{p_2} = (3.00 \, \text{A})(2.00 \, \Omega) = 6.00 \, \text{V}$$

Como R_{p_2} está formada de R_2 y R_{s_1} (figura 4.6c y d), debe haber una caída de 6.00 V a través de esos dos resistores. Podemos usar esto para calcular la corriente a través de cada uno.

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{6.00 \, \text{V}}{4.00 \, \Omega} = 1.50 \, \text{A} \quad \text{e} \quad I_{s_1} = \frac{V_{s_1}}{R_{s_1}} = \frac{6.00 \, \text{V}}{4.00 \, \Omega} = 1.50 \, \text{A}$$

Ahora, advierta que I_{s_1} es también la corriente en R_{p_1} y R_5 , porque están en serie. (En la figura 4.6b, $I_{s_1} = I_{p_1} = I_5 = 1.50 \, \text{A}$.)

Por lo tanto, los voltajes individuales de los resistores son

$$V_{P_1} = I_{s_1} R_{P_1} = (1.50 \text{ A})(1.50 \Omega) = 2.25 \text{ V}$$

y

$$V_5 = I_{s_1} R_5 = (1.50 \text{ A})(2.50 \Omega) = 3.75 \text{ V}$$

respectivamente. (Como verificación, compruebe que los voltajes sumen 6.00 V.)

Finalmente, el voltaje a través de R_3 y R_4 es el mismo que V_{P_1} (¿por qué?), y

$$V_{P_1} = V_3 = V_4 = 2.25 \text{ V}$$

Con estos voltajes y resistencias que hemos obtenido, las dos últimas corrientes, I_3 e I_4 , son

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{2.25 \text{ V}}{6.00 \Omega} = 0.38 \text{ A}$$

e

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{2.25 \text{ V}}{2.00 \Omega} = 1.13 \text{ A}$$

Se espera que la corriente (I_{s_1}) se divida en la unión $R_3 - R_4$. Se dispone entonces de la verificación: $I_3 + I_4$ es igual a I_{s_1} , dentro de los errores de redondeo.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, verifique que la potencia total entregada a todos los resistores es la misma que la salida de potencia de la batería.

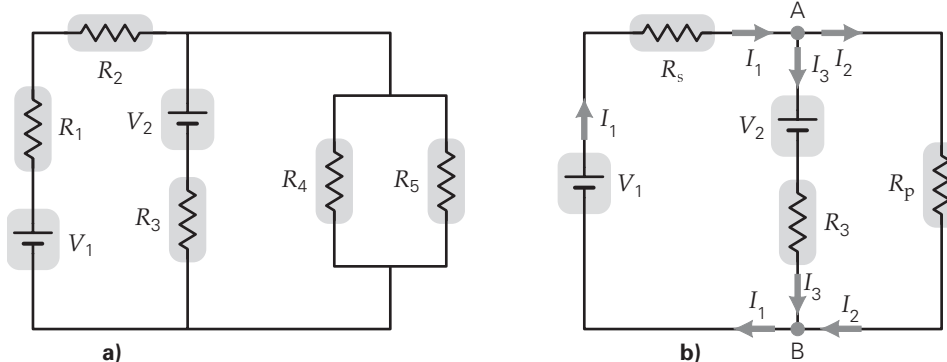
4.2 Circuitos de múltiples mallas y reglas de Kirchhoff

OBJETIVOS: a) Comprender los principios físicos en que se basan las reglas de los circuitos de Kirchhoff y b) aplicar esas reglas en el análisis de circuitos reales.

Los circuitos en serie-paralelo con una sola fuente de voltaje siempre pueden reducirse a una sola malla, como vimos en el ejemplo 4.3. Sin embargo, hay circuitos que contienen varias mallas, cada una con varias fuentes de voltaje, resistencias o ambas. En muchos casos, los resistores no están conectados en serie ni en paralelo. Un circuito de múltiples mallas, que no se presta para el método de análisis descrito en la sección 18.1, se ilustra en la [figura 4.7a](#). Aun cuando es posible reemplazar algunas combinaciones de resistores por sus resistencias equivalentes ([figura 4.7b](#)), este circuito puede reducirse sólo en tanto que se usen procedimientos en paralelo y en serie.

El análisis de esos tipos de circuitos requiere un enfoque más general, esto es, la aplicación de las **reglas de Kirchhoff**.^{*} Estas reglas comprenden la conservación de la carga y la conservación de la energía. (Aunque no se mencionaron de manera específica, las reglas de Kirchhoff se aplicaron a los circuitos en serie y en paralelo analizados en la sección 4.1.) Ahora, es conveniente introducir la terminología que nos ayudará a describir circuitos complejos:

- Un punto en el que se conectan tres o más alambres se llama **unión** o **nodo**; por ejemplo, el punto A en la [figura 4.7b](#).
- Una trayectoria que conecta dos uniones se llama **rama**. Una rama puede contener uno o más elementos de circuito y puede haber más de dos ramas entre dos uniones.



Nota: las reglas de Kirchhoff fueron desarrolladas por el físico alemán Gustav Kirchhoff (1824-1887).

FIGURA 4.7 Circuito de mallas múltiples En general, un circuito que contiene fuentes de voltaje en más de una malla no puede reducirse más por métodos en serie y en paralelo. Sin embargo, algunas reducciones dentro de cada malla son posibles, como del inciso a al b. En una unión de circuito, donde tres o más alambres se conectan, la corriente se divide o se une, como en las uniones A y B en el inciso b, respectivamente. La trayectoria entre dos uniones se llama rama. En b hay tres ramas, esto es, tres trayectorias diferentes entre las uniones A y B.

^{*} Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) fue un científico alemán que hizo importantes contribuciones a la teoría de los circuitos eléctricos y a la espectroscopia de la luz. Inventó el espectroscopio, un dispositivo que separa la luz en sus colores fundamentales y que permite estudiar la "huella" de varios elementos.

Teorema de la unión de Kirchhoff

La **primera regla de Kirchhoff** o **teorema de la unión** establece que la suma algebraica de las corrientes en cualquier unión es cero:

$$\sum I_i = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Suma de corrientes} \\ \text{en una unión} \end{array} \quad (4.4)$$

La suma de las corrientes que entran a una unión (tomadas como positivas) y las que salen (tomadas como negativas) es cero. Esta regla es sólo un enunciado de la conservación de la carga (ninguna carga se acumula en una unión, ¿por qué?). Para la unión en el punto A en la figura 4.7b, la suma algebraica de las corrientes es $I_1 - I_2 - I_3 = 0$; en forma equivalente,

$$I_1 = I_2 + I_3$$

corriente que entra = corriente que sale

(Esta regla se aplicó al analizar resistencias en paralelo en la sección 4.1.)

Sugerencia para resolver problemas

A veces, al observar el diagrama de un circuito no se sabe si una corriente particular entra o sale de una unión. En este caso, *suponga* la dirección. Luego calcule las corrientes. Si una de sus suposiciones resulta opuesta a la dirección real de la corriente, entonces será una respuesta negativa para esa corriente. Este resultado significa que la dirección de la corriente es contraria a la dirección que inicialmente se eligió.

Teorema de las mallas de Kirchhoff

La **segunda regla de Kirchhoff** o **teorema de las mallas** establece que la suma algebraica de las diferencias de potencial (voltajes) a través de todos los elementos de cualquier malla cerrada es cero:

$$\sum V_i = 0 \quad \begin{array}{l} \text{suma de voltajes} \\ \text{alrededor de una malla} \end{array} \quad (4.5)$$

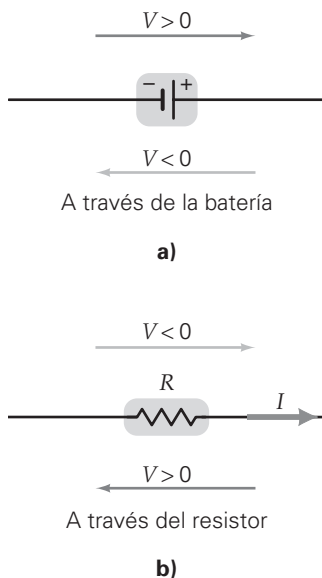
Esta expresión significa que la suma de los aumentos de voltaje (un incremento en el potencial) es igual a la suma de las caídas de voltaje (un decremento en el potencial) alrededor de una malla cerrada, que debe ser así para que la energía se conserve. (Esta regla se empleó al analizar las resistencias en serie en la sección 4.1.)

Observe que al recorrer una malla de circuito en sentidos diferentes se tendrá un aumento o una caída de voltaje a través de cada elemento del circuito. Por eso se establece una convención de signos para los voltajes. Usaremos la convención ilustrada en la figura 4.8. El voltaje a través de una batería se toma como positivo (elevación de voltaje) si la malla se recorre de la terminal negativa a la positiva (figura 4.8a); y es negativo si la malla se recorre en el sentido opuesto, de la terminal positiva a la negativa. (El sentido de la corriente en la batería no tiene *nada* que ver con el signo del voltaje a través de ésta. El signo del voltaje depende sólo del sentido en que elegimos recorrer la batería.)

El voltaje a través de un resistor se toma como negativo (un decremento) si se recorre en el mismo sentido que la corriente asignada, en esencia, cuando se recorre “hacia abajo” de acuerdo con el potencial (figura 4.8b). Es evidente que el voltaje será positivo si el resistor se recorre en el sentido contrario (en contra del sentido de la corriente, ganando potencial eléctrico). Juntas, estas convenciones de signo permiten sumar los voltajes alrededor de una malla cerrada, independientemente del sentido escogido para efectuar la suma. La ecuación 4.5 es la misma en cualquier caso. Note que el hecho de invertir el sentido elegido equivale simplemente a multiplicar la ecuación 4.5 (para el sentido original) por -1 . Esta operación no altera la ecuación.

Sugerencia para resolver problemas

Al aplicar el teorema de la malla de Kirchhoff, el signo de un voltaje a través de un resistor está determinado por el sentido de la corriente en ese resistor. Sin embargo, hay situaciones en donde el sentido no es obvio. ¿Cómo se manejan los signos del voltaje en tales casos? Después de suponer un sentido para la corriente, siga la convención de signos del voltaje *con base en este sentido supuesto*. Esto garantiza que las dos convenciones de signos sean consistentes. Si resulta que el sentido real de la corriente es contrario a su elección, las caídas de voltaje reflejarán esto automáticamente.



▲ **FIGURA 4.8** Convención de signos para las reglas de Kirchhoff

a) El voltaje a través de una batería se toma como positivo si ésta se recorre de la terminal negativa a la terminal positiva. Se asigna un valor negativo si la batería se recorre de la terminal positiva a la terminal negativa. b) El voltaje a través de un resistor se toma como negativo si éste se recorre en el sentido de la corriente asignada (“corriente abajo”). Se considera positivo si la resistencia se recorre en el sentido opuesto al de la corriente asignada a esa rama (“corriente arriba”).

Una interpretación gráfica del teorema de la malla de Kirchhoff se presenta en la sección Aprender dibujando de la p. 100. El Ejemplo integrado 4.4 muestra que nuestras consideraciones previas sobre serie-paralelo son congruentes con esas reglas. Al mismo tiempo, hay que reconocer la importancia de dibujar correctamente un diagrama de circuito, ya que sirve como guía.

Ejemplo integrado 4.4 ■ Un circuito simple: uso de las reglas de Kirchhoff

Dos resistores R_1 y R_2 están conectados en paralelo. Esta combinación se conecta en serie con un tercer resistor R_3 , que tiene la mayor resistencia de los tres. Una batería completa el circuito, con un electrodo al principio y el otro al final de esta red. *a)* ¿Qué resistor llevará más corriente? 1) R_1 , 2) R_2 o 3) R_3 . Explique su respuesta. *b)* En este circuito suponga que $R_1 = 6.0 \Omega$, $R_2 = 3.0 \Omega$, $R_3 = 10.0 \Omega$, y que el voltaje terminal de la batería es de 12.0 V. Aplique las reglas de Kirchhoff para determinar la corriente y el voltaje en cada resistor.

a) Razonamiento conceptual. Es mejor ver primero un diagrama del circuito con base en la descripción de la red (ver figura 4.9). Se podría pensar que el resistor con la menor resistencia lleva la mayor corriente. Pero esto es cierto sólo si *todos* los resistores están en paralelo. Los dos resistores en paralelo llevan, cada uno, sólo una fracción de la corriente total. Sin embargo, como el total de sus dos corrientes está en R_3 , ese resistor lleva la corriente total y, por lo tanto, también la mayor. Por consiguiente, la respuesta correcta es la 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución.

Dado: $R_1 = 6.0 \Omega$ **Encuentre:** la corriente y el voltaje en cada resistor
 $R_2 = 3.0 \Omega$
 $R_3 = 10.0 \Omega$
 $V = 12.0 \text{ V}$

Hay tres corrientes incógnitas: la corriente total (I) y las corrientes en cada uno de los resistores en paralelo (I_1 e I_2). Como sólo hay una batería, la corriente debe ser en sentido de las manecillas del reloj (como se muestra en la figura). Aplicando el teorema de la unión de Kirchhoff a la primera unión (J en la figura 4.9a), tenemos

$$\sum I_i = 0 \quad \text{o} \quad I - I_1 - I_2 = 0 \quad (1)$$

Usando el teorema de la malla en sentido de las manecillas del reloj en la figura 18.9b, cruzamos la batería de la terminal negativa a la positiva y luego recorremos R_1 y R_2 para completar el circuito. La ecuación resultante (mostrando los signos de los voltajes explícitamente) es

$$\sum V_i = 0 \quad \text{o} \quad +V + (-I_1 R_1) + (-I R_3) = 0 \quad (2)$$

Una tercera ecuación se obtiene aplicando el teorema de la malla, pero esta vez yendo a través de R_2 en vez de R_1 (figura 4.9c). Esto da

$$\sum V_i = 0 \quad \text{o} \quad +V + (-I_2 R_2) + (-I R_3) = 0 \quad (3)$$

Poniendo en la batería el voltaje (en volts) y las resistencias (en ohms) y reordenando esas ecuaciones:

$$I = I_1 + I_2 \quad (1a)$$

$$12 - 6I_1 - 10I = 0 \quad \text{o} \quad 6 - 3I_1 - 5I = 0 \quad (2a)$$

$$12 - 3I_2 - 10I = 0 \quad (3a)$$

Sumando las ecuaciones (2a) y (3a) resulta $18 - 3(I_1 + I_2) - 15I = 0$. Sin embargo, de la ecuación (1a), $I = I_1 + I_2$. Por lo tanto,

$$18 - 3I - 15I = 0 \quad \text{o} \quad 18I = 18$$

y, al despejar la corriente total, se obtiene $I = 1.00 \text{ A}$.

Con las ecuaciones (3a) y (1a) es posible calcular las corrientes restantes:

$$I_2 = \frac{2}{3} \text{ A} \quad \text{e} \quad I_1 = \frac{1}{3} \text{ A}$$

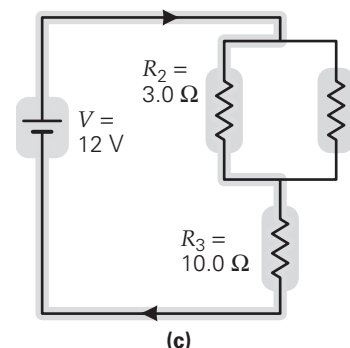
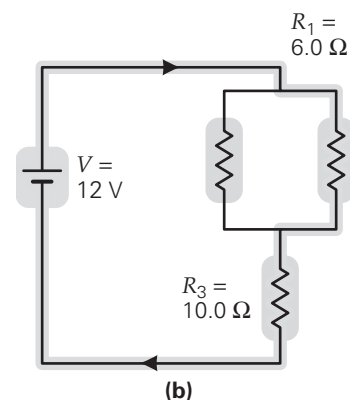
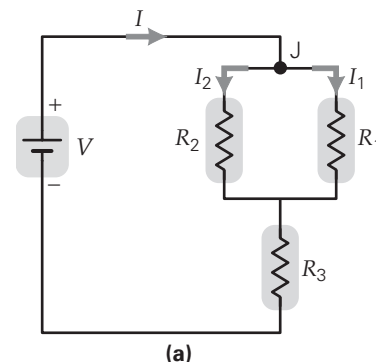
Estas respuestas son congruentes con nuestro razonamiento acerca del diagrama de circuito en el inciso a).

Como las corrientes y resistencias se conocen, los voltajes se obtienen con la ley de Ohm, $V = IR$. Así,

$$V_1 = I_1 R_1 = \left(\frac{1}{3} \text{ A}\right)(6.0 \Omega) = 2.0 \text{ V}$$

$$V_2 = I_2 R_2 = \left(\frac{2}{3} \text{ A}\right)(3.0 \Omega) = 2.0 \text{ V}$$

$$V_3 = I_3 R_3 = (1.0 \text{ A})(10.0 \Omega) = 10.0 \text{ V}$$



▲ FIGURA 4.9 Diagramas de circuito usando las reglas de Kirchhoff *a)* Diagrama del circuito de la descripción en el Ejemplo integrado 4.4. *b)* y *c)* Las dos mallas usadas en el análisis del Ejemplo integrado 4.4.

(continúa en la página 101)

APRENDER DIBUJANDO

DIAGRAMAS DE KIRCHHOFF: UNA INTERPRETACIÓN GRÁFICA DEL TEOREMA DE LA MALLA DE KIRCHHOFF

El teorema de la malla de Kirchhoff tiene una representación geométrica que le ayudará a comprender mejor su significado y visualizar los cambios de potencial en un circuito e incluso anticipar los resultados de un análisis matemático o confirmarlos cualitativamente. (No olvide que para efectuar un análisis completo de los circuitos, debe usarse también el teorema de la unión de Kirchhoff; véase el ejemplo 4.5.)

La idea es hacer un trazo tridimensional a partir del diagrama del circuito. Los alambres y elementos del circuito forman la base para el plano $x-y$, o el "piso" del diagrama. De forma perpendicular a este plano, a lo largo del eje z , se tiene el valor del potencial eléctrico (V), con una selección apropiada para el cero. Un diagrama como éste se llama *diagrama de Kirchhoff* (figura 1).

Las reglas para construir un diagrama de Kirchhoff son simples: comience en un valor conocido del potencial y recorra una malla completa, terminando donde empezó. Como usted regresa al mismo lugar, la suma de todas las elevaciones de potencial (voltajes positivos) deben equilibrarse con la suma de las caídas (voltajes negativos). Este requisito es la expresión geométrica de la conservación de la energía, implicada matemáticamente en el teorema de la malla de Kirchhoff.

Si el potencial aumenta (digamos al recorrer una batería de la terminal negativa a la positiva), dibuje una elevación en la dirección z . La elevación representa el voltaje terminal de la batería. Si el potencial disminuye (por ejemplo, al recorrer un resistor en el sentido de la corriente), asegúrese de que el potencial cae. Trate de dibujar los aumentos y caídas (los voltajes) a escala. Es decir, si hay un aumento importante en el potencial (como la que se tendría a través de una batería de alto voltaje), dibújelo en proporción a los otros sobre el diagrama.

Para circuitos elaborados, este método gráfico quizá resulte demasiado complicado para uso práctico. Vale la pena

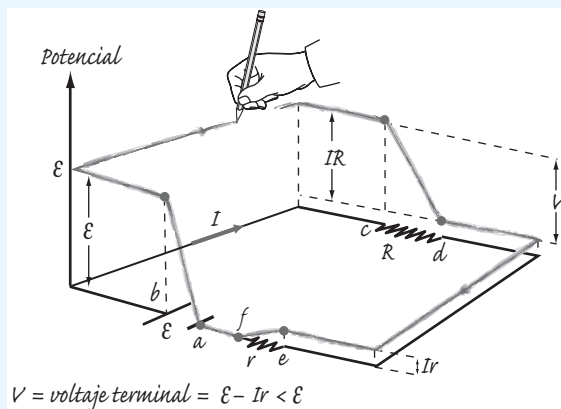


FIGURA 1 Diagramas de Kirchhoff: una estrategia gráfica para la resolución de problemas El esquema del circuito se traza en el plano $x-y$, y el potencial eléctrico se traza perpendicularmente a lo largo del eje z . El cero del potencial se toma como la terminal negativa de la batería. Se asigna un sentido para la corriente, y el valor del potencial se traza alrededor del circuito, siguiendo las reglas para las ganancias y las pérdidas de potencial. Este diagrama de Kirchhoff, muestra un aumento de potencial cuando la batería se recorre del cátodo al ánodo, una caída de potencial a través del resistor externo, y una menor caída del potencial a través de la resistencia interna de la batería.

tenerlo ya que ilustra la idea fundamental detrás del teorema de la malla.

Como ejemplo del poder de este método, considere el circuito en la figura 1: una batería con resistencia interna r conectada a un solo resistor externo R . El sentido de la corriente es del ánodo al cátodo a través del resistor externo. Escogemos el potencial del cátodo de la batería como cero. Comenzamos ahí y recorremos el circuito en el sentido de la corriente, mostramos un aumento en el potencial yendo del cátodo al ánodo. A continuación, mostramos que el potencial es constante conforme la corriente sigue a través de los alambres hasta el resistor externo. Esto es, no indicamos ninguna caída de voltaje a lo largo de los alambres conectores (¿por qué?).

En el resistor debe haber una caída considerable de potencial. Sin embargo, la caída no es hasta cero, porque debe haber algún voltaje restante para generar una corriente a través de la resistencia interna. Así, se observa por qué el voltaje terminal de la batería, V , debe ser menor que su fem (la elevación entre los puntos a y b).

La figura 2 muestra dos resistores en serie, y esa combinación en paralelo con un tercer resistor. Para simplificar, se supone que los tres resistores tienen la misma resistencia R , y que la resistencia interna de la batería es igual a cero. Comenzando en el punto a , se tiene una elevación en el potencial correspondiente al voltaje de la batería. Al trazar una malla a través del solo resistor, debe haber una sola caída en el potencial igual en magnitud a \mathcal{E} .

Si seguimos la malla que incluye los dos resistores, vemos que cada uno tiene sólo la mitad de la caída de voltaje total (¿por qué?). Así, cada uno llevará sólo la mitad de la corriente del resistor solo. Recuerde que en los circuitos paralelos, la mayor resistencia lleva la menor corriente. Observe cómo este enfoque geométrico le ayuda a desarrollar su intuición y le permite anticipar los resultados numéricos.

Trate de volver a dibujar la figura 2 tal como se vería si los resistores en serie tuvieran resistencias de R y $2R$. ¿Qué resistor tiene ahora el mayor voltaje? ¿Cómo se comparan las corrientes en los resistores con la situación anterior? Analice matemáticamente el circuito para confirmar sus expectativas.

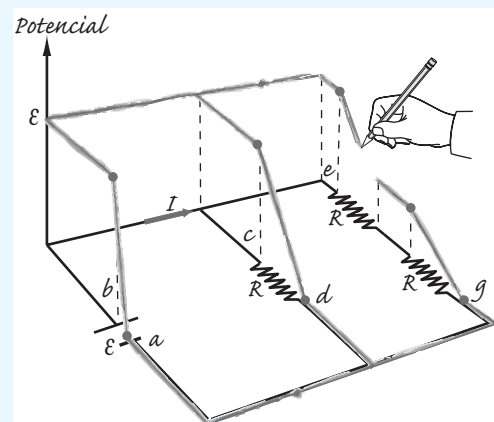


FIGURA 2 Diagrama de Kirchhoff de un circuito más complejo Imagine cómo cambiaría el trazo si varían los valores de los tres resistores. Luego, analice el circuito matemáticamente para ver si el diagrama le permitirá anticipar los voltajes y las corrientes.

Como era de esperarse, las caídas de voltaje a través de los resistores en paralelo son iguales. A causa de esto, dos tercios de la corriente total está en el resistor con la menor resistencia. Además, el voltaje total a través de la red es de 12.0 V, como debe ser.

Una aclaración especial antes de terminar con este ejemplo: sabemos que las respuestas deben estar en amperes y volts porque se utilizaron amperes, volts y ohms de forma consistente. Si permanecemos dentro del sistema (esto es, si las cantidades se expresan en volts, amperes y ohms), no se necesita convertir las unidades; las respuestas, automáticamente, estarán en estas unidades. (Por supuesto, siempre es una buena idea verificar sus unidades si surge alguna duda.)

Ejercicio de refuerzo. a) En este ejemplo, trate de predecir lo que sucederá con cada una de las corrientes si R_2 se incrementa. Explique su razonamiento. b) Repita el inciso b de este ejemplo, cambiando R_2 a 8.0Ω , y vea si su razonamiento es correcto.

Aplicación de la reglas de Kirchhoff

El ejemplo integrado 4.4 podría haberse resuelto usando las expresiones para resistencias equivalentes. Sin embargo, los circuitos de múltiples mallas, más complicados, requieren de un método más estructurado. En este libro, usaremos los siguientes pasos generales al aplicar las reglas de Kirchhoff:

1. Asigne una corriente y un sentido de corriente a cada rama en el circuito. Esto se hace más convenientemente en las uniones.
2. Indique las mallas y los sentidos en los que se van a recorrer (► figura 4.10). Cada rama *debe* estar por lo menos en una malla.
3. Aplique la primera regla de Kirchhoff (regla de la unión) para cada unión que da una ecuación única. (Este paso da un conjunto de ecuaciones que incluye *todas* las corrientes, pero es posible que haya ecuaciones redundantes para dos diferentes uniones.)
4. Recorra el número necesario de mallas para incluir todas las ramas. Al recorrer una malla, aplique la segunda regla de Kirchhoff, el teorema de la malla (utilizando $V = IR$ para cada resistor), y escriba las ecuaciones, considerando las convenciones de signos.

Si este procedimiento se aplica de forma adecuada, los pasos 3 y 4 dan un conjunto de N ecuaciones con N corrientes incógnitas. En esas ecuaciones se despejan las corrientes. Si se recorren más mallas de las necesarias, se tendrán ecuaciones redundantes. Es necesario sólo el número de mallas que incluye *una vez* cada rama.

Tal vez este procedimiento parezca complicado, pero en realidad es sencillo, como muestra el siguiente ejemplo.

Ejemplo 4.5 ■ Corrientes en ramas: uso de las reglas de Kirchhoff

Para el circuito en la figura 4.10, encuentre la corriente en cada rama.

Razonamiento. Los cálculos en serie o en paralelo no pueden usarse aquí. (¿Por qué?) En lugar de ello, la solución comienza más bien asignando sentidos a la corriente (“mejores conjeturas”) en cada malla, y luego se usa el teorema de la unión y de la malla (dos veces, una para cada malla) para generar tres ecuaciones, puesto que existen tres corrientes.

Solución.

Dado: Valores en la figura 4.10 **Encuentre:** La corriente en cada una de las tres ramas. Las corrientes y sus sentidos, así como los sentidos de recorrido elegidos de las mallas, se representan en la figura. (Recuerde, estos sentidos no son únicos; elíjalos, trabaje el problema y verifique los signos de la corriente final para ver si sus elecciones fueron correctas.) Hay una corriente en cada rama, y cada rama está en por lo menos una malla. (Algunas ramas están en más de una malla, lo que es aceptable.)

Aplicando la primera regla de Kirchhoff en la unión izquierda resulta

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

o bien, después de reordenar,

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (1)$$

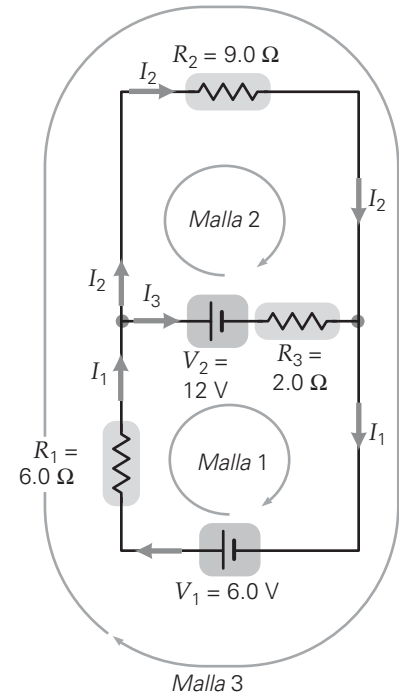
(Para la otra unión, podríamos escribir $I_2 + I_3 - I_1 = 0$, pero esta ecuación es equivalente a la ecuación 1, como hemos hecho con las uniones.)

Circulando alrededor de la malla 1 como en la figura 4.10 y aplicando el teorema de la malla de Kirchhoff con la convención de signos, resulta

$$\sum V_i = +V_1 + (-I_1 R_1) + (-V_2) + (-I_3 R_3) = 0 \quad (2)$$

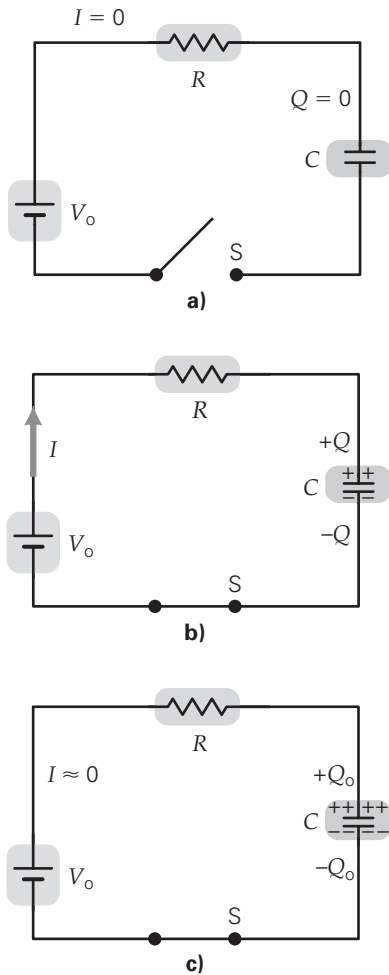
Entonces, sustituyendo los valores numéricos, obtenemos

$$+6 - 6I_1 - 12 - 2I_3 = 0$$



▲ **FIGURA 4.10** Aplicación de las reglas de Kirchhoff Para analizar un circuito como el del ejemplo 4.5, asigne una corriente y un sentido a cada rama en el circuito (conviene hacerlo en las uniones). Identifique cada malla y el sentido de recorrido. Luego escriba ecuaciones de corriente para cada unión independiente (usando el teorema de la unión de Kirchhoff). Además, escriba las ecuaciones de voltajes para tantas mallas como sea necesario para incluir cada rama (utilizando el teorema de la malla de Kirchhoff). Tenga cuidado de observar las convenciones de signos.

(continúa en la siguiente página)



▲ FIGURA 4.11 Carga de un condensador en un circuito RC en serie a) Inicialmente no hay corriente ni carga en el condensador. b) Cuando el interruptor está cerrado, hay una corriente en el circuito hasta que el condensador se carga hasta su máximo valor. La tasa de carga (y descarga) depende de la constante de tiempo, $\tau (= RC)$. c) Para tiempos mucho más largos que τ , la corriente es muy cercana a cero, y el condensador está plenamente cargado.

Al reordenar esta ecuación y dividir ambos lados entre 2, tenemos

$$3I_1 + I_3 = -3$$

Por conveniencia, se omiten las unidades (todas están en amperes y ohms, y, por lo tanto, son consistentes).

Para la malla 2, el teorema de la malla da

$$\sum V_i = +V_2 + (-I_2R_2) + (+I_3R_3) = 0 \tag{3}$$

De nuevo, después de sustituir los valores y de reordenar, tenemos,

$$9I_2 - 2I_3 = 12 \tag{3a}$$

Las ecuaciones (1), (2a) y (3a) forman un conjunto de tres ecuaciones con tres incógnitas. Las I se pueden despejar de varias maneras. Por ejemplo, sustituya la ecuación (1) en la ecuación (2) para eliminar I_1 :

$$3(I_2 + I_3) + I_3 = -3$$

que, después de reordenarse y dividirse entre 3, se simplifica a

$$I_2 = -1 - \frac{4}{3}I_3 \tag{4}$$

Luego, sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (3) se elimina I_2 :

$$9\left(-1 - \frac{4}{3}I_3\right) - 2I_3 = 12$$

Se resuelve algebraicamente y se despeja I_3 , para obtener

$$-14I_3 = 21 \quad \text{o} \quad I_3 = -1.5 \text{ A}$$

El signo menos en el resultado nos dice que se supuso un sentido equivocado para I_3 .

Sustituyendo el valor de I_3 en la ecuación (4), obtenemos el valor de I_2 :

$$I_2 = -1 - \frac{4}{3}(-1.5 \text{ A}) = 1.0 \text{ A}$$

Entonces, de la ecuación (1),

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1.0 \text{ A} - 1.5 \text{ A} = -0.5 \text{ A}$$

Una vez más, el signo menos indica que el sentido de I_1 fue incorrecto.

Observe que este análisis no usó la malla 3. La ecuación para esta malla sería redundante, pues no contendría nueva información (¿se da cuenta?).

Ejercicio de refuerzo. Repita este ejemplo, usando el teorema de las uniones, así como las mallas 3 y 1 en vez de las 1 y 2.

4.3 Circuitos RC

OBJETIVOS: a) Comprender la carga y descarga de un condensador a través de un resistor y b) calcular la corriente y el voltaje en tiempos específicos durante esos procesos.

Hasta ahora, sólo se han considerado circuitos de corrientes constantes. En algunos circuitos de corriente directa (cd), la corriente varía *con el tiempo* mientras mantiene un sentido constante (y sigue siendo “cd”). Tal es el caso con los **circuitos RC**, que, en general, constan de varios resistores y condensadores.

Carga de un condensador a través de un resistor

La carga por una batería de un condensador (o capacitor) inicialmente descargado se ilustra en la figura 4.11. Después de que se cierra el interruptor, aun cuando hay una separación entre las placas del condensador, la carga *debe* fluir mientras el condensador se está cargando.

La carga máxima (Q_0) que el condensador puede acumular depende de la capacitancia (C) y del voltaje de la batería (V_0). Para determinar el valor de Q_0 y comprender cómo es que tanto la corriente como la carga en el condensador varían con el tiempo, considere el siguiente argumento. A $t = 0$, no hay carga en el condensador, y, por lo tanto, tampoco hay voltaje a través de él. Mediante el teorema de la malla de Kirchhoff, esto significa que todo el voltaje de la batería debe aparecer a través del resistor, dando por resultado una corriente inicial (máxima) $I_0 = V_0/R$. Conforme la carga aumenta en el condensador, también lo hace el voltaje a través de las placas, reduciendo el voltaje y la corriente del resistor. Finalmente, el condensador queda cargado al máximo, y la corriente disminuye a cero. En ese momento, el voltaje del resistor es cero y el voltaje del condensador debe ser V_0 . A causa de la relación entre la carga en un condensador y su voltaje (capítulo 2, ecuación 2.19), la carga máxima del condensador está dada por $Q_0 = CV_0$. (Esta secuencia se ilustra en la figura 4.11.)

La resistencia es uno de los dos factores que ayudan a determinar qué tan rápido se carga el condensador, ya que cuanto mayor es su valor, mayor es la resistencia al flujo de carga. La capacitancia es el otro factor que influye en la rapidez de carga, ya que toma más tiempo cargar un condensador más grande. El análisis de este tipo de circuito requiere de matemáticas que están más allá del nivel de este libro. Sin embargo, se puede mostrar que el voltaje a través del condensador aumenta exponencialmente con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$V_C = V_o[1 - e^{-t/(RC)}] \quad (\text{voltaje del condensador cargándose en un circuito RC}) \quad (4.6)$$

donde e tiene un valor aproximado de 2.718. (Recuerde que el número irracional e es la base del sistema de *logaritmos naturales*.) Una gráfica de V_C versus t se muestra en la figura 4.12a. Como es de esperarse, V_C tiende a V_o , el voltaje máximo del condensador, después de “largo” tiempo.

Una gráfica de I versus t se presenta en la figura 4.12b. La corriente varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$I = I_o e^{-t/(RC)} \quad (4.7)$$

La corriente disminuye exponencialmente con el tiempo y tiene su valor máximo al inicio, como se esperaba.

De acuerdo con la ecuación 4.6, tomaría un tiempo infinito para que el condensador se cargara por completo. Sin embargo, en la práctica, los condensadores quedan cargados en tiempos relativamente cortos. Es común usar un valor especial para expresar el “tiempo de carga”. Este valor, llamado **constante de tiempo (τ)**, se expresa como

$$\tau = RC \quad \text{constante de tiempo para circuitos RC} \quad (4.8)$$

(Sería conveniente que usted demostrara que R_C tiene unidades de segundos.) Después de que ha transcurrido un tiempo igual a una constante de tiempo, $t = \tau = RC$, el voltaje a través del condensador en proceso de carga se ha elevado al 63% del máximo posible. Esto se ve evaluando V_C (ecuación 4.6), al reemplazar t con $\tau (= RC)$:

$$\begin{aligned} V_C &= V_o(1 - e^{-\tau/\tau}) = V_o(1 - e^{-1}) \\ &\approx V_o\left(1 - \frac{1}{2.718}\right) = 0.63V_o \end{aligned}$$

Como $Q \propto V_C$, esto implica que el condensador está cargado en un 63% de su máximo posible después de que ha transcurrido un tiempo igual a una constante de tiempo. Usted debería demostrar que después de una constante de tiempo, la corriente ha caído al 37% de su (máximo) valor inicial (I_o).

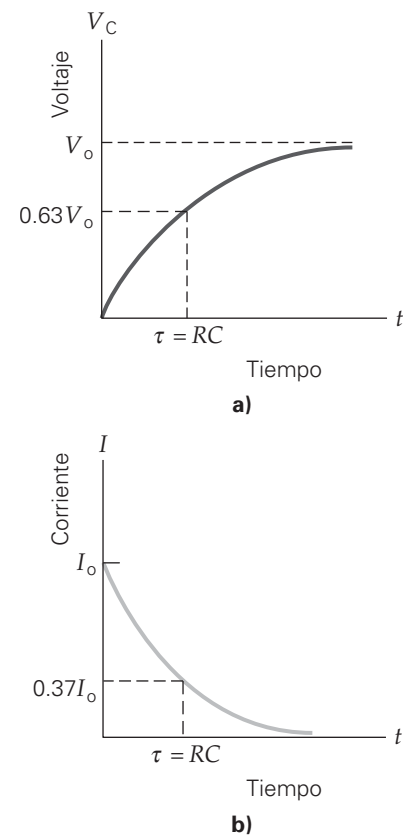
Al final de dos constantes de tiempo, $t = 2\tau = 2RC$, el condensador está cargado a más del 86% de su valor máximo; en $t = 3\tau = 3RC$, el condensador está cargado al 95% de su valor máximo, y así sucesivamente. Como regla general, el condensador se considera “plenamente cargado”, después que han transcurrido “varias constantes de tiempo”.

Descarga de un condensador a través de un resistor

La figura 4.13a muestra un condensador siendo *descargado* a través de un resistor. En este caso, el voltaje a través del condensador *disminuye* exponencialmente con el tiempo, como lo hace también la corriente. La expresión para la caída del voltaje del condensador (desde su voltaje máximo V_o) es

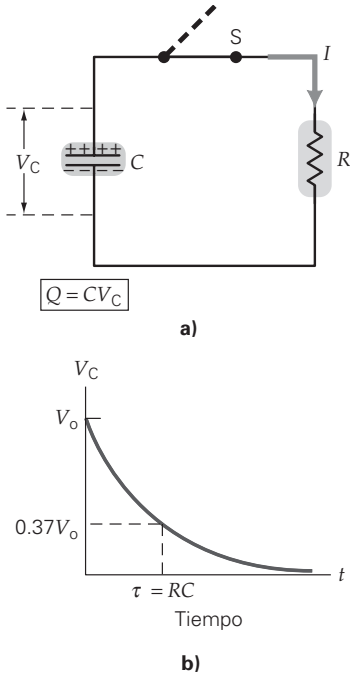
$$V_C = V_o e^{-t/(RC)} = V_o e^{-t/\tau} \quad (\text{descarga del voltaje del condensador en un circuito RC}) \quad (4.9)$$

Por ejemplo, en una constante de tiempo, el voltaje a través del condensador cae a 37% de su valor original (figura 4.13b). La corriente en el circuito decae exponencialmente, de acuerdo con la ecuación 4.7. Éste también es el comportamiento de un condensador en un desfibrilador cardíaco conforme descarga su energía almacenada (como un flujo de carga o corriente) a través del corazón (resistencia R) en un tiempo de descarga de 0.1 s. Los circuitos RC también son parte integral de los marcapasos cardíacos, que alternativamente cargan un condensador, transfieren la energía al corazón y repiten este proceso a una tasa determinada por la constante de tiempo. Para conocer más detalles sobre estos interesantes e importantes instrumentos, véase la sección A fondo 4.1, sobre las aplicaciones de los circuitos RC a la cardiología, en la p. 106. Otras aplicaciones interesantes de los circuitos RC en el campo médico se mencionan en los ejercicios 107 y 108. Como un ejemplo práctico, considere su uso en las modernas cámaras fotográficas en el ejemplo 4.6.



▲ FIGURA 4.12 Carga de un condensador en un circuito RC en serie a) En un circuito RC, conforme el condensador se carga, el voltaje a través de él aumenta no linealmente con el tiempo, alcanzando 63% de su voltaje máximo (V_o) en una constante de tiempo τ . b) La corriente en este circuito es inicialmente un máximo ($I_o = V_o/R$) y disminuye exponencialmente, cayendo al 37% de su valor inicial en una constante de tiempo, τ .

Nota: la mayoría de las calculadoras cuentan con un botón e^x . Para cálculos exponenciales, practique utilizándolo. Por ejemplo, asegúrese de que su calculadora le dé $e^{-1} \approx 0.37$.



▲ **FIGURA 4.13** Descarga de un condensador en un circuito RC en serie **a)** El condensador está inicialmente cargado. Cuando el interruptor se cierra, aparece corriente en el circuito conforme el condensador comienza a descargarse. **b)** En este caso, el voltaje a través del condensador (y la corriente en el circuito) decae exponencialmente con el tiempo, cayendo al 37% de su valor inicial en una constante de tiempo, τ .

► **FIGURA 4.14** Circuito de destellos **a)** Cuando un tubo de neón se conecta a través del condensador en un circuito RC en serie que tiene la fuente apropiada de voltaje, el voltaje a través del tubo oscilará con el tiempo. Como resultado, el tubo emite periódicamente destellos. **b)** Una gráfica del voltaje *versus* el tiempo muestra el efecto oscilante entre V_b , el voltaje “de ruptura”, y V_m , el voltaje “de mantenimiento”. Véase el texto para una explicación detallada.

Ejemplo 4.6 ■ Circuitos RC en cámaras fotográficas: encender el flash es tan fácil como disminuir un logaritmo

En muchas cámaras fotográficas, el flash integrado se enciende con la energía almacenada en un condensador. Este último se mantiene cargado usando baterías de larga vida con voltajes que, por lo regular, son de 9.00 V. Una vez que se enciende el flash, el condensador debe cargarse rápidamente, por medio de un circuito RC interno. Si el condensador tiene un valor de 0.100 F, ¿cuál debe ser la resistencia de forma que el condensador quede cargado al 80% de su carga máxima (la cantidad mínima de carga para encender la luz de nuevo) en 5.00 s?

Razonamiento. Después de una constante de tiempo, el condensador se carga al 63% de su voltaje y carga máximos. Como el condensador necesita el 80%, la constante de tiempo debe ser menor que 5.00 s. Podemos usar la ecuación 4.6 (junto con una calculadora) para determinar la constante de tiempo. A partir de ahí, es posible calcular el valor de resistencia que se requiere.

Solución. Los datos incluyen el voltaje final a través del condensador, V_C , que es el 80% del voltaje de la batería, lo que significa que Q es el 80% de la carga máxima.

Dado: $C = 0.100 \text{ F}$ **Encuentre:** R (la resistencia requerida de forma que el condensador esté cargado al 80% en 5.00 s)
 $V_b = V_o = 9.00 \text{ V}$
 $V_C = 0.80V_o = 7.20 \text{ V}$
 $t = 5.00 \text{ s}$

Insertando los datos en la ecuación 4.6, $V_C = V_o(1 - e^{-t/\tau})$, tenemos

$$7.20 = 9.00(1 - e^{-5.00/\tau})$$

Reordenando esta ecuación, se obtiene $e^{-5.00/\tau} = 0.20$, y el recíproco de esta expresión (para hacer positivo el exponente) es

$$e^{5.00/\tau} = 5.00$$

Para despejar la constante de tiempo, recuerde que si $e^a = b$, entonces a es el *logaritmo natural* (ln) de b . Así, en nuestro caso, $5.00/\tau$ es el logaritmo natural de 5.00. Usando una calculadora, encontramos que $\ln 5.00 = 1.61$. Por lo tanto,

$$\frac{5.00}{\tau} = \ln 5.00 = 1.61$$

o

$$\tau = RC = \frac{5.00}{1.61} = 3.11 \text{ s}$$

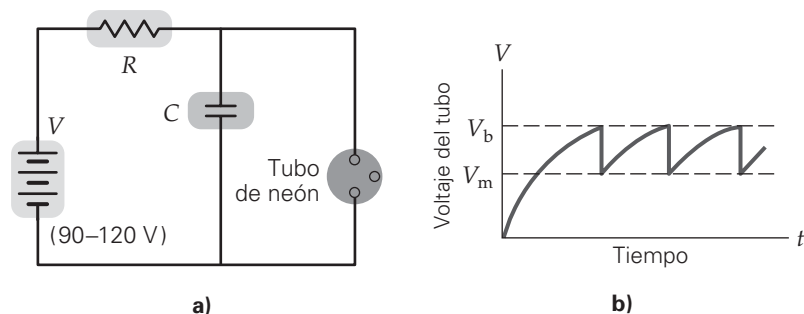
Despejando R , obtenemos

$$R = \frac{3.11 \text{ s}}{C} = \frac{3.11 \text{ s}}{0.10 \text{ F}} = 31 \Omega$$

Como se esperaba, la constante de tiempo es menor que 5.0 s, porque alcanzar el 80% del voltaje máximo requiere un periodo más prolongado que una constante de tiempo.

Ejercicio de refuerzo. **a)** En este ejemplo, ¿cómo se compara la energía almacenada en el condensador (después de 5.00 s) con el almacenamiento máximo de energía? Explique por qué no es el 80%. **b)** Si usted se esperara 10.00 s para cargar el condensador, ¿cuál sería su voltaje? ¿Por qué no es el doble del voltaje que existe a través del condensador después de 5.00 s?

Una aplicación de un circuito RC se presenta en la figura 4.14a. Este circuito se llama *circuito de destellos* (u *oscilador de relajación de tubo neón*). El resistor y condensador están inicialmente conectados en serie, y entonces un tubo neón en miniatura se conecta en paralelo con el condensador.



Cuando el circuito está cerrado, el voltaje a través del condensador (y el tubo neón) se eleva de 0 a V_b , que es el *voltaje de ruptura* del gas neón en el tubo (aproximadamente 80 V). A ese voltaje, el gas se ioniza (es decir, los electrones se liberan de los átomos, creando cargas positivas y negativas que tienen libertad de movimiento). Entonces, el gas comienza a conducir electricidad, y el tubo se ilumina. Cuando el tubo está en un estado conductor, el condensador se descarga a través de él, y el voltaje cae rápidamente (figura 4.14b). Cuando el voltaje cae por debajo de V_m , llamado *voltaje de mantenimiento*, la ionización en el tubo ya no puede sostenerse, y el tubo deja de conducir. El condensador empieza a cargarse de nuevo, el voltaje se eleva de V_m a V_b , y el ciclo se repite. La repetición continua de este ciclo ocasiona que el tubo lance destellos.

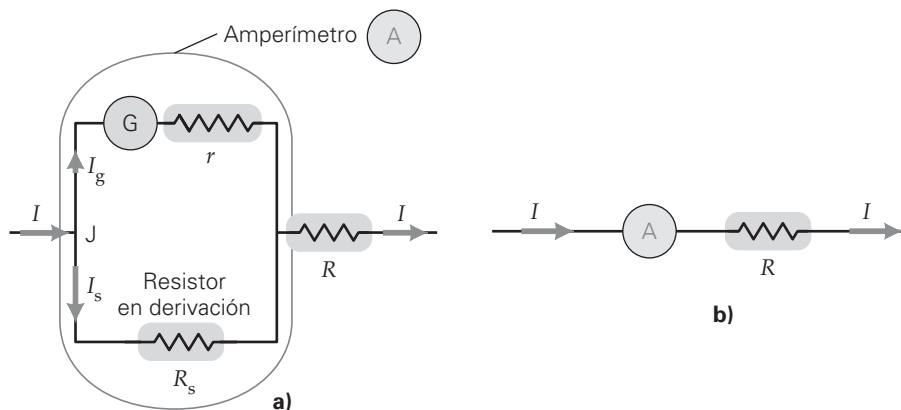
4.4 Amperímetros y voltímetros

OBJETIVOS: a) Comprender cómo los galvanómetros se usan como amperímetros y voltímetros, b) cómo se construyen las versiones con diferentes escalas de esos dispositivos y c) cómo se conectan para medir corriente y voltaje en circuitos reales.

Como sus nombres implican, un **amperímetro** mide corriente a través de elementos de circuito y un **voltímetro** mide voltajes a través de elementos de circuito. Un componente básico de esos dos tipos de medidores es un **galvanómetro** (►figura 4.15a). El galvanómetro opera con base en principios magnéticos, que se estudiarán en el capítulo 5. En este capítulo, el galvanómetro se considerará simplemente como un elemento de circuito que tiene una resistencia interna r (por lo general, alrededor de 50Ω); las desviaciones de su aguja son directamente proporcionales a la corriente en él (figura 4.15b).

Amperímetros

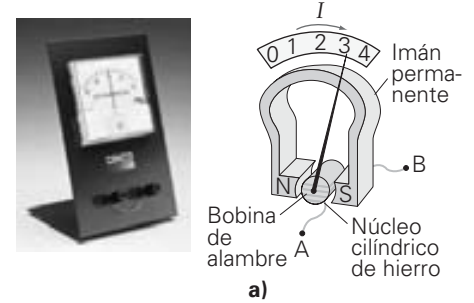
Un galvanómetro mide corriente, pero por la pequeña resistencia en su bobina, sólo es posible medir las corrientes en el rango de microamperios sin quemar los alambres de la bobina. Sin embargo, hay una manera de construir un amperímetro para medir mayores corrientes con un galvanómetro. Para lograrlo, se conecta un pequeño *resistor en derivación* (con una resistencia R_s) en paralelo con un galvanómetro. El trabajo del resistor en derivación (o simplemente, derivación, para abreviar) consiste en tomar la mayor parte de la corriente (►figura 4.16). Esto requiere que la derivación tenga mucho menos resistencia que el galvanómetro ($R_s \ll r$). El siguiente ejemplo ilustra cómo se determina la resistencia de la derivación en el diseño de un amperímetro.



Ejemplo 4.7 ■ Diseño de un amperímetro usando las reglas de Kirchhoff: selección de un resistor en derivación

Suponga que tiene un galvanómetro capaz de conducir con seguridad una corriente máxima en su bobina de $200 \mu\text{A}$ (esto se llama *su sensibilidad a escala plena*) y que tiene una resistencia en la bobina de 50Ω . Se va a utilizar en un amperímetro diseñado para leer corrientes de hasta 3.0 A (a escala plena). ¿Cuál es la resistencia en derivación requerida? (Véase la figura 4.16a.)

Razonamiento. El galvanómetro sólo puede llevar una corriente pequeña, por lo que la mayor parte de la corriente tendrá que ser desviada, o “derivada”, a través del resistor en derivación. Así, esperamos que la resistencia en derivación sea mucho menor que la resis-



▲ FIGURA 4.15 El galvanómetro

a) Un galvanómetro es un dispositivo sensible a la corriente; las desviaciones de su aguja son proporcionales a la corriente a través de su bobina. b) El símbolo de circuito para un galvanómetro es un círculo que contiene una G. La resistencia interna (r) del medidor se indica explícitamente como r .

Nota: los amperímetros se conectan en serie con el elemento cuya corriente están midiendo (figura 4.16b).

◀ FIGURA 4.16 Un amperímetro

cd Aquí, R es la resistencia del resistor cuya corriente se está midiendo. a) Un galvanómetro en paralelo con un resistor en derivación (R_s) es un amperímetro capaz de medir varios rangos de corriente, dependiendo del valor de R_s . b) El símbolo en un circuito para un amperímetro es un círculo con una A dentro. (Véase el ejemplo 4.7 para una explicación detallada del diseño de un amperímetro.)

(continúa en la siguiente página)

tencia interna del galvanómetro. Como el resistor en derivación y la resistencia de la bobina, en realidad, son dos resistores están en paralelo, tienen el mismo voltaje. Esta información —junto con las leyes de Kirchhoff—, nos permite determinar el valor de R_s .

Solución. Se listan los datos

Dado: $I_g = 200 \mu\text{A} = 2.00 \times 10^{-4} \text{ A}$ **Encuentre:** R_s (resistencia en derivación)

$$r = 50 \Omega$$

$$I_{\text{máx}} = 3.0 \text{ A}$$

Como los voltajes a través del galvanómetro y el resistor en derivación son iguales, podemos escribir (usando subíndices “g” para galvanómetro y “s” para derivación; véase la figura 4.16a)

$$V_g = V_s \quad \text{o} \quad I_g r = I_s R_s$$

Usando la regla de unión de Kirchhoff en el punto J, la corriente I en el circuito externo es $I = I_g + I_s$ o $I_s = I - I_g$. Sustituyendo esto en la ecuación anterior, tenemos

$$I_g r = (I - I_g) R_s$$

A FONDO

4.1 APLICACIONES DE LOS CIRCUITOS RC A LA CARDIOLOGÍA

El corazón humano, en condiciones normales, late entre 60 y 70 veces por minuto, y cada latido bombea unos 70 mL de sangre (alrededor de un galón por minuto). El corazón es, en esencia, una bomba compuesta por células musculares especializadas. Las células se activan para latir cuando reciben señales eléctricas (figura 1). Estas señales (véase la sección A fondo 16.1 referente a la transmisión nerviosa en el capítulo 2) son enviadas por células especiales, llamadas *células marcapaso*, localizadas en el *nodo sinoauricular* (*nodo SA*, para abreviar) en una de las cámaras superiores o aurículas del corazón.

Durante un ataque cardíaco o después de un choque eléctrico, el corazón adopta un patrón irregular de latidos. Si un individuo no recibe tratamiento, esta condición resulta fatal en pocos minutos. Por fortuna, es posible hacer que el corazón recobre su patrón normal al pasarle una corriente eléctrica. El instrumento que hace posible esto se llama *desfibrilador cardíaco*. El componente principal de un desfibrilador es un condensador cargado a un alto voltaje.*

Se requieren varios cientos de joules de energía eléctrica para restablecer el ritmo cardíaco. Las placas de alto y bajo voltaje del condensador se ponen en contacto con la piel del paciente mediante dos electrodos que se colocan justo por encima de ambos lados del corazón (figura 2a y 2b). Cuando se enciende el interruptor, la corriente fluye a través del corazón y así se transfiere la energía del condensador a este órgano en un intento por restablecer el número correcto de latidos.

*Como las baterías portátiles no son capaces de dar altos voltajes, el proceso de carga se basa en un fenómeno llamado inducción electromagnética, que se estudiará en el capítulo 6.

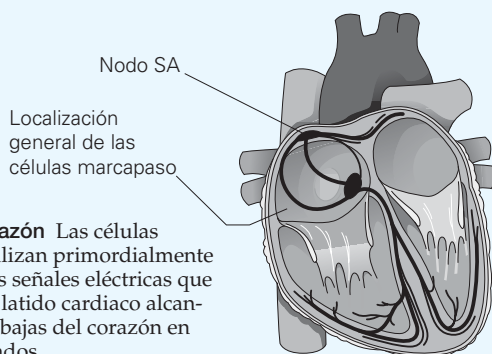


FIGURA 1 El corazón Las células marcapaso se localizan primordialmente en el nodo SA. Las señales eléctricas que desencadenan un latido cardíaco alcanzan las áreas más bajas del corazón en unos 50 milisegundos.

Esta descarga es la de un circuito RC. Por lo general, el condensador tiene un valor de $10 \mu\text{F}$ y está cargado a 1000 V . (Avances recientes en dieléctrica han permitido fabricar condensadores de 1 F o más. Esto reduce la necesidad de alto voltaje porque la energía almacenada es proporcional a la capacitancia, $U_C = CV^2/2$). La resistencia del corazón (R_H) es, por lo regular, de 1000Ω , lo que da una constante de tiempo (para descarga) de $\tau = R_H C = 10^{-2} \text{ s} = 10 \text{ ms}$.

En virtud de esta constante de tiempo de descarga de 10 ms , el condensador se descarga por completo después de 50 ms . El condensador debe recargarse en unos 5 s (figura 2c). De esta forma, la constante de tiempo de *carga* debería ser de 1 s . Esto significa que el resistor de carga debe tener un valor aproximado (R_C) de $R_C = \tau/C \approx 10^5 \Omega$.

En algunos tipos de ataque al corazón, los latidos cardíacos son irregulares por problemas con las células marcapaso. El corazón puede recobrar su latido normal gracias a un dispositivo (que se implanta), llamado *marcapasos cardíaco*. Estas unidades tienen el tamaño de una caja de cerillos, poseen una batería de larga vida y se insertan quirúrgicamente cerca del nodo SA.

La mayoría de los marcapasos están controlados mediante un complejo circuito de activación que les permite enviar señales al corazón sólo si es necesario (marcapasos “de demanda”; véanse las figuras 3a y 3b). El circuito de activación envía una señal al marcapasos para que se “encienda” si el corazón deja de latir; si late normalmente, el interruptor del condensador se queda en la posición de carga total, en espera de una señal de encendido.

Para nuestros propósitos, el marcapasos es un circuito RC. El condensador (por lo común de $10 \mu\text{F}$) se queda cargado gracias a la batería y debe estar listo para liberar su energía tan rápido como 70 veces por minuto (en el caso del peor escenario, cuando las propias células marcapaso del corazón no funcionan en absoluto). La resistencia del músculo cardíaco entre los electrodos del marcapasos es de 100Ω , lo que significa que la constante de tiempo de descarga del dispositivo es $\tau \approx 1 \text{ ms}$. Por lo tanto, se descarga por completo en 5 ms .

Para operar 70 veces por segundo, el condensador tiene que cargarse, encenderse y recargarse en $1/70 \approx 14 \text{ ms}$. Como tarda aproximadamente 5 ms en descargarse, tiene unos 9 ms para recargarse, lo que da una constante de tiempo de recarga de 2 ms . Esto requiere que el resistor de recarga R_C (el resistor en el circuito a través del cual se carga el condensador) esté, cuando mucho, a 200Ω (figura 3c).

Por lo tanto, la resistencia en derivación R_s es

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{I_g r}{I_{\text{máx}} - I_g} \\ &= \frac{(2.00 \times 10^{-4} \text{ A})(50 \Omega)}{3.0 \text{ A} - 2.00 \times 10^{-4} \text{ A}} \\ &= 3.3 \times 10^{-3} \Omega = 3.3 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

La resistencia en derivación es muy pequeña comparada con la resistencia de la bobina, lo que permite el paso de la mayor parte de la corriente (2.9998 A a escala plena) a través del resistor en derivación. El amperímetro leerá corrientes linealmente hasta 3.0 A. Por ejemplo, si una corriente de 1.5 A fluyera en el amperímetro, habría una corriente de $100 \mu\text{A}$ en la bobina del galvanómetro (la mitad de la máxima permitida), lo que daría una lectura de media escala, o 1.5 A.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si hubiéramos usado una resistencia en derivación de $1.0 \text{ m}\Omega$, ¿cuál sería la lectura de escala plena (máxima lectura de corriente) del amperímetro?

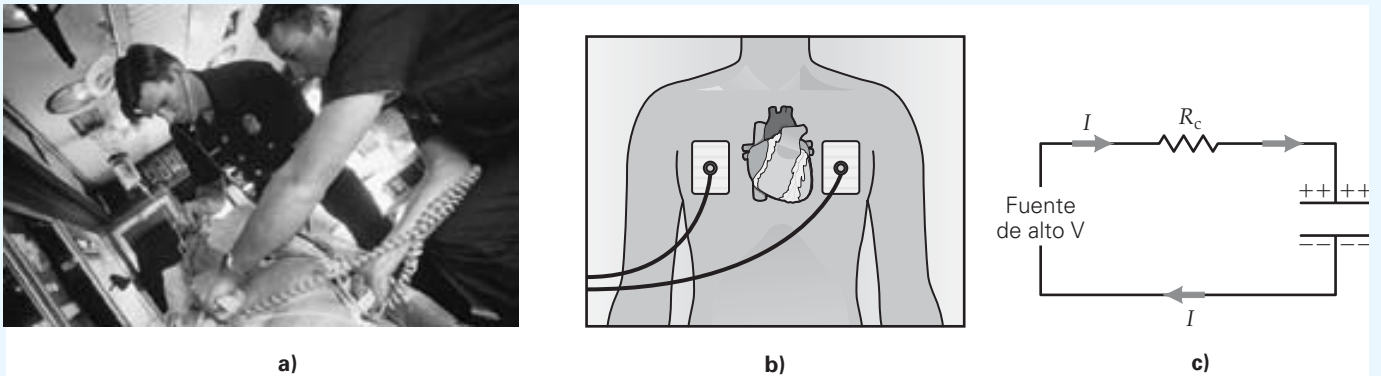


FIGURA 2 ¡Reactiven el corazón! *a)* Los electrodos se colocan externamente a ambos lados del corazón, y la energía de un condensador cargado pasa a través de él para ayudarlo a restablecer su patrón normal de latidos. *b)* Esta figura muestra un diagrama del uso corrector del desfibrilador. La descarga es la de un circuito RC. *c)* Recarga del condensador del desfibrilador para dejarlo listo otra vez, mediante un resistor (de carga) $R_C \approx 10^5 \Omega$.

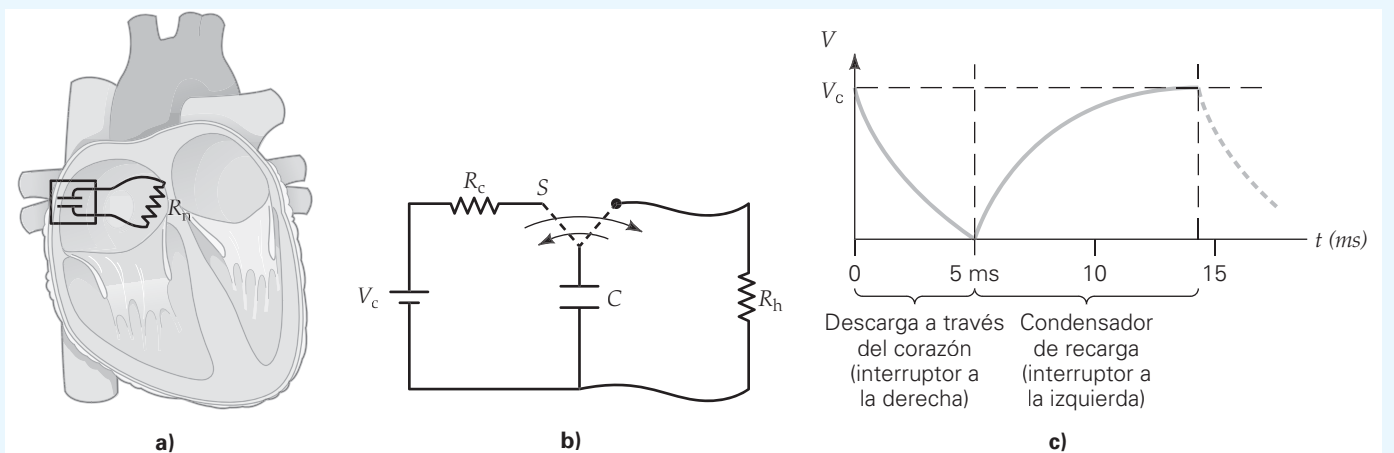
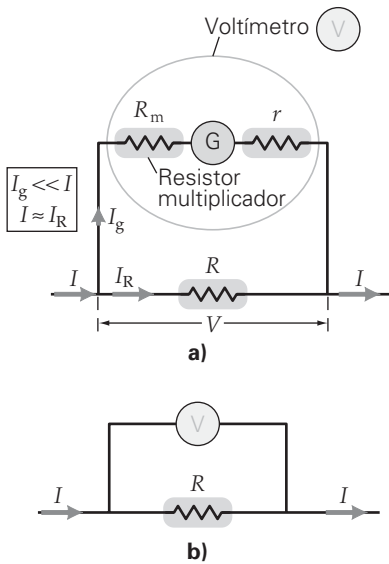


FIGURA 3 Marcapasos cardíaco *a)* Un marcapasos común (mostrado como un condensador en una caja) se implanta quirúrgicamente sobre o cerca de la superficie del corazón, con sus cables conectados al músculo cardíaco (resistencia R_n). (El circuito de carga del condensador no se muestra.) Otros cables (no ilustrados) reciben señales del corazón para determinar si el marcapasos necesita “encenderse”. *b)* El circuito sensor determina la posición del “interruptor” del condensador. Si el corazón no late, el circuito sensor da vuelta al interruptor hacia la derecha, iniciando la descarga de energía a través del músculo cardíaco. Si el corazón late adecuadamente, el circuito sensor deja el interruptor a la izquierda, manteniendo el condensador cargado por completo. *c)* Si el marcapasos está en operación, un ciclo completo toma 15 ms. Se necesitan unos 5 ms para la descarga a través del músculo cardíaco y otros 10 ms para recargar el condensador. La recarga se completa gracias a una batería de larga vida, V_c .



▲ **FIGURA 4.17** Un voltímetro cd
Aquí, R es la resistencia del resistor cuyo voltaje se está midiendo. **a)** Un galvanómetro en serie con un resistor multiplicador (R_m) es un voltímetro capaz de medir varios rangos de voltaje, dependiendo del valor de R_m . **b)** El símbolo de circuito para un voltímetro es un círculo con una V dentro. (Véase el ejemplo 4.8 para una explicación detallada del diseño de un voltímetro.)

Nota: los voltímetros se conectan en paralelo o a través del elemento cuyo voltaje están midiendo (figura 4.17b).

Voltímetros

Un voltímetro que es capaz de leer voltajes superiores al rango de microvolts (cualquier voltaje mayor quemaría el galvanómetro si éste estuviera solo) se construye conectando un gran *resistor multiplicador en serie* con un galvanómetro (◀figura 4.17). Como el voltímetro tiene una gran resistencia, a causa del resistor multiplicador, extrae poca corriente del elemento de circuito cuyo voltaje mide. Sin embargo, la corriente que existe en el voltímetro es proporcional al voltaje a través del elemento del circuito. Así, el voltímetro se calibra en volts. Para comprender mejor esta configuración, considere el ejemplo 4.8.

Ejemplo 4.8 ■ Diseño de un voltímetro: uso de la reglas de Kirchhoff para escoger un resistor multiplicador

Suponga que el galvanómetro del ejemplo 4.7 se usará en un voltímetro con una lectura completa de 3.0 V. ¿Cuál es la resistencia requerida del multiplicador?

Razonamiento. Para convertir un galvanómetro en un voltímetro, necesitamos una reducción de la corriente, lo que se logra añadiendo un “resistor multiplicador” grande en serie. Todos los datos necesarios para calcular la resistencia del multiplicador se dan aquí y en el ejemplo 4.7.

Solución. Primero, se lista los datos:

| | |
|--|--|
| Dado: $I_g = 200 \mu\text{A}$ | Encuentre: R_m (resistencia del |
| $= 2.00 \times 10^{-4} \text{ A}$ (a partir del ejemplo 4.7) | multiplicador) |
| $r = 50 \Omega$ (del ejemplo 4.7) | |
| $V_{\text{máx}} = 3.0 \text{ V}$ | |

Las resistencias del galvanómetro y del multiplicador están en serie. Esta combinación está en paralelo con el elemento de circuito externo (R). Por lo tanto, el voltaje a través del elemento de circuito externo es la suma de los voltajes a través del galvanómetro y multiplicador (figura 4.17):

$$V = V_g + V_m$$

Los voltajes a través del galvanómetro y los resistores multiplicadores son

$$V_g = I_g r \quad \text{y} \quad V_m = I_g R_m$$

Combinando esas tres ecuaciones, tenemos

$$V = V_g + V_m = I_g r + I_g R_m = I_g (r + R_m)$$

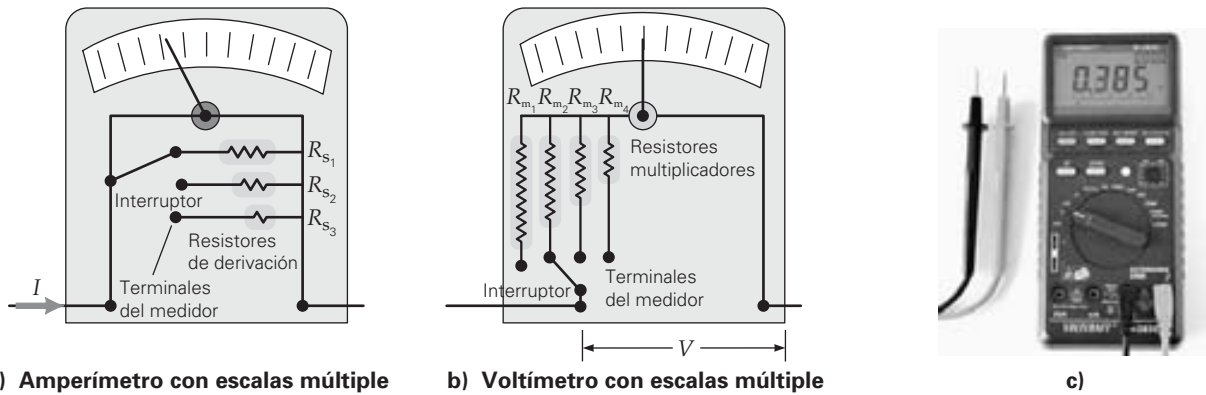
Despejando la resistencia del multiplicador, tenemos

$$\begin{aligned} R_m &= \frac{V - I_g r}{I_g} \\ &= \frac{3.0 \text{ V} - (2.00 \times 10^{-4} \text{ A})(50 \Omega)}{2.00 \times 10^{-4} \text{ A}} \\ &= 1.5 \times 10^4 \Omega = 15 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Observe que el segundo término en el numerador ($I_g r$) es insignificante comparado con la lectura plena de 3.0 V. Así, con una buena aproximación, $R_m \approx V/I_g$ o $V \propto I_g$. El voltaje medido es proporcional a la corriente en el galvanómetro.

Ejercicio de refuerzo. El voltímetro en este ejemplo se usa para medir el voltaje de un resistor en un circuito. Una corriente de 3.00 A fluye a través del resistor (1.00 Ω) antes de conectar el voltímetro. Suponiendo que la corriente total que llega (I en la figura 4.17b) permanece igual después de que se conecta el voltímetro, calcule la corriente en el galvanómetro.

Por versatilidad, los amperímetros y voltímetros se fabrican con diferentes escalas. Esta tarea se logra dando al usuario varias opciones de resistores en derivación o resistores multiplicadores (▶figura 4.18a y b). También se fabrican combinaciones de estos medidores y se conocen como *multímetros*, que miden voltaje, corriente y, a menudo, resistencia. Los multímetros digitales electrónicos son comunes (figura 4.18c). En lugar de galvanómetros mecánicos, esos dispositivos usan circuitos electrónicos que analizan señales digitales para calcular voltajes, corrientes y resistencias, que se despliegan en la pantalla.



▲ FIGURA 4.18 Medidores de varias escalas *a)* Un amperímetro o *b)* un voltímetro se utilizan para medir diversos rangos de corriente y de voltaje, si se conectan entre diferentes resistores de derivación o multiplicadores, respectivamente. (En lugar de un interruptor, hay una terminal exterior para cada rango.) *c)* Ambas funciones se combinan en un solo multímetro, que se muestra aquí a la izquierda midiendo el voltaje a través de una bombilla de luz. (¿Cómo se sabe que no está midiendo la corriente?)

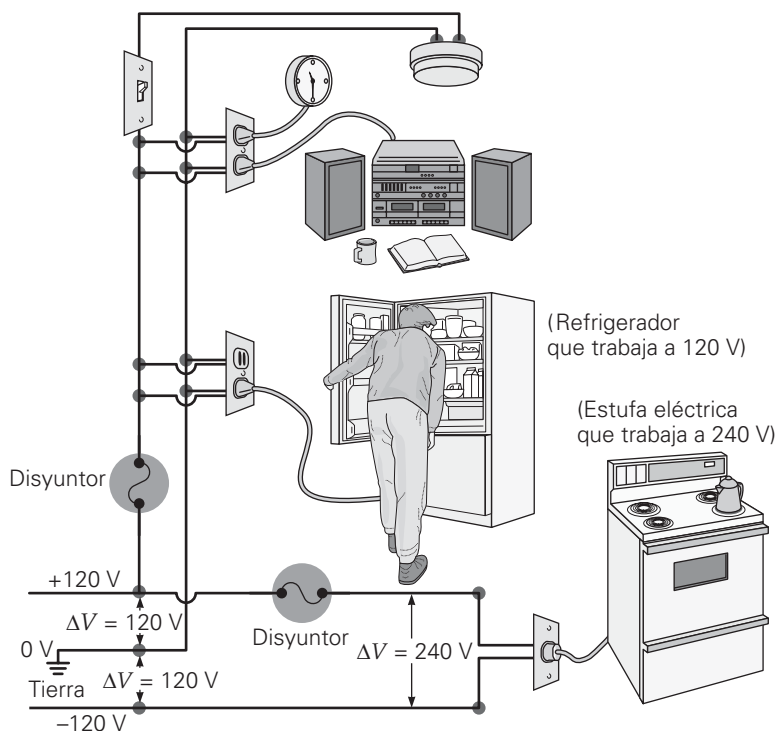
4.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica

OBJETIVOS: *a)* Comprender cómo los circuitos domésticos están cableados y *b)* conocer los principios que rigen sobre los dispositivos eléctricos de seguridad.

Aunque los circuitos domésticos usan generalmente corriente alterna, que aún no hemos estudiado, usted comprenderá su operación (y muchas de sus aplicaciones prácticas) gracias a los principios de los circuitos que ya hemos visto.

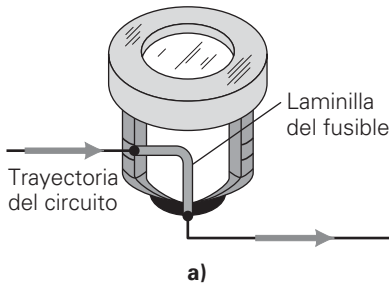
Por ejemplo, ¿esperaría usted que los elementos (lámparas, aparatos, etc.) de un circuito doméstico estén conectados en serie o en paralelo? A partir del análisis de las bombillas de un árbol de Navidad (sección 4.1), debería ser aparente que los elementos domésticos deben conectarse en paralelo. Por ejemplo, cuando la bombilla de una lámpara se funde, otros elementos del circuito continúan trabajando. Además, los dispositivos domésticos y lámparas generalmente están clasificados para funcionar a 120 V. Si esos elementos estuvieran conectados en serie, ninguno de los elementos individuales del circuito tendría un voltaje de 120 V.

La energía eléctrica se suministra a una casa por medio de un sistema de tres cables (▼ figura 4.19). Existe una diferencia de potencial de 240 V entre los dos cables “calientes”



◀ FIGURA 4.19 Cableado doméstico Un circuito de 120 V se obtiene conectando cualquiera de las líneas “calientes” y la línea de tierra. Un voltaje de 240 V (para grandes aparatos como estufas eléctricas) se obtiene conectando las dos líneas “calientes” de polaridad contraria. (Nota: para obtener mayor claridad, la línea de tierra [la tercera línea que tiene las puntas redondeadas], no se muestra.)

Nota: el voltaje doméstico fluctúa, en condiciones normales, entre 110 y 120 V. De manera similar, las conexiones a 240 V pueden estar tan bajas como 220 V y aun así se les considera normales.



▲ **FIGURA 4.20** Fusibles *a)* Un fusible contiene una tira o una cinta metálica que se funde cuando la corriente excede cierto valor establecido. Esto abre el circuito y evita el sobrecalentamiento. *b)* Los fusibles base de Edison (a la izquierda) tienen una rosca similar a la de las bombillas de luz. Las roscas son idénticas en este tipo de fusibles; así, es posible intercambiar fusibles con diferente clasificación de amperaje. Los fusibles tipo S (a la derecha) tienen roscas distintas para clasificaciones diferentes, por lo que no es posible intercambiarlos.

o de alto potencial. Cada uno de esos cables “calientes” tiene una diferencia de potencial de 120 V con respecto a la tierra. El tercer cable se lleva a tierra en el punto donde los cables entran a la casa, generalmente por medio de una barra metálica empotrada en el suelo. Este cable se define como el potencial cero y se le llama *cable a tierra* o *neutro*.

La diferencia en potencial de 120 V necesaria para la mayor parte de los aparatos domésticos se obtiene conectándolos entre el cable a tierra y cualquiera de los cables de alto potencial. El resultado es el mismo en cualquiera de los casos, porque $\Delta V = 120 \text{ V} - 0 \text{ V} = 120 \text{ V}$ o $\Delta V = 0 \text{ V} - (-120 \text{ V}) = 120 \text{ V}$. (Véase la figura 4.19.)

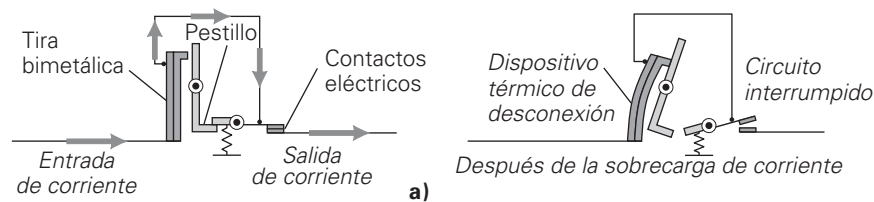
Aun cuando el cable a tierra tiene cero potencial, es portador de corriente por ser parte del circuito completo. Grandes dispositivos como acondicionadores centrales de aire, hornos y calentadores de agua necesitan operar a 240 V. Este voltaje se obtiene conectándolos entre los dos cables calientes: $\Delta V = 120 \text{ V} - (-120 \text{ V}) = 240 \text{ V}$. Aunque la corriente a través de un dispositivo (en condiciones de operación por debajo de 120 V) se indica en una etiqueta de clasificación, también puede determinarse a partir de la clasificación de potencia (usando $I = P/V$). Por ejemplo, un estéreo clasificado a 180 W extraería una corriente promedio de 1.5 A (porque $I = P/V = 180 \text{ W} / 120 \text{ V} = 1.50 \text{ A}$).

Hay limitaciones sobre el número de aparatos que pueden ponerse en un circuito y sobre la corriente *total* en ese circuito. Específicamente, el calor de joule (o pérdida I^2R) en los cables debe tomarse en consideración. Cuanto más elementos en paralelo, menor es la resistencia equivalente del circuito. Añadir aparatos (encendidos) incrementa la corriente total. Recuerde que los cables tienen alguna resistencia y quedarán sometidos a un considerable calor de joule si la corriente es suficientemente grande. Por lo tanto, al agregar demasiados aparatos, se corre el riesgo de sobrecargar un circuito doméstico y producir demasiado calor *en los cables*. Este calor podría fundir el aislante e iniciar un incendio.

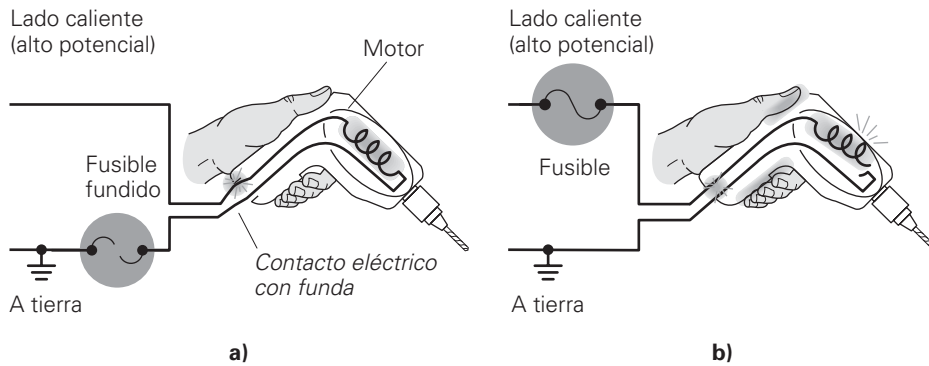
La sobrecarga se previene limitando la corriente en un circuito por medio de dos tipos de dispositivos: fusibles y disyuntores (o *breakers*). Los **fusibles** (◀ figura 4.20) son comunes en las casas antiguas. Un fusible de base Edison tiene cuerdas o roscas como las que existen en la base de una bombilla de luz. (Véase la figura 4.20b.) Dentro del fusible existe una franja metálica que se funde cuando la corriente es mayor que el valor de clasificación (por lo regular de 15 A para un circuito de 120 V). El fundido de la franja rompe (o abre) el circuito, y la corriente cae a cero.

Los **disyuntores** se utilizan exclusivamente en el cableado de casas modernas. Un tipo (▼ figura 4.21) usa una franja bimetálica (véase el capítulo 8 de *Física 11*). Cuando aumenta la corriente en la franja, ésta se calienta y se dobla. Al llegar al valor de clasificación de la corriente, la franja se doblará lo suficiente para abrir el circuito. La franja se enfría entonces rápidamente, y el disyuntor puede reinstalarse. Sin embargo, un fusible quemado o un disyuntor desconectado indica que ¡el circuito está intentando extraer demasiada corriente! *Encuentre y corrija el problema antes de reemplazar el fusible o de reinstalar el disyuntor*. Además, en ninguna circunstancia, debe reemplazarse (ni siquiera temporalmente) un fusible fundido por otro de una clasificación más alta de corriente (¿por qué?). Si no se dispone de un fusible de la correcta clasificación, por seguridad, es mejor dejar el circuito abierto (a menos que controle elementos necesarios en caso de emergencia o que sean cruciales para la vida) hasta que se encuentre el fusible correcto.

Los interruptores, fusibles y disyuntores se colocan en el lado “caliente” (de alto potencial) del circuito. Por supuesto, también pueden trabajar si se les coloca en el lado conectado a tierra. Para ver por qué no es conveniente esto último, considere lo siguiente. Si se les colocara ahí, aun cuando el interruptor estuviera abierto, el fusible fundido o el disyuntor disparado, los aparatos seguirían conectados a un potencial elevado, lo cual resultaría potencialmente peligroso si una persona hace contacto eléctrico (▶ figura 4.22a).



▲ **FIGURA 4.21** Disyuntores de circuito *a)* Diagrama de un dispositivo térmico de desconexión. Al aumentar la corriente y el calor de joule, el elemento se dobla hasta que se abre el circuito para algún valor prefijado de la corriente. También existen dispositivos de desconexión que utilizan principios magnéticos. *b)* Un conjunto de disyuntores domésticos comunes.



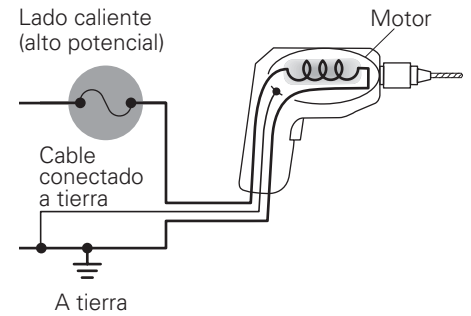
▲ **FIGURA 4.22 Seguridad eléctrica** *a)* Los interruptores y fusibles o disyuntores siempre deben estar conectados en el lado de alto potencial de la línea, no en el lado a tierra como se muestra en la figura. Si esos elementos se colocaran en el lado a tierra, la línea (y la cubierta metálica de un aparato) quedaría a un alto potencial aun cuando el fusible se quemara o se abra un interruptor. *b)* Aunque el fusible o el disyuntor esté en el lado “caliente”, existe una situación potencialmente peligrosa. Si un cable interno entra en contacto con la cubierta metálica de un aparato o herramienta de potencia, ésta tendrá un alto voltaje y, si una persona la toca, recibirá un choque eléctrico.

Aun con fusibles o disyuntores conectados correctamente en el lado de alto potencial de la línea, existe la posibilidad de provocar un choque eléctrico de un aparato defectuoso que tenga una cubierta metálica, como un taladro de mano. Por ejemplo, si un cable interior se afloja y hace contacto con la cubierta, ésta alcanzaría un potencial elevado (figura 4.22b). El cuerpo de una persona puede formar una trayectoria a tierra y convertirse en parte del circuito sufriendo un choque. Para conocer más acerca de los efectos de los choques eléctricos, véase la sección A fondo 4.2, que trata el tema electricidad y seguridad personal en la p. 112.

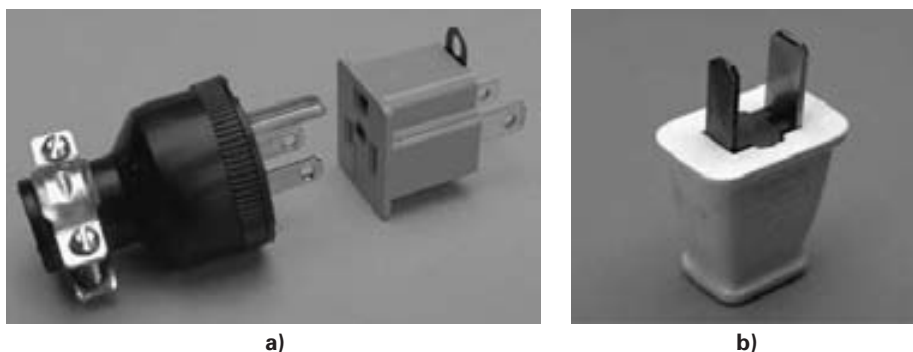
Para prevenir un choque, se agrega al circuito un tercer cable que lleva a tierra la cubierta metálica de los aparatos o herramientas de potencia (figura 4.23). Este cable ofrece una trayectoria de muy baja resistencia, pasando de lado a la herramienta. Este alambre normalmente no lleva corriente. Si un alambre caliente entra en contacto con la cubierta, el circuito se completa gracias a este cable a tierra. Entonces, el fusible se funde o el disyuntor se dispara, ya que la mayor parte de la corriente estaría en el tercer cable a tierra y no en usted. En tal caso, lo más probable es que usted no resulte dañado. Sin embargo, recuerde que si se reinstala el disyuntor, continuará disparándose a menos que se encuentre el origen del problema y se repare.

En las **clavijas de tres dientes**, el diente redondo grande se conecta con el cable de tierra. Se pueden utilizar adaptadores entre una clavija de tres dientes y una toma de corriente con entrada para dos dientes. Tales adaptadores tienen una agarradera o un cable que hace tierra (figura 4.24a) y que debe asegurarse a una caja receptáculo con un tornillo de seguridad. La caja receptáculo está conectada al cable que hace tierra. Si la agarradera o el cable del adaptador no están conectados, el sistema queda desprotegido, lo cual frustra el propósito del dispositivo de seguridad dedicado a hacer tierra.

Tal vez usted ha notado que existe otro tipo de clavija, una de dos dientes que se ajusta en el enchufe sólo en una dirección pues uno de los dientes es más ancho que el otro y una de las ranuras del receptáculo también es mayor (figura 4.24b). Este tipo de



▲ **FIGURA 4.23 Dirigido a tierra** Por seguridad, un tercer cable se conecta de un aparato o de una herramienta de potencia al suelo. Este cable destinado a tierra por lo común no lleva corriente (en oposición al cable del circuito conectado a tierra). Si un cable caliente entra en contacto con la cubierta metálica, la corriente seguirá el cable conectado a tierra (trayectoria de menor resistencia) en lugar de atravesar el cuerpo de la persona que sostiene el aparato. El enchufe que se utiliza para esto se observa en la figura 4.24.



◀ **FIGURA 4.24 Enchufe a tierra** *a)* Para alojar el cable a tierra (figura 4.23), se utiliza una clavija de tres dientes. El adaptador que aquí se observa permite conectar la clavija de tres dientes en un tomacorriente con entrada para dos dientes. La agarradera en el adaptador se debe conectar al tornillo asegurador de la placa en el receptáculo conectado a tierra; de otra forma, se perdería la seguridad del dispositivo. *b)* Una clavija polarizada. Los dientes de diferente tamaño permiten la identificación de los lados alto y de tierra de la línea. Véase el texto para conocer más detalles.

clavija se llama **clavija polarizada**. La *polarización* en el sentido eléctrico es un método de identificar los lados calientes y a tierra de la línea de forma que se puedan hacer conexiones particulares.

Esas clavijas polarizadas y las tomas de corriente son ahora una medida de seguridad común. Los receptáculos de pared están cableados de forma que la ranura pequeña se conecta con el lado caliente, y la ranura grande con el lado neutral o tierra. Si se identifica el lado caliente en esta forma, son posibles dos salvaguardias. Primero, el fabricante de un aparato eléctrico podrá diseñarlo de manera que el interruptor siempre esté del lado caliente de la línea. Así, todo el cableado del aparato, más allá del interruptor, será neutro cuando el interruptor esté abierto y el aparato quede desconectado. Es más, el fabricante conecta la cubierta del aparato al lado de tierra por medio de una clavija polarizada. Si algún cable caliente dentro del aparato se afloja y hace contacto con la cubierta metálica, el efecto será similar al que ocurre en el sistema conectado a tierra. El lado caliente de la línea será acortado hacia la tierra, lo cual fundirá un fusible o dispondrá un disyuntor.

Otro dispositivo eléctrico de seguridad, el interruptor de tierra falsa, se verá en el capítulo 6.

A FONDO 4.2 ELECTRICIDAD Y SEGURIDAD PERSONAL

Las medidas de seguridad son necesarias para evitar lesiones cuando se trabaja con electricidad. Los conductores de electricidad (como los cables) están recubiertos con materiales aislantes para poderlos manejar sin peligro. Sin embargo, cuando una persona entra en contacto con un conductor cargado, podría existir una diferencia de potencial a través de parte de su cuerpo. Un pájaro se puede posar sobre una línea de alto voltaje sin ningún problema porque sus dos patas están al mismo potencial; por lo tanto, *no hay diferencia de potencial* que genere una corriente en el pájaro. Pero si una persona que lleva una escalera de aluminio (conductor) toca con ella una línea eléctrica, existirá una diferencia de potencial entre la línea y el suelo, y la escalera y la persona se convierten entonces en parte de un circuito portador de corriente.

El grado de lesión que sufre la persona en este caso depende de la cantidad de corriente eléctrica que fluye a través de su cuerpo y de la trayectoria del circuito. Sabemos que la corriente en el cuerpo está dada por $I = V/R_{\text{cuerpo}}$. Es evidente que la corriente depende de la resistencia del cuerpo.

Sin embargo, la resistencia del cuerpo varía. Si la piel está seca, la resistencia puede ser de $0.50 \text{ M}\Omega$ ($0.50 \times 10^6 \Omega$) o mayor. Para una voltaje de 120 V , se tendría una corriente de un cuarto de miliampere, porque

$$I = \frac{V}{R_{\text{cuerpo}}} = \frac{120 \text{ V}}{0.50 \times 10^6 \Omega} = 0.24 \times 10^{-3} \text{ A} = 0.24 \text{ mA}$$

Esta corriente es muy débil para sentirla (tabla 1). Pero si la piel está húmeda, entonces la R_{cuerpo} es de sólo $5.0 \text{ k}\Omega$ ($5.0 \times 10^3 \Omega$), y la corriente será de 24 mA (demuestre esto), un valor potencialmente peligroso. (Véase de nuevo la tabla 1.)

Una precaución básica que se debe tomar es evitar entrar en contacto con un conductor eléctrico que pudiera causar una diferencia de potencial a través de cualquier parte del cuerpo. El efecto de ese contacto depende de la trayectoria de la corriente a través del cuerpo. Si esta trayectoria va del dedo meñique al pulgar de la misma mano, una corriente grande puede causar una quemadura. Sin embargo, si la trayectoria va de una a otra mano a través del pecho (y, por lo tanto, a través del corazón), el efecto será peor. En la tabla 1 se dan algunos de los efectos posibles de esta trayectoria de circuito.

Las lesiones son el resultado de que la corriente interfiere con las funciones musculares y de que provoca quemaduras. Las funciones musculares están reguladas por impulsos eléctricos que viajan por los nervios (véase el capítulo 2) y éstos reciben influencia de las corrientes externas. Una corriente de unos cuantos miliamperios provocará una reacción muscular y dolor. A 10 mA , la parálisis muscular que sobreviene evitará que una persona se libere del conductor. Cerca de 20 mA se presenta una contracción de los músculos del pecho, que dificulta o impide la respiración. La muerte puede presentarse en pocos minutos. A 100 mA hay movimientos rápidos no coordinados de los músculos del corazón (*fibrilación ventricular*), que evitan un bombeo adecuado, condición que resulta fatal en unos cuantos segundos. Para trabajar con seguridad con la electricidad se requiere un conocimiento de los principios eléctricos fundamentales y sentido común. La electricidad debe ser tratada con respeto.

Ejercicios relacionados: 94 y 95

TABLA 1 Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano*

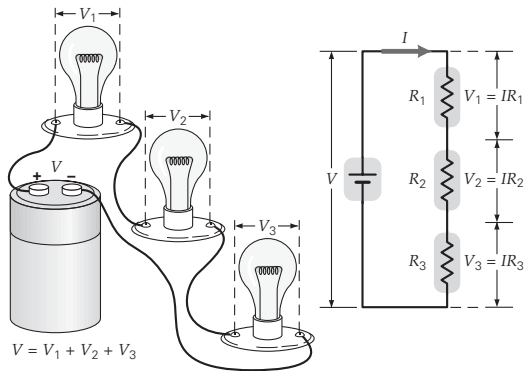
| Corriente (aproximada) | Efecto |
|------------------------|--|
| 2.0 mA (0.002 A) | Choque suave o calentamiento |
| 10 mA (0.01 A) | Parálisis de músculos motores |
| 20 mA (0.02 A) | Parálisis de músculos del pecho, causando paro respiratorio; fatal en unos cuantos minutos |
| 100 mA (0.1 A) | Fibrilación ventricular, que impide la coordinación de los latidos del corazón; fatal en unos pocos segundos |
| 1000 mA (1 A) | Quemaduras serias; fatal casi instantáneamente |

*El efecto sobre el cuerpo humano de una cantidad dada de corriente depende de varias condiciones. Esta tabla da sólo descripciones generales y relativas, que suponen una trayectoria circular que incluye el pecho superior.

Repaso del capítulo

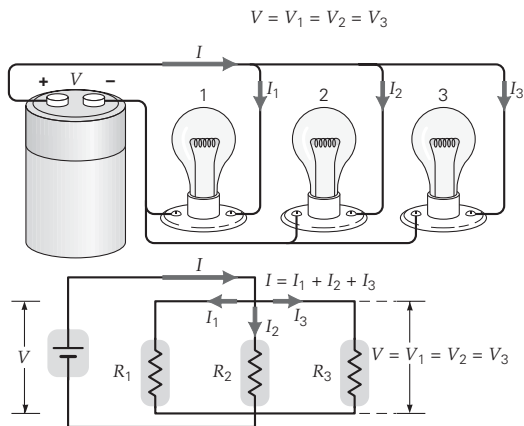
- Cuando los resistores están conectados en **serie**, la corriente a través de cada uno es la misma. La **resistencia equivalente** de los resistores en serie es

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \Sigma R_i \quad (4.2)$$



- Cuando los resistores están conectados en **paralelo**, el voltaje a través de cada uno es el mismo. La **resistencia equivalente** es

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots = \Sigma \frac{1}{R_i} \quad (4.3)$$

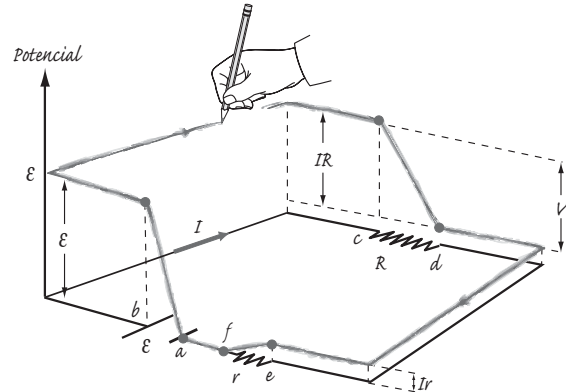


- El **teorema de la unión de Kirchhoff** establece que la corriente total que entra en cualquier **unión** es igual a la corriente total que sale de esa unión (conservación de la carga eléctrica).

$$\Sigma I_i = 0 \quad \text{suma de corrientes en una unión} \quad (4.4)$$

- El **teorema de las mallas de Kirchhoff** establece que al recorrer una malla de un circuito completo, la suma algebraica de las ganancias y pérdidas de voltaje es cero, o que la suma de las ganancias de voltaje es igual a la suma de las pérdidas de voltaje (conservación de la energía en un circuito eléctrico). En términos de voltajes, esto se escribe como

$$\Sigma V_i = 0 \quad \text{suma de voltajes alrededor de una malla cerrada} \quad (4.5)$$



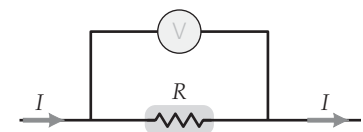
- La **constante de tiempo (τ)** para un circuito RC es un tiempo característico por medio del cual medimos la tasa de carga y descarga de un condensador. τ está dada por

$$\tau = RC \quad (4.8)$$

- Un **amperímetro** es un dispositivo que sirve para medir corriente; consiste en un galvanómetro y un resistor derivador en paralelo. Los amperímetros se conectan en serie, con el elemento del circuito llevando la corriente que se va a medir, y tienen muy poca resistencia.



- Un **voltímetro** es un dispositivo para medir voltaje; consiste en un galvanómetro y en un resistor multiplicador conectados en serie. Los voltímetros se conectan en paralelo, con el elemento del circuito experimentando el voltaje que se va a medir, y tienen gran resistencia.



Ejercicios

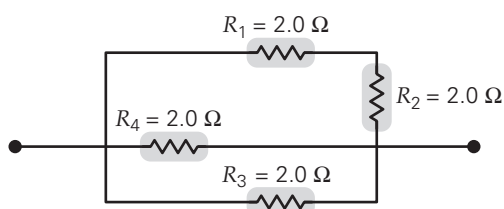
Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios “apareados”. Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

4.1 Combinaciones de resistencias en serie, en paralelo y en serie-paralelo

- OM** ¿Cuál de las siguientes cantidades siempre es la misma para resistores en serie? *a*) voltaje; *b*) corriente; *c*) potencia; *d*) energía.
- OM** ¿Cuál de las siguientes cantidades siempre es la misma para resistores en paralelo? *a*) voltaje; *b*) corriente; *c*) potencia; *d*) energía.
- OM** Dos resistores (A y B) están conectados en serie a una batería de 12 V. El resistor A es de 9 V. ¿Cuál resistor tiene la menor resistencia? *a*) A, *b*) B, *c*) ambos tienen la misma resistencia, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.
- OM** Dos resistores (A y B) están conectados en paralelo a una batería de 12 V. El resistor A tiene 2.0 A y la corriente total en la batería es de 3.0 A. ¿Cuál resistor tiene la mayor resistencia? *a*) A, *b*) B, *c*) ambos tienen la misma resistencia, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.
- OM** Dos resistores (uno con una resistencia de 2.0 Ω y el otro con una resistencia de 6.0 Ω) están conectados en paralelo a una batería. ¿Cuál de los dos produce el mayor calor de joule? *a*) el de 2.0 Ω , *b*) el de 6.0 Ω , *c*) ambos producen el mismo calor de joule, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.
- OM** Dos bombillas de luz (la bombilla A es de 100 W a 120 V, y la B es de 60 W a 120 V) están conectadas en serie a un tomacorriente a 120 V. ¿Cuál de ellas produce la mayor luz? *a*) A, *b*) B, *c*) ambas producen la misma, *d*) no es posible determinarlo a partir de los datos.
- PC** ¿Las caídas de voltaje a través de resistores en serie generalmente son iguales? Si no es así, ¿en cuál o cuáles circunstancias podrían ser iguales?
- PC** ¿Las corrientes en resistores en paralelo generalmente son iguales? Si no es así, ¿en cuál o cuáles circunstancias podrían ser iguales?
- PC** Si un resistor grande y uno pequeño están conectados en serie, ¿la resistencia efectiva estará más cercana en valor a la resistencia grande o a la pequeña? ¿Y si están conectados en paralelo?
- PC** Los fabricantes de las bombillas de luz marcan en éstas la salida de potencia. Por ejemplo, se supone que una bombilla de 60 W se conectará a una fuente de 120 V. Suponga que usted tiene dos bombillas: una de 60 W va seguida por otra de 40 W en serie con una fuente de 120 V. ¿Cuál de ellas brilla más? ¿Por qué? ¿Qué sucede si usted invierte el orden de las bombillas? ¿Alguna de ellas está a su clasificación máxima de potencia? Explique su respuesta.
- PC** Tres resistores idénticos están conectados a una batería. Dos están conectados en paralelo, y esta combinación va seguida en serie por el tercer resistor. ¿Cuál resistor (o resistores) tiene *a*) la mayor corriente, *b*) el mayor voltaje y *c*) la mayor salida de potencia?
- PC** Tres resistores tienen valores de 5, 2 y 1 Ω . El primero va seguido en serie por los dos últimos, que están conectados en paralelo. Cuando este arreglo se conecta a una batería, ¿cuál resistor (o resistores) tiene *a*) la mayor corriente, *b*) el mayor voltaje y *c*) la mayor salida de potencia?
- Se van a conectar tres resistores que tienen valores de 10, 20 y 30 Ω . *a*) ¿Cómo deben conectarse para obtener la resistencia equivalente máxima, y cuál es este valor máximo? *b*) ¿Cómo deben conectarse para obtener la resistencia equivalente mínima, y cuál es este valor mínimo?
- Dos resistores (*R*) idénticos están conectados en serie y luego en paralelo a un resistor de 20 Ω . Si la resistencia equivalente total es de 10 Ω , ¿cuál es el valor de *R*?
- Dos resistores (*R*) idénticos están conectados en paralelo y luego en serie a un resistor de 40 Ω . Si la resistencia equivalente total es de 55 Ω , ¿cuál es el valor de *R*?
- EI** ● *a*) ¿En cuántas formas diferentes pueden conectarse tres resistores de 4.0 Ω ? 1) Tres, 2) cinco o 3) siete. *b*) Dibuje las diferentes formas que usted encontró en el inciso *a* y determine la resistencia equivalente de cada una.
- Tres resistores con valores de 5.0, 10 y 15 Ω , respectivamente, están conectados en serie en un circuito con una batería de 9.0 V. *a*) ¿Cuál es la resistencia equivalente total? *b*) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c*) ¿A qué tasa se entrega energía al resistor de 15 Ω ?
- Encuentre las resistencias equivalentes para todas las posibles combinaciones de dos o más de los tres resistores en el ejercicio 17.
- Tres resistores con valores de 1.0, 2.0 y 4.0 Ω , respectivamente, están conectados en paralelo en un circuito con una batería de 6.0 V. ¿Cuáles son *a*) la resistencia equivalente total, *b*) el voltaje a través de cada resistor y *c*) la potencia entregada al resistor de 4.0 Ω ?
- EI** ●● *a*) Si usted tiene un número infinito de resistores de 1.0 Ω , ¿cuál es el número mínimo de resistores requeridos para tener una resistencia equivalente de 1.5 Ω ?

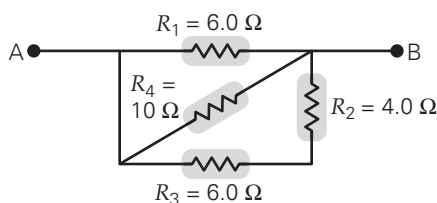
1) Dos, 2) tres o 3) cuatro *b)* Describa o muestre con un diagrama cómo deben conectarse los resistores.

21. **EI** ●● Un trozo de alambre con resistencia R se corta en dos segmentos iguales. Luego, los segmentos se trenzan entre sí para formar un conductor con la mitad de la longitud del tramo original. *a)* La resistencia del conductor acortado es 1) $R/4$, 2) $R/2$ o 3) R . *b)* Si la resistencia del alambre original es de $27 \mu\Omega$ y el alambre se corta en tres segmentos iguales, ¿cuál es la resistencia del conductor acortado?
22. **EI** ●● Usted tiene cuatro resistores de 5.00Ω . *a)* ¿Es posible conectar todos los resistores para producir una resistencia efectiva total de 3.75Ω ? *b)* Describa cómo los conectaría.
23. ●● Tres resistores con valores de 2.0 , 4.0 y 6.0Ω , respectivamente, están conectados en serie en un circuito con una batería de 12 V . *a)* ¿Cuánta corriente entrega la batería al circuito? *b)* ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c)* ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor? *d)* ¿Cómo se compara esta potencia con la potencia entregada a la resistencia equivalente total?
24. ●● Suponga que los resistores en el ejercicio 23 están conectados en paralelo. *a)* ¿Cuánta corriente entrega la batería al circuito? *b)* ¿Cuál es la corriente en cada resistor? *c)* ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor? *d)* ¿Cómo se compara esta potencia con la potencia entregada a la resistencia equivalente total?
25. ●● Dos resistores de 8.0Ω están conectados en paralelo, al igual que dos resistores de 4.0Ω . Esas dos combinaciones se conectan entonces en serie en un circuito con una batería de 12 V . ¿Cuál es la corriente en cada resistor y el voltaje a través de cada uno?
26. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente de los resistores en la ▼figura 4.25?



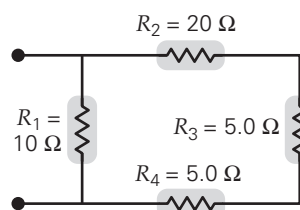
▲ FIGURA 4.25 Combinación serie-paralelo Véanse los ejercicios 26 y 34.

27. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente entre los puntos A y B en la ▼figura 4.26?



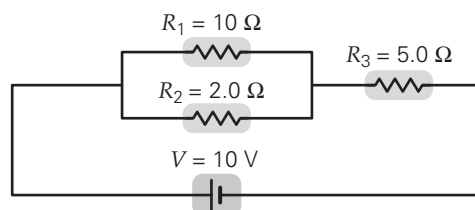
▲ FIGURA 4.26 Combinación serie-paralelo Véanse los ejercicios 27 y 36.

28. ●● ¿Cuál es la resistencia equivalente del arreglo de resistores mostrado en la ▼figura 4.27?



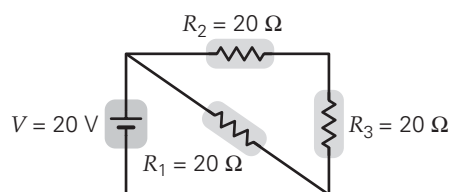
▲ FIGURA 4.27 Combinación serie-paralelo Véase el ejercicio 28.

29. ●● Varias bombillas de luz de 60 W están conectadas en paralelo a una fuente de 120 V . La última bombilla funde un fusible de 15 A en el circuito. *a)* Dibuje un diagrama del circuito para mostrar el fusible en relación con las bombillas. *b)* ¿Cuántas bombillas hay en el circuito (incluyendo la última)?
30. ●● Encuentre la corriente y el voltaje del resistor de 10Ω mostrado en la ▼figura 4.28.



▲ FIGURA 4.28 Corriente y caída de voltaje en un resistor Véanse los ejercicios 30 y 52.

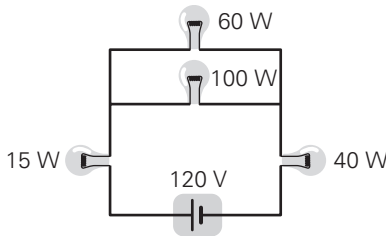
31. ●● Para el circuito de la ▼figura 4.29, encuentre *a)* la corriente en cada resistor, *b)* el voltaje a través de cada resistor y *c)* la potencia total entregada.



▲ FIGURA 4.29 Reducción del circuito Véanse los ejercicios 31 y 53.

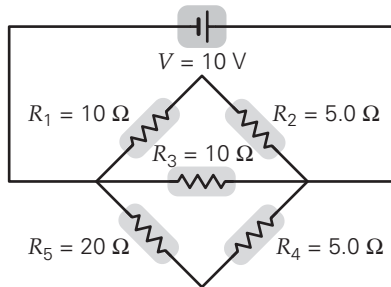
32. ●● Un circuito a 120 V tiene un disyuntor clasificado para desconectarse (crear un circuito abierto) a 15 A . ¿Cuántos resistores de 300Ω pueden conectarse en paralelo sin desconectar el disyuntor?
33. ●● En su dormitorio, usted tiene dos bombillas de 100 W , un televisor a colores de 150 W , un refrigerador de 300 W , un secador de pelo a 900 W y una computadora de 200 W (incluyendo el monitor). Si se tiene un disyuntor de 15 A en la línea de 120 V , ¿el disyuntor abrirá el circuito?
34. ●● Suponga que el arreglo de resistores en la figura 4.25 está conectado a una batería de 12 V . ¿Cuál será *a)* la corriente en cada resistor, *b)* la caída de voltaje a través de cada resistor y *c)* la potencia total entregada?

35. ●● Para preparar té caliente, usted usa un calentador de 500 W conectado a una línea de 120 V para calentar 0.20 kg de agua de 20 a 80°C. Suponiendo que no hay pérdida de calor aparte del que se entrega al agua, ¿cuánto dura este proceso?
36. ●●● Las terminales de una batería de 6.0 V están conectadas a los puntos A y B en la figura 4.26. a) ¿Cuánta corriente hay en cada resistor? b) ¿Cuánta potencia se entrega a cada uno? c) Compare la suma de las potencias individuales con la potencia entregada a la resistencia equivalente del circuito.
37. ●●● Bombillas con las potencias indicadas (en watts) en la ▼figura 4.30 están conectadas en un circuito como se muestra. a) ¿Qué corriente entrega la fuente de voltaje al circuito? b) Encuentre la potencia entregada a cada bombilla. (Considere que las resistencias de las bombillas son las mismas que cuando operan a su voltaje normal.)



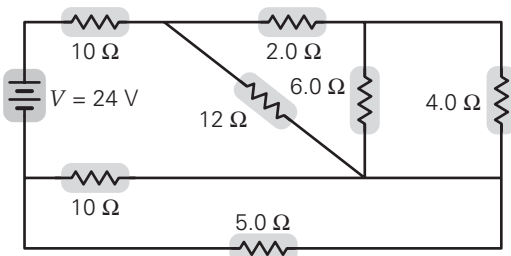
▲ FIGURA 4.30 ¿Qué sucede? Véase el ejercicio 37.

38. ●●● Dos resistores R_1 y R_2 están en serie con una batería de 7.0 V. Si R_1 tiene una resistencia de 2.0Ω y R_2 recibe energía a razón de 6.0Ω , ¿cuál es la corriente (o corrientes) del circuito? (Es probable que haya más de una respuesta.)
39. ●●● Para el circuito en la ▼figura 4.31, encuentre a) la corriente en cada resistor y b) el voltaje a través de cada uno.



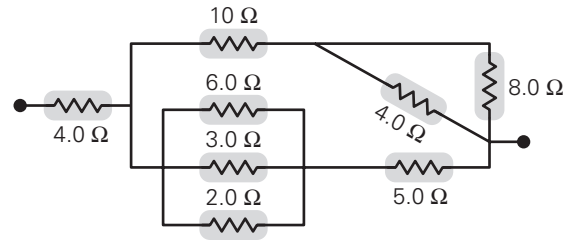
▲ FIGURA 4.31 Resistores y corriente Véase el ejercicio 39.

40. ●●● ¿Cuál es la potencia total entregada al circuito que se ilustra en la ▼figura 4.32?



▲ FIGURA 4.32 Disipación de potencia Véase el ejercicio 40.

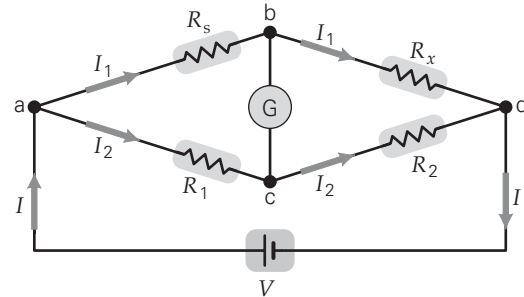
41. ●●● ¿Cuál es la resistencia equivalente del arreglo mostrado en la ▼figura 4.33?



▲ FIGURA 4.33 Resistencia equivalente Véase el ejercicio 41.

42. ●●● El circuito de la ▼figura 4.34, llamado *punte de Wheatstone*, en honor de Sir Charles Wheatstone (1802-1875), sirve para medir resistencia sin las correcciones a veces necesarias cuando se emplean mediciones de amperímetros y voltímetros. (Véase, por ejemplo, los ejercicios 88 y 89.) Las resistencias R_1 , R_2 y R_s son conocidas, y R_x es la resistencia desconocida. R_s es variable y se ajusta hasta que el circuito puente está equilibrado, esto es, cuando el galvanómetro (G) arroja una lectura de cero (ninguna corriente). Demuestre que cuando el puente está equilibrado, R_x está dada por la siguiente relación:

$$R_x = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) R_s.$$



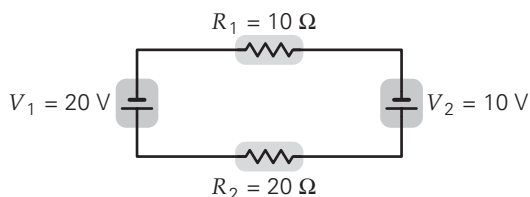
▲ FIGURA 4.34 Punte de Wheatstone Véase el ejercicio 42.

4.2 Circuitos con múltiples mallas y reglas de Kirchhoff

43. OM Se tiene un circuito de múltiples mallas con una batería. Después de abandonar la batería, la corriente encuentra una unión entre dos alambres. Uno conduce 1.5 A y el otro 1.0 A. ¿Cuál es la corriente en la batería? a) 2.5 A, b) 1.5 A, c) 1.0 A, d) 5.0 A, e) no es posible determinarlo a partir de los datos?
44. OM Con nuestra convención de signos, si un resistor se recorre en la dirección de la corriente, ¿qué puede decirse acerca del signo del cambio en el potencial eléctrico (el voltaje)? a) Es negativo, b) es positivo, c) es cero o d) no es posible determinarlo a partir de los datos.
45. OM Con nuestra convención de signos, si una batería se recorre en la dirección real de la corriente que hay en ella, ¿qué puede decirse acerca del signo del cambio en el potencial eléctrico (el voltaje terminal de la batería)? a) Es negativo, b) es positivo, c) es cero o d) no es posible determinarlo a partir de los datos.
46. OM Usted tiene un circuito de malla múltiple con una batería que tiene un voltaje terminal de 12 V. Después de

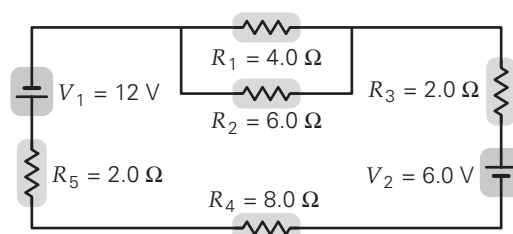
abandonar la terminal positiva de la batería, un alambre corto lo lleva a una unión donde la corriente se divide en tres alambres. Desde ese punto hasta que usted regresa a la terminal negativa de la batería, ¿qué puede decir acerca de la suma de voltajes en cada alambre? a) Da un total de $+12\text{ V}$, b) da un total de -12 V , c) su magnitud es menor de 12 V o d) su magnitud es mayor de 12 V .

47. **PC** ¿La corriente en una batería (en un circuito completo) siempre debe viajar de su terminal negativa a la positiva? Explique su respuesta. Si no es así, dé un ejemplo.
48. **PC** Utilice el teorema de la unión de Kirchhoff para explicar por qué la resistencia equivalente total de un circuito se reduce al conectar un segundo resistor en paralelo con otro.
49. **PC** Utilice el teorema de la malla de Kirchhoff para explicar por qué una bombilla de 60 W produce más luz que una de 100 W cuando están conectadas en serie a una fuente de 120 V . [Sugerencia: recuerde que las clasificaciones de potencia son significativas sólo a 120 V .]
50. ● Recorra la malla 3 de la figura 4.10 en sentido contrario al que se indica y demuestre que la ecuación resultante es la misma que si hubiera seguido el sentido de las flechas.
51. ● Para el circuito mostrado en la figura 4.10, invierta las direcciones de las mallas 1 y 2 y demuestre que se obtienen ecuaciones equivalentes a las del ejemplo 4.5.
52. ●● Use el teorema de las mallas de Kirchhoff para encontrar la corriente en cada resistor en la figura 4.28.
53. ●● Aplique las reglas de Kirchhoff al circuito en la figura 4.29 para encontrar la corriente en cada resistor.
54. **EI** ●● Dos baterías, con voltajes terminales de 10 y 4 V , respectivamente, están conectadas con sus terminales positivas juntas. Un resistor de $12\ \Omega$ está alambrado entre sus terminales negativas. a) La corriente en el resistor es 1) 0 A , 2) entre 0 A y 1.0 A o 3) mayor que 1.0 A . ¿Por qué? b) Use el teorema de las mallas de Kirchhoff para encontrar la corriente en el circuito y la potencia entregada al resistor. c) Compare este resultado con la salida de potencia de cada batería.
55. ●● Usando las reglas de Kirchhoff, encuentre la corriente en cada resistor en la figura 4.35.



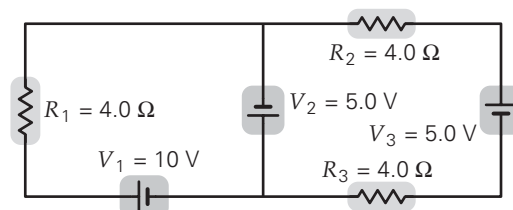
▲ FIGURA 4.35 Circuito de malla simple Véase el ejercicio 55.

56. ●● Aplique las reglas de Kirchhoff al circuito en la figura 4.36 y encuentre a) la corriente en cada resistor y b) la tasa a la que la energía se entrega al resistor de $8.0\ \Omega$.



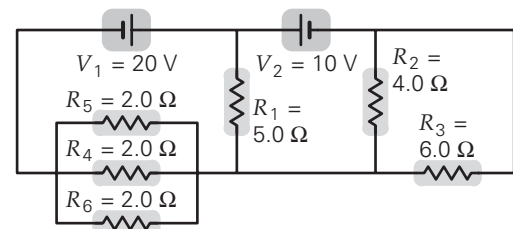
▲ FIGURA 4.36 Malla dentro de una malla Véase el ejercicio 56.

57. ●●● Encuentre la corriente en cada resistor en el circuito que se ilustra en la figura 4.37.



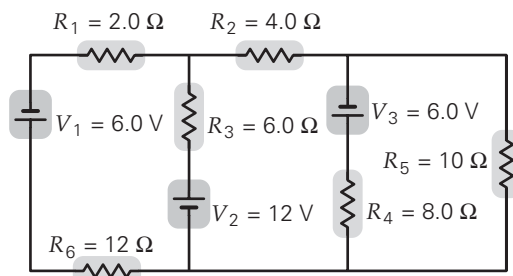
▲ FIGURA 4.37 Circuito de doble malla Véase el ejercicio 57.

58. ●●● Encuentre las corrientes en las ramas del circuito en la figura 4.38.



▲ FIGURA 4.38 ¿Cuántas mallas? Véase el ejercicio 58.

59. ●●● Para el circuito de mallas múltiples de la figura 4.39, ¿cuál es la corriente en cada rama?



▲ FIGURA 4.39 Circuito de tres mallas Véase el ejercicio 59.

4.3 Circuitos RC

60. **OM** Cuando un condensador se descarga a través de un resistor, el voltaje a través del condensador es máximo a) al principio del proceso, b) cerca de la mitad del proceso, c) al final del proceso o d) después de una constante de tiempo.

61. **OM** Cuando un condensador se descarga a través de un resistor, la corriente en el circuito es mínima *a)* al principio del proceso, *b)* cerca de la mitad del proceso, *c)* al final del proceso o *d)* después de una constante de tiempo.
62. **OM** Un condensador cargado se descarga a través de un resistor (que llamaremos #1). Si el valor del resistor entonces se duplica y se permite que el condensador idéntico se descargue de nuevo (al que llamaremos #2), ¿cómo se comparan las constantes de tiempo? *a)* $\tau_1 = 2\tau_2$, *b)* $\tau_1 = \tau_2$, *c)* $\tau_1 = \frac{1}{2}\tau_2$, *d)* $\tau_2 = 4\tau_1$.
63. **OM** Un condensador se descarga a través de un resistor (que llamaremos #1). El condensador entonces se recarga al doble de la carga inicial en el #1, y la descarga ocurre a través del mismo resistor (al que llamaremos #2). ¿Cómo se comparan las constantes de tiempo? *a)* $\tau_1 = 2\tau_2$, *b)* $\tau_1 = \tau_2$, *c)* $\tau_1 = \frac{1}{2}\tau_2$, *d)* no es posible determinarlo a partir de los datos.
64. **PC** Otra forma de describir el tiempo de descarga de un circuito RC es utilizar un intervalo de tiempo llamado *vida media*, que se define como el tiempo para que el condensador pierda la mitad de su carga inicial. ¿La constante de tiempo es mayor o menor que la vida media? Explique su razonamiento.
65. **PC** ¿El hecho de cargar un condensador en un circuito RC al 25% de su valor máximo tardará más o menos que una constante de tiempo? Explique su respuesta.
66. **PC** Explique por qué la corriente en un circuito RC en proceso de carga disminuye conforme el condensador se está cargando.
67. ● En la figura 4.11b, el interruptor se cierra en $t = 0$, y el condensador comienza a cargarse. ¿Cuál es el voltaje a través del resistor y a través del condensador, expresados como fracciones de V_o (con dos cifras significativas), *a)* justo después de que se cierra el interruptor, *b)* después de que han transcurrido dos constantes de tiempo y *c)* después de que han transcurrido muchas constantes de tiempo?
68. ● Un condensador en una malla simple de un circuito RC se carga al 63% de su voltaje final en 1.5 s. Encuentre *a)* la constante del tiempo para el circuito y *b)* el porcentaje del voltaje final del circuito después de 3.5 s.
69. **EI** ● En una lámpara con luz neón destellante, se desea tener una cierta constante de tiempo. *a)* Para incrementar esta constante de tiempo se debe 1) incrementar la capacitancia, 2) disminuir la capacitancia o 3) no usar un condensador. ¿Por qué? *b)* Si se desea una constante de tiempo de 2.0 s y usted tiene un condensador de 1.0 μF , ¿qué resistencia debería usar en el circuito?
70. ● ¿Cuántas constantes de tiempo tardará un condensador inicialmente cargado en descargarse a la mitad de su voltaje inicial?
71. ● Un condensador de 1.00 μF , inicialmente cargado a 12 V, está conectado en serie con un resistor. *a)* ¿Qué resistencia es necesaria para que el condensador tenga sólo el 37% de su carga inicial 1.50 s después de iniciar la descarga? *b)* ¿Cuál es el voltaje a través del condensador en $t = 3\tau$ si el condensador se *carga* con la misma batería a través del mismo resistor?
72. ● Un circuito RC con $C = 40 \mu\text{F}$ y $R = 6.0 \Omega$ tiene una fuente de 24 V. Con el condensador inicialmente descargado, se cierra un interruptor abierto en el circuito. *a)* ¿Cuál es el voltaje a través del resistor inmediatamente después? *b)* ¿Cuál es el voltaje a través del condensador en ese tiempo? *c)* ¿Cuál es la corriente en el resistor en ese tiempo?
73. ● *a)* Para el circuito en el ejercicio 72, después que el interruptor ha estado cerrado $t = 4\tau$, ¿cuál es la carga sobre el condensador? *b)* Después que ha transcurrido un largo tiempo, ¿cuáles son los voltajes a través del condensador y del resistor?
74. ● Un circuito RC con un resistor de 5.0 $\text{M}\Omega$ y un condensador de 0.40 μF está conectado a una fuente de 12 V. Si el condensador está inicialmente descargado, ¿cuál es el cambio en voltaje a través de éste entre $t = 2\tau$ y $t = 4\tau$?
75. ● Un resistor de 3.0 $\text{M}\Omega$ está conectado en serie con un condensador de 0.28 μF . Este arreglo se conecta entonces a través de cuatro baterías de 1.5 V (también en serie). *a)* ¿Cuál es la máxima corriente en el circuito y cuándo ocurre esto? *b)* ¿Qué porcentaje de la máxima corriente está en el circuito después de 4.0 s? *c)* ¿Cuál es la máxima carga en el condensador y cuándo ocurre esto? *d)* ¿Qué porcentaje de la carga máxima está en el condensador después de 4.0 s?

4.4 Amperímetros y voltímetros

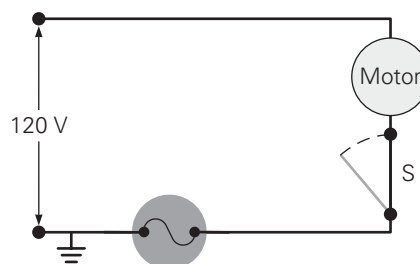
76. **OM** Para medir de manera precisa el voltaje a través de un resistor de 1 $\text{k}\Omega$, el voltímetro debería tener una resistencia que es *a)* mucho mayor que 1 $\text{k}\Omega$, *b)* mucho menor que 1 $\text{k}\Omega$, *c)* aproximadamente igual que 1 $\text{k}\Omega$, *d)* cero.
77. **OM** Para medir de manera precisa la corriente en un resistor de 1 $\text{k}\Omega$, el amperímetro debería tener una resistencia que es *a)* mucho mayor que 1 $\text{k}\Omega$, *b)* mucho menor que 1 $\text{k}\Omega$, *c)* aproximadamente igual que 1 $\text{k}\Omega$, *d)* tan grande como sea posible, de hecho, infinita si es posible.
78. **OM** Para medir correctamente el voltaje a través de un elemento de circuito, un voltímetro debe conectarse *a)* en serie con el elemento, *b)* en paralelo con el elemento, *c)* entre el lado de alto potencial del elemento y tierra, *d)* ninguna de las opciones anteriores es correcta.
79. **PC** *a)* ¿Qué pasaría si un amperímetro se conectara en paralelo con un elemento de circuito portador de corriente? *b)* ¿Qué pasaría si un voltímetro se conectara en serie con un elemento de circuito portador de corriente?
80. **PC** Explique claramente, utilizando las leyes de Kirchhoff, por qué la resistencia de un voltímetro ideal es infinita.
81. **PC** Si se diseña adecuadamente, ¿un buen amperímetro debe tener una resistencia muy pequeña? ¿Por qué? Explíquelo claramente empleando las leyes de Kirchhoff.
82. **EI** ● Un galvanómetro con una sensibilidad a escala plena de 2000 μA tiene una resistencia de bobina de 100 Ω . Va a utilizarse en un amperímetro con una lectura a plena escala de 30 A. *a)* ¿Debería usarse 1) un resistor en derivación, 2) un resistor cero o 3) un resistor multiplicador? ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la resistencia necesaria?
83. **EI** ● El galvanómetro en el ejercicio 82 va a utilizarse en un voltímetro con una lectura a escala plena de 15 V. *a)* ¿Debería usarse 1) un resistor en derivación, 2) un resistor cero o 3) un resistor multiplicador? ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la resistencia requerida?
84. ● Un galvanómetro con una sensibilidad a escala plena de 600 μA y una resistencia en su bobina de 50 Ω va a usarse

para construir un amperímetro que debe leer 5.0 A escala plena. ¿Cuál es la resistencia en derivación requerida?

85. ●● Un galvanómetro tiene una resistencia de 20Ω en su bobina. Una corriente de $200 \mu\text{A}$ desvía la aguja 10 divisiones a escala plena. ¿Qué resistencia es necesaria para convertir el galvanómetro a un voltímetro de 10 V a escala plena?
86. ●● Un amperímetro tiene una resistencia de $1.0 \text{ m}\Omega$. Encuentre la corriente en el amperímetro cuando está adecuadamente conectado a un resistor de 10Ω y una fuente de 6.0 V. (Expresar su respuesta con cinco cifras significativas para mostrar cómo difiere de 0.60 A.)
87. ●● Un voltímetro tiene una resistencia de 30 kW . ¿Cuál es la corriente en el medidor cuando está adecuadamente conectado a través de un resistor de 10Ω que está conectado a una fuente de 6.0 V?
88. **EI** ●●● Un amperímetro y un voltímetro pueden medir el valor de un resistor. Suponga que el amperímetro está conectado en serie con el resistor y que el voltímetro está colocado sólo a través del resistor. *a)* Para una medición exacta, la resistencia interna del voltímetro debería ser 1) cero, 2) igual a la resistencia por medirse o 3) infinita. ¿Por qué? *b)* Explique por qué la resistencia correcta no está dada por $R = \frac{V}{I}$. *c)* Demuestre que la resistencia correcta en realidad es mayor que el resultado en el inciso *b* y que está dada por $R = \frac{V}{I - (V/R_V)}$ donde V es el voltaje medido por el voltímetro, I es la corriente medida por el amperímetro y R_V es la resistencia del voltímetro. *d)* Demuestre que el resultado en el inciso *c* se reduce a $R = \frac{V}{I}$ para un voltímetro ideal.
89. **EI** ●●● Un amperímetro y un voltímetro pueden medir el valor de un resistor. Suponga que el amperímetro está conectado en serie con el resistor y que el voltímetro está colocado a través del amperímetro y del resistor. *a)* Para una medición exacta, la resistencia interna del amperímetro debería ser 1) cero, 2) igual a la resistencia por medirse o 3) infinita. ¿Por qué? *b)* Explique por qué la resistencia correcta no está dada por $R = \frac{V}{I}$. *c)* Demuestre que la resistencia correcta en realidad es menor que el resultado en el inciso *b* y que está dada por $R = (V/I) - R_A$ donde V es el voltaje medido por el voltímetro, I es la corriente medida por el amperímetro y R_A es la resistencia del amperímetro. *d)* Demuestre que el resultado en el inciso *c* se reduce a $R = \frac{V}{I}$ para un amperímetro ideal.

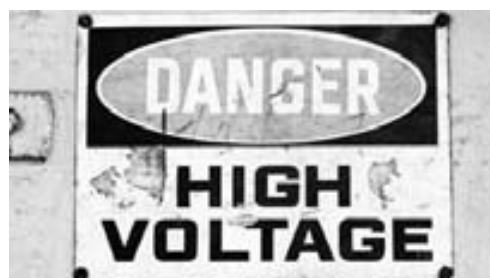
4.5 Circuitos domésticos y seguridad eléctrica

90. **OM** El cable a tierra en una instalación doméstica *a)* es un cable que conduce corriente, *b)* está a un voltaje de 240 V respecto a uno de los cables "calientes", *c)* no lleva corriente o *d)* ninguna de las opciones anteriores es correcta.
91. **OM** Un cable conectado a tierra *a)* es la base para la clavija polarizada, *b)* es necesario para un disyuntor, *c)* normalmente no conduce corriente o *d)* ninguna de las opciones anteriores es correcta.
92. **PC** En términos de seguridad eléctrica, explique qué está mal en el circuito en la ►figura 4.40 y por qué.



▲ FIGURA 4.40 ¿Un problema de seguridad? Véase el ejercicio 92.

93. **PC** La severidad de las lesiones por electrocución dependen de la magnitud de la corriente y de su trayectoria. Por otra parte, es común ver letreros preventivos con la leyenda "Peligro: alto voltaje" (►figura 4.41). ¿Esos letreros no deberían referirse a una "elevada corriente"? Explique su respuesta.

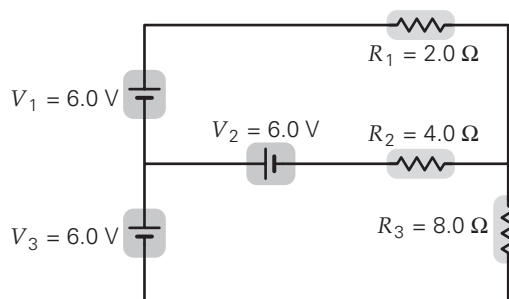


▲ FIGURA 4.41 Peligro, alto voltaje ¿No debería decir más bien "elevada corriente" en lugar de "alto voltaje"? Véase el ejercicio 93.

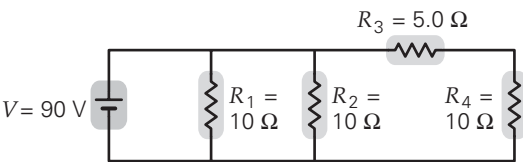
94. **PC** Explique por qué es seguro que los pájaros se posen con ambas patas sobre el mismo cable de alto voltaje, aun cuando el aislante esté totalmente desgastado.
95. **PC** Después de una colisión con un poste de transmisión de energía eléctrica, usted queda atrapado en su automóvil, con una línea de alto voltaje en contacto con el capó del vehículo. ¿Es más seguro salir del automóvil con un pie a la vez o saltar con ambos pies? Explique su razonamiento.
96. **PC** La mayoría de los códigos eléctricos requieren que la cubierta metálica de un secador eléctrico de ropa tenga un cable que vaya de la cubierta a una llave cercana (o cualquier pieza metálica de fontanería). Explique por qué.

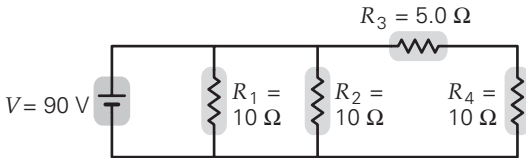
Ejercicios adicionales

97. Encuentre la corriente en cada resistor en el circuito de la ►figura 4.42.

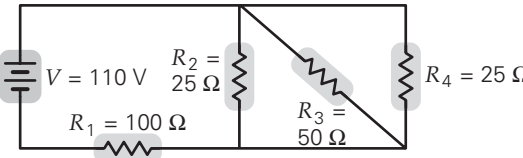


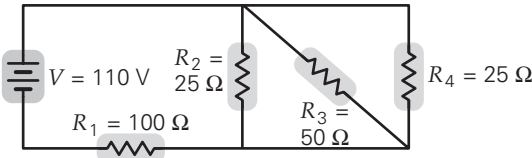
▲ FIGURA 4.42 Reglas de Kirchhoff Véase el ejercicio 97.

98. Cuatro resistores están conectados a una fuente de 90 V como se muestra en la  figura 4.43. a) ¿Cuál resistor (o resistores) recibe la mayor potencia, y cuánto es eso? b) ¿Cuál es la potencia total entregada al circuito por la fuente de potencia?

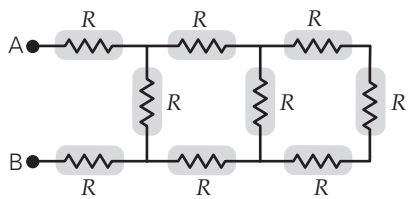


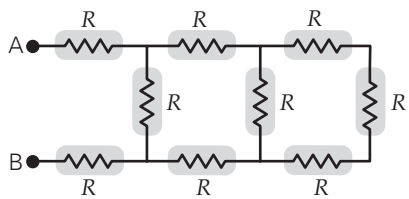
▲ FIGURA 4.43 ¿Cuánta potencia se entrega? Véase el ejercicio 98.

99. Cuatro resistores están conectados en un circuito con una fuente de 110 V como se ilustra en la  figura 4.44. a) ¿Cuál es la corriente en cada resistor? b) ¿Cuánta potencia se entrega a cada resistor?



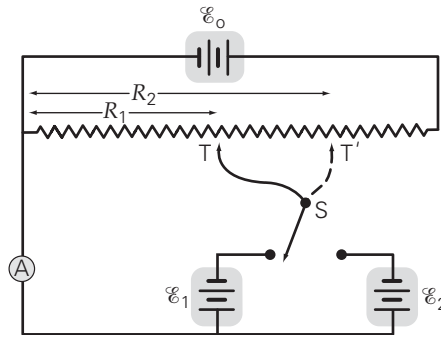
▲ FIGURA 4.44 Pérdidas de calor de joule Véase el ejercicio 99.

100. Nueve resistores, cada uno de valor R , están conectados en forma escalonada como se observa en la  figura 4.45. a) ¿Cuál es la resistencia efectiva de esta red entre los puntos A y B? b) Si $R = 10 \Omega$ y una batería de 12.0 V está conectada del punto A al punto B, ¿cuánta corriente hay en cada resistor?

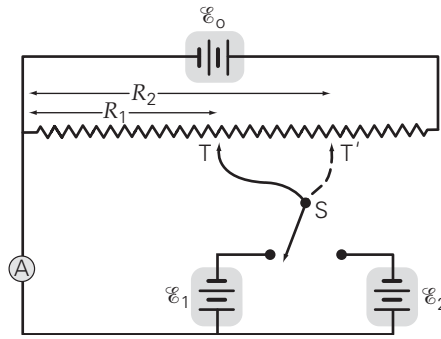


▲ FIGURA 4.45 Una escalera de resistencias Véase el ejercicio 100.

101. Un resistor de 4.0Ω y otro de 6.0Ω están conectados en serie. Un tercer resistor está conectado en paralelo con el de 6.0Ω . Toda la configuración da una resistencia equivalente total de 7.0Ω . ¿Cuál es el valor del tercer resistor?
102. Un galvanómetro con una resistencia interna de 50Ω y una sensibilidad a escala plena de $200 \mu\text{A}$ se emplea para construir un voltímetro de escala múltiple. ¿Qué valores de resistores multiplicadores permiten tres lecturas de voltaje a escala plena de 20 V, 100 V y 200 V? (Véase la figura 4.18b.)



◀ FIGURA 4.46 El potenciómetro Véase el ejercicio 104.

103. Un galvanómetro con una resistencia interna de 100Ω y una sensibilidad a escala plena de $100 \mu\text{A}$ se utiliza para construir un amperímetro con varias graduaciones. ¿Qué valores de resistores en derivación permiten tres lecturas de corriente a escala plena de 1.0 A, 5.0 A y 10 A? (Véase la figura 4.18a.)
104. La  figura 4.46 muestra el funcionamiento de un *potenciómetro*, un dispositivo muy exacto para determinar la fem de suministros de potencia. Consta de tres baterías, un amperímetro y varios resistores, incluyendo un alambre largo uniforme cuya longitud puede fijarse para dar una fracción específica de su resistencia total. \mathcal{E}_0 es la fem de una batería en funcionamiento, \mathcal{E}_1 designa una batería con una fem conocida de forma precisa, y \mathcal{E}_2 es una batería cuya fem se desconoce. El interruptor S es accionado hacia la batería 1, y el punto T (que se va a “fijar”) se mueve a lo largo del resistor hasta que el amperímetro lee cero. La resistencia de este arreglo es R_1 . Este procedimiento se repite con el interruptor accionado hacia la batería 2, y el punto T se mueve a T' hasta que el amperímetro de nuevo lee cero. La resistencia de este arreglo es R_2 . Demuestre que la fem desconocida se determina mediante la siguiente relación: $\mathcal{E}_2 = \frac{R_2}{R_1} \mathcal{E}_1$.
105. Si una combinación de tres resistores de 30Ω recibe energía a razón de 3.2 W cuando está conectada a una batería de 12 V, ¿cómo están conectados en el circuito los resistores?
106. Una batería tiene tres celdas, cada una con una resistencia interna de 0.020Ω y una fem de 1.50 V. La batería está conectada en paralelo con un resistor de 10.0Ω . a) Determine el voltaje a través del resistor. b) ¿Cuánta corriente hay en cada celda? (Las celdas en una batería están en serie.)
107. Un condensador de $10.0 \mu\text{F}$ en un desfibrilador cardíaco se carga por completo mediante un suministro de potencia de 10 000 V. Cada placa del condensador está conectada al pecho de un paciente mediante cables y dos electrodos, que se colocan uno a cada lado del corazón. La energía almacenada en el condensador se entrega a través de un circuito RC, donde R es la resistencia del cuerpo entre los dos electrodos. Los datos indican que el voltímetro tarda 75.1 ms para caer a 20.0 V. a) Encuentre la constante de tiempo. b) Determine la resistencia, R . c) ¿Cuánto tiempo tarda el condensador en perder el 90% de su energía almacenada?

- 5.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético 122
- 5.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética 124
- 5.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos 127
- 5.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica 130
- 5.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos 133
- 5.6 Electromagnetismo: la fuente de los campos magnéticos 135
- 5.7 Materiales magnéticos 139
- *5.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre 142

HECHOS DE FÍSICA

- La unidad de corriente del SI, el amperio o el coulomb por segundo, se define oficialmente en términos del campo magnético que crea y la fuerza magnética que ese campo puede ejercer sobre otra corriente.
- Nikola Tesla (1856-1943) fue un investigador serbio-estadounidense conocido por la bobina de Tesla, que es capaz de producir altos voltajes (véase el capítulo 6) y que se estudia comúnmente en la preparatoria. El nombre de Tesla se convirtió en la unidad del SI para el campo magnético. Cuando Westinghouse obtuvo los derechos de patente para sus diseños de corriente alterna, esto desencadenó una batalla entre el sistema de corriente directa de Edison y el sistema de corriente alterna de Tesla-Westinghouse. Finalmente, este último ganó y se convirtió en el medio primordial de distribuir energía eléctrica por todo el mundo.
- Pierre Curie (1859-1906) fue pionero en diversas áreas que van desde el magnetismo a la radiactividad. Descubrió que las sustancias ferromagnéticas presentan una transición de temperatura por arriba de la cual pierden su comportamiento ferromagnético. Esto se conoce ahora como la temperatura Curie.

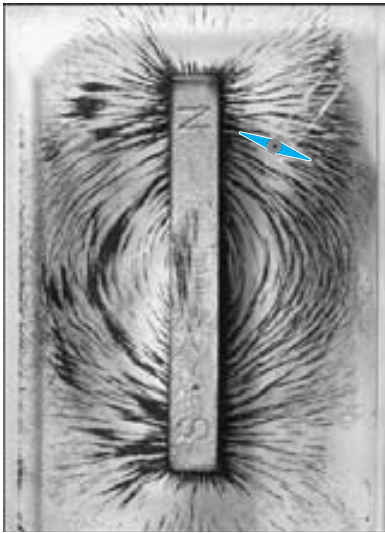


Cuando se menciona el magnetismo, tendemos a pensar en una atracción, pues se sabe que es posible levantar algunos objetos con un imán. Usted probablemente ha visto picaportes magnéticos que sujetan puertas de casilleros, o imanes para pegar notas sobre la puerta del refrigerador. Es menos probable que alguien piense en la repulsión. Sin embargo, existen las fuerzas magnéticas de repulsión, y son tan útiles como las de atracción.

A este respecto, la fotografía que abre este capítulo muestra un ejemplo interesante. A primera vista, el vehículo se ve como un tren ordinario; pero ¿dónde están las ruedas? De hecho, dista mucho de ser un tren convencional; es uno de alta velocidad que opera mediante *levitación magnética*. El tren no toca físicamente los “rieles”. Más bien “flota” sobre ellos, sostenido por las fuerzas de repulsión que producen poderosos imanes. Las ventajas son obvias: si no hay ruedas, no hay fricción de rodadura y no hay chumaceras que lubricar; de hecho, hay muy pocas partes móviles de cualquier tipo.

Pero, ¿de dónde provienen las fuerzas magnéticas? Durante siglos, las fuerzas de atracción de los imanes se atribuyeron a fenómenos sobrenaturales. Los materiales que presentaban esa cualidad se llamaban piedras imán. Hoy, el magnetismo se asocia con la electricidad, porque los físicos descubrieron que en realidad ambas cosas son en realidad distintos aspectos de una sola fuerza: la fuerza electromagnética. El electromagnetismo se aplica en motores, generadores, radios y muchas otras aplicaciones comunes. En el futuro, el desarrollo de materiales superconductores a altas temperaturas (capítulo 3) abrirá el camino a la aplicación práctica de muchos artefactos más que hoy sólo se encuentran en el laboratorio.

Aunque la electricidad y el magnetismo son manifestaciones de la misma fuerza fundamental, es conveniente desde el punto de vista didáctico considerarlas primero en forma individual, para después unir las, por así decirlo, en el electromagnetismo. En este capítulo y el siguiente se investigará el magnetismo y su relación íntima con la electricidad.



▲ **FIGURA 5.1** Imán recto Las limaduras de hierro indican los polos, o centros de fuerza, de un imán recto común. La dirección de la brújula identifica a estos polos como norte (N) y sur (S). (Véase la figura 5.3.)

5.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético

OBJETIVOS: a) Aprender la regla de fuerza entre polos magnéticos y b) explicar cómo se determina la dirección de un campo magnético con una brújula.

Una de las propiedades de una barra de imán común es que tiene dos “centros” de fuerza, llamados *polos* cerca de cada uno de sus extremos (ver figura 5.1). Para evitar confusiones con la notación de la carga eléctrica, positiva y negativa, a esos polos se les llama norte (N) y sur (S). Esta terminología proviene del primer uso que se dio a la brújula magnética, es decir, el de determinar la dirección. El polo norte de un imán de brújula se definió históricamente como el extremo *que da hacia el norte*, que es el que apunta al *norte* de la Tierra. El otro extremo se llamó sur o polo sur.

Al usar dos imanes en forma de barra o rectos, se pueden determinar en forma experimental las fuerzas de atracción y repulsión que actúan entre sus extremos. Cada polo de un imán recto es atraído hacia el polo opuesto del otro, y es repelido por el mismo polo del otro. Tenemos así la **ley de fuerza entre polos**, o **ley de los polos**:

Los polos magnéticos iguales se repelen, y los polos magnéticos diferentes se atraen (ver figura 5.2).

Un resultado inmediato (y a veces confuso) de la definición histórica de un polo norte tiene que ver con el campo magnético terrestre. Como el polo norte de un imán recto es atraído hacia la región *polar* boreal (es decir, el norte *geográfico*), esa región debe funcionar, desde el punto de vista magnético, como el polo (magnético) sur. (Véase la sección 5.8 para conocer más detalles sobre la geofísica del campo magnético de la Tierra.) Así que el polo magnético sur de la Tierra se encuentra en la cercanía de su polo geográfico norte.

Dos polos magnéticos opuestos, como los de un imán recto, forman un *dipolo magnético*. A primera vista, el campo del imán recto podría parecer el análogo magnético del dipolo eléctrico. Sin embargo, existen diferencias fundamentales entre los dos. Por ejemplo, los imanes permanentes siempre tienen dos polos, nunca uno solo. Tal vez se podría pensar que romper un imán recto a la mitad daría por resultado dos polos aislados. Sin embargo, los trozos resultantes del imán siempre se convierten en dos imanes más cortos, *cada uno con su propio conjunto de polos norte y sur*. Mientras que podría existir un solo polo magnético (un *monopolo magnético*) en teoría, todavía se debe encontrar en forma experimental.

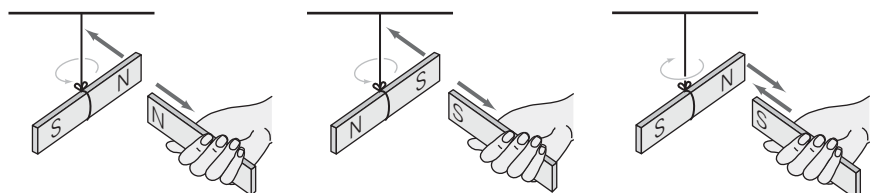
El hecho de que no haya analogía magnética con la carga eléctrica es una clave de las diferencias entre los campos eléctricos y magnéticos. Por ejemplo, la fuente real del magnetismo es la carga eléctrica, al igual que sucede con el campo eléctrico. Sin embargo, como se verá en las secciones 5.6 y 5.7, los campos magnéticos se producen sólo cuando las cargas eléctricas están *en movimiento*, como las corrientes eléctricas en circuitos y los electrones que giran en los átomos. Estos últimos son, en realidad, la fuente del campo del imán recto.

Dirección del campo magnético

El método que se utilizó en el pasado para analizar el campo magnético de un imán recto consistía en expresar la fuerza magnética entre los polos en una forma matemática parecida a la ley de Coulomb de la fuerza eléctrica (capítulo 1). De hecho, Coulomb estableció esa ley usando intensidades de polos magnéticos en lugar de cargas eléctricas. Sin embargo, en la actualidad rara vez se usa esa ley, porque no concuerda con nuestra interpretación moderna, basada en el hecho de que nunca se han encontrado polos magnéticos aislados. En lugar de ello, la descripción moderna usa el concepto del *campo magnético*.

Recuerde que las cargas eléctricas producen un campo eléctrico, que se representa mediante líneas de campo eléctrico. El campo eléctrico (vector) se define como la fuerza por unidad de carga en cualquier punto en el espacio, $\vec{E} = \vec{F}_e/q_0$. De manera simi-

► **FIGURA 5.2** La ley de la fuerza polar o ley de los polos Los polos iguales (N y N, o S y S) se repelen, y los polos distintos (N y S) se atraen.



Los polos iguales se repelen

Los polos diferentes se atraen

lar, las interacciones magnéticas se describen en función del **campo magnético**, una cantidad vectorial representada por el símbolo \vec{B} . Así como existen campos eléctricos en la cercanía de cargas eléctricas, los campos magnéticos rodean a los imanes permanentes. Se puede hacer visible el conjunto de líneas magnéticas que rodean a un imán, esparciendo limaduras de hierro sobre un imán recto cubierto por una hoja de papel o una lámina de vidrio (figura 5.1). A causa del campo magnético, las limaduras de hierro se magnetizan convirtiéndose en pequeños imanes (básicamente en agujas de brújula) y se alinean en dirección del campo \vec{B} , comportándose como pequeñas brújulas.

Como el campo magnético es un campo vectorial, se debe especificar tanto la magnitud (que a veces se llama "intensidad" o "fuerza") como la dirección. La dirección de un campo magnético (al que con frecuencia se le llama "campo B ") se define en términos de una brújula calibrada con la dirección del campo magnético terrestre:

La dirección de un campo magnético (\vec{B}) en cualquier lugar es la dirección hacia donde apuntaría el norte de una brújula si ésta se colocara en ese lugar.

Esta definición ofrece un método para trazar un mapa de un campo magnético, moviendo una pequeña brújula en diversos puntos del campo. En cualquier lugar, la brújula se alineará en la dirección del campo B que exista allí. Si la brújula se mueve después en la dirección que señala su aguja (el extremo norte), la trayectoria de la aguja describe una *línea de fuerza magnética*, como se ilustra en la figura 5.3a.

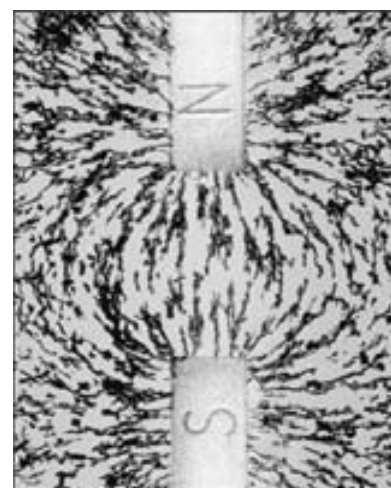
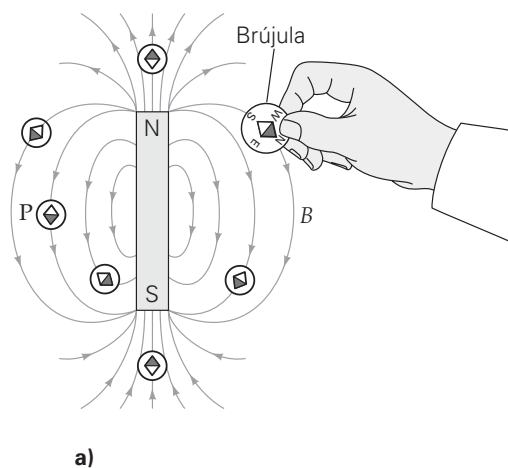
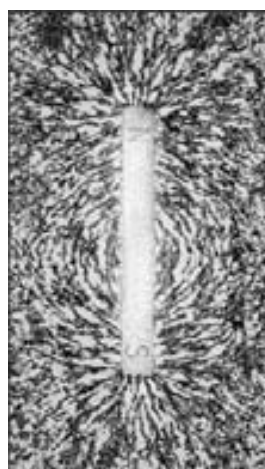
Como el extremo norte de una brújula se aleja del polo norte de un imán recto, las líneas de campo del imán recto se alejan de ese polo y apuntan hacia su polo sur. Las reglas que gobiernan la interpretación de las líneas de campo magnético son iguales que las que se aplican a las líneas de campo eléctrico:

Cuanto más cercanas están entre sí las líneas del campo B , más intenso es éste. En cualquier lugar, la dirección del campo magnético es tangente a la línea de campo, o, de manera equivalente, a la dirección en la que apunta el extremo norte de una brújula.

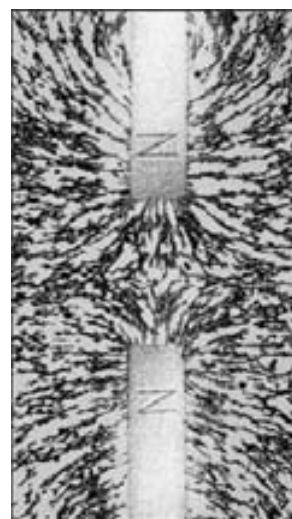
Observe la concentración de las limaduras de hierro en las regiones polares (figura 5.3b y c). Esto indica que las líneas de campo están muy próximas y, en consecuencia, hay un campo magnético relativamente intenso o fuerte, en comparación con el que existe en otros lugares. En cuanto a la dirección del campo, observe que justo fuera de la mitad del imán, el campo apunta directamente hacia abajo, tangente a la línea de campo en ese punto (figura 5.3a, punto P).

El lector pensará que se podría definir la magnitud de \vec{B} como la fuerza magnética por unidad de intensidad de polo, en forma análoga a \vec{E} . Sin embargo, como no existen los monopolos magnéticos, la magnitud de \vec{B} se define en función de la fuerza magnética que se ejerce sobre una carga eléctrica en movimiento, como se describirá a continuación.

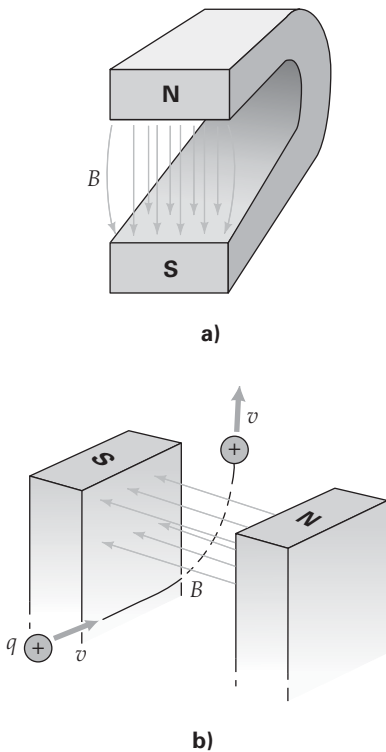
▼ **FIGURA 5.3 Campos magnéticos** a) Es posible visualizar y trazar las líneas del campo magnético con limaduras de hierro o con una brújula, como se ve en el caso del campo magnético provocado por un imán recto. Las limaduras se comportan como diminutas brújulas y se alinean con el campo. Cuanto más próximas estén entre sí las líneas de campo, el campo magnético es más intenso. b) La figura que forman las limaduras de hierro para el campo magnético entre polos diferentes; las líneas de campo convergen. c) Figura que forman las limaduras de hierro para el campo magnético entre polos iguales; las líneas de campo divergen.



b)



c)



▲ **FIGURA 5.4** Fuerza sobre una partícula en movimiento con carga eléctrica *a*) Un imán de herradura, formado doblando un imán recto permanente, produce un campo bastante uniforme entre sus polos. *b*) Cuando una partícula con carga eléctrica entra a un campo magnético, actúa sobre ella una fuerza cuya dirección es obvia por la desviación que tiene respecto a su trayectoria original.

Nota: el campo magnético desempeña un papel vital en la obtención de imágenes por resonancia magnética (MRI), una técnica muy usada en los diagnósticos médicos.

5.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética

OBJETIVOS: *a*) Definir la intensidad del campo magnético y *b*) determinar la fuerza magnética que ejerce un campo magnético sobre una partícula cargada.

Los experimentos indican que una cantidad importantes para determinar la fuerza *magnética* sobre una partícula es su carga *eléctrica*. El estudio de estas interacciones se llama **electromagnetismo**. Examinemos la siguiente interacción electromagnética. Supongamos que una partícula con carga positiva se mueve a velocidad constante al entrar a un campo magnético uniforme. Para simplificar, supongamos también que su velocidad es perpendicular al campo. (Un campo magnético B bastante uniforme existe entre los polos de un imán “de herradura” como el que se observa en la figura 5.4a.) Cuando la partícula cargada entra al campo, es *desviada* adoptando una trayectoria curva hacia arriba, que en realidad es parte de una trayectoria circular (si el campo B es uniforme), como se aprecia en la figura 5.4b.

A partir de nuestro estudio del movimiento circular (sección 5.3 de *Física 11*), para que una partícula se mueva describiendo un arco circular debe existir una fuerza centrípeta perpendicular a su velocidad. Pero, ¿qué origina esta fuerza? No hay campo eléctrico. La fuerza gravitacional, además de ser demasiado débil para provocar esa desviación, desviaría a la partícula para que siguiera un arco parabólico hacia abajo y no uno circular hacia arriba. Es claro que la fuerza es magnética y que se debe a la interacción entre la carga en movimiento y el campo magnético. Esto indica que *un campo magnético puede ejercer una fuerza sobre una partícula eléctricamente cargada en movimiento*.

Según cuidadosas mediciones, la magnitud de esta fuerza es directamente proporcional a la carga y a su rapidez. Cuando la velocidad de la partícula (\vec{v}) es perpendicular al campo magnético (\vec{B}), la magnitud del campo o la intensidad del *campo* B se define como:

$$B = \frac{F}{qv} \quad (\text{válida sólo cuando } \vec{v} \text{ es perpendicular a } \vec{B}) \quad (5.1)$$

Unidad SI del campo magnético:

newton por ampere-metro $[\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m})]$, o tesla (T)

Físicamente, B representa la fuerza magnética ejercida sobre una partícula cargada, *por unidad de carga* (coulomb) y *por unidad de velocidad* (m/s). A partir de esta relación, las unidades de B son $\text{N}/(\text{C} \cdot \text{m}/\text{s})$ o $\text{N}/(\text{A} \cdot \text{m})$, ya que $1 \text{ A} = 1 \text{ C}/\text{s}$. A esta combinación de unidades se le llama **tesla (T)**, en honor de Nikola Tesla (1856-1943). Así, $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$. La mayor parte de las intensidades de campos magnéticos cotidianos, como las de los imanes permanentes, son mucho menores que 1 T. En esos casos, es común expresar las intensidades de campo magnético en militeslas ($1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$) o en microteslas ($1 \mu\text{T} = 10^{-6} \text{ T}$). Una unidad que no pertenece al SI, pero que utilizan los geólogos y geofísicos es el *gauss* (G), que equivale a un diezmilésimo de Tesla ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} = 0.1 \text{ mT}$). Por ejemplo, el campo magnético terrestre mide varias décimas de gauss o de varias centésimas de un militesla. Por otra parte, los imanes convencionales de laboratorio producen campos hasta de 3 T, y los imanes superconductores generan campos de 25 T o incluso mayores.

Una vez determinada la intensidad del campo magnético (ecuación 5.1), es posible calcular la fuerza sobre una partícula cargada que se mueva a cualquier velocidad.* La fuerza se despeja en la ecuación 5.1:

$$F = qvB \quad (\text{válida sólo cuando } \vec{v} \text{ es perpendicular a } \vec{B}) \quad (5.2)$$

La velocidad de la partícula *no* será perpendicular al campo magnético. Entonces la magnitud de la fuerza depende del seno del ángulo (θ) entre el vector velocidad y el vector campo magnético. En general, la magnitud de la fuerza magnética es

$$F = qvB \sin \theta \quad \text{fuerza magnética sobre una partícula con carga eléctrica} \quad (5.3)$$

Esto significa que la fuerza magnética es cero cuando \vec{v} y \vec{B} son paralelos ($\theta = 0^\circ$), o con dirección contraria ($\theta = 180^\circ$), ya que $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0$. La fuerza alcanza su valor máximo cuando esos dos vectores son perpendiculares. Si $\theta = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$), este valor máximo es $F = qvB \sin 90^\circ = qvB$.

*En sentido estricto las velocidades deben ser considerablemente menores que la velocidad de la luz para evitar complicaciones de relatividad.

La regla de la mano derecha para fuerzas sobre cargas en movimiento

La *dirección* de la fuerza magnética sobre cualquier partícula cargada en movimiento se determina por la orientación de la velocidad de la partícula en relación con el campo magnético. Los experimentos demuestran que la dirección de la fuerza magnética se determina con la **regla de la mano derecha** (▼figura 5.5a):

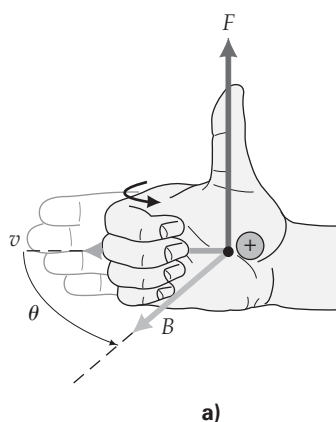
Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de la velocidad \vec{v} de una partícula cargada, y se flexionan después (en el ángulo menor) hacia el vector \vec{B} , el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza magnética \vec{F} que actúa sobre una carga *positiva*. Si la partícula tiene carga negativa, la fuerza magnética tiene dirección opuesta a la del pulgar.

El lector podría imaginar que los dedos de la mano derecha giran físicamente o hacen girar el vector \vec{v} hacia \vec{B} para que \vec{v} y \vec{B} queden alineados.

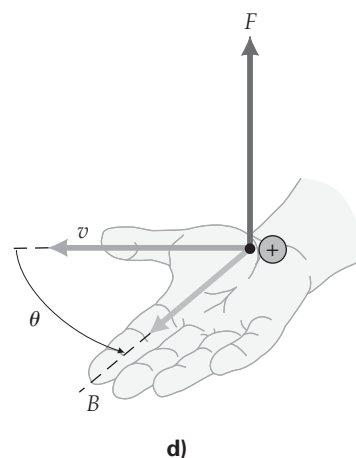
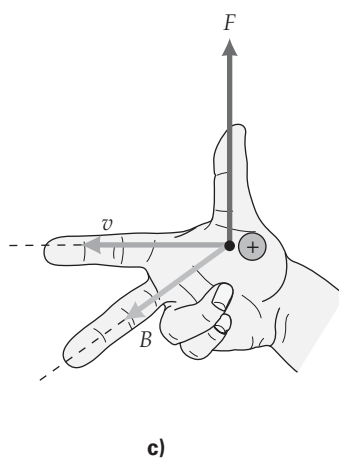
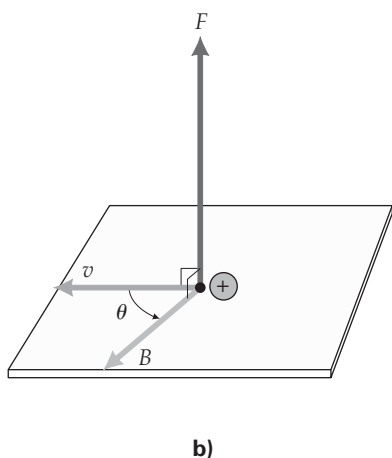
Advierta que la fuerza magnética siempre es *perpendicular al plano formado por \vec{v} y \vec{B}* (figura 5.5b). Como la fuerza es perpendicular a la dirección del movimiento de la partícula (\vec{v}), no puede realizar trabajo sobre ésta. (Esto se deduce de la definición de trabajo en el capítulo 3 de *Física 11*, con un ángulo recto entre la fuerza y el desplazamiento, $W = Fd \cos 90^\circ = 0$.) Por consiguiente, un campo magnético no cambia la rapidez (es decir, la energía cinética) de la partícula, sólo su dirección.

En la figura 5.5c se presentan algunas reglas alternativas (y físicamente equivalentes) de la mano derecha. Se sugiere que, para cargas negativas, el lector comience suponiendo que la carga es positiva. A continuación determine la dirección de la fuerza empleando la regla de la mano derecha. Por último, *invierta* esa dirección, para determinar la de la fuerza real sobre la carga negativa. Para ver cómo se aplica esta regla a cargas de uno y otro signo, considere el siguiente ejemplo conceptual.

Nota: los campos B que se dirigen hacia el plano de la página se representan por \times . Los campos B que se dirigen saliendo del plano de la página se representan por \cdot . Visualice estos símbolos, como si indicaran el estabilizador (la cola) y la punta de una flecha, respectivamente.



► **FIGURA 5.5** Reglas de la mano derecha para la fuerza magnética *a)* Cuando los dedos de la mano derecha tienen la dirección de \vec{v} y luego se doblan hacia la dirección de \vec{B} , el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza \vec{F} sobre una carga *positiva*. *b)* La fuerza magnética siempre es perpendicular al plano de \vec{B} y \vec{v} , y, en consecuencia, siempre es perpendicular a la dirección del movimiento de la partícula. *c)* Cuando el índice extendido de la mano derecha apunta en la dirección de \vec{v} y el dedo medio apunta en la dirección de \vec{B} , el pulgar extendido de la misma mano apunta en la dirección de \vec{F} sobre una carga *positiva*. *d)* Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de \vec{B} y el pulgar en la dirección de \vec{v} , la palma queda en dirección de la fuerza \vec{F} sobre una carga *positiva*. (Independientemente de la regla empleada, recuerde siempre utilizar la mano derecha e invertir la dirección cuando la carga es negativa.)



Ejemplo conceptual 5.1 ■ Hasta los “zurdos” utilizan la regla de la mano derecha

En un acelerador lineal de partículas, un haz de protones viaja horizontalmente hacia el norte. Para desviar los protones hacia el este con un campo magnético uniforme, ¿en qué dirección debe apuntar ese campo? *a)* Vertical hacia abajo, *b)* hacia el oeste, *c)* vertical hacia arriba o *d)* hacia el sur.

Razonamiento y respuesta. Como la fuerza es perpendicular al plano de \vec{v} y \vec{B} , el campo magnético *no* puede ser horizontal. Si así fuera, desviaría a los protones hacia abajo o hacia arriba. A continuación, se aplica la regla de la mano derecha, para ver si \vec{B} podría estar hacia abajo (respuesta *a*). Es conveniente verificar que, para un campo magnético hacia abajo, la fuerza debe ser hacia el oeste. Por consiguiente, la respuesta debe ser *c*. El campo magnético debe apuntar hacia arriba para desviar los protones hacia el este.

Ejercicio de refuerzo. ¿Hacia qué dirección se desviarían las partículas en este ejemplo si fueran electrones que se mueven hacia el sur?

Las partículas cargadas en campos magnéticos uniformes describen trayectorias de arcos circulares. Véamos el ejemplo 5-2 para conocer más detalles.

Ejemplo 5.2 ■ Movimiento circular: fuerza sobre una carga en movimiento

Una partícula con carga de $-5.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ y masa de $2.0 \times 10^{-9} \text{ kg}$ se mueve con una velocidad de $1.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ en dirección de $+x$. Entra en un campo magnético uniforme de 0.20 T , cuya dirección es $+y$ (véase la figura 5.6a). *a)* ¿En qué dirección se desviará la partícula tan pronto como entra en el campo? *b)* ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre la partícula tan pronto como entra en el campo? *c)* ¿Cuál es el radio del arco circular por el que viajará la partícula mientras está en el campo?

Razonamiento. La desviación inicial de la partícula tiene la dirección de la fuerza magnética inicial. Se espera una trayectoria en arco circular, porque la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la partícula. La magnitud de la fuerza magnética sobre una sola carga se determina con la ecuación 5.3. Ésta es la única fuerza significativa sobre el electrón; también es la fuerza neta. La segunda ley de Newton nos permitirá determinar el radio de la órbita circular.

Solución. Se listan los datos.

- | | | | |
|--------------|---|-------------------|--|
| Dado: | $q = -5.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ | Encuentre: | <i>a)</i> La dirección de la desviación inicial |
| | $v = 1.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ (dirección $+x$) | | <i>b)</i> La magnitud de la fuerza magnética inicial F |
| | $m = 2.0 \times 10^{-9} \text{ kg}$ | | <i>c)</i> El radio r de la órbita |
| | $B = 0.20 \text{ T}$ (dirección $+y$) | | |

a) Según la regla de la mano derecha, la fuerza sobre una carga positiva tendría la dirección $+z$ (dirección de la palma). Como la carga es negativa, la fuerza tiene la dirección opuesta, y la partícula se comenzará a desviar hacia la dirección $-z$.

b) La magnitud de la fuerza se determina mediante la ecuación 5.3. Como sólo interesa su magnitud, se ignora el signo de q . Entonces

$$F = qvB \sin \theta = (5.0 \times 10^{-4} \text{ C})(1.0 \times 10^3 \text{ m/s})(0.20 \text{ T})(\sin 90^\circ) = 0.10 \text{ N}$$

c) Como la fuerza magnética es la única fuerza que actúa sobre la partícula, también es la fuerza neta (figura 5.6b). Esta fuerza neta apunta hacia el centro del círculo se llama fuerza centrípeta ($\vec{F}_{\text{neto}} = \vec{F}_c$; véase el capítulo 5 de Física 11). Por lo tanto, al describir el movimiento circular, la segunda ley de Newton se convierte en $\vec{F}_c = m\vec{a}_c$

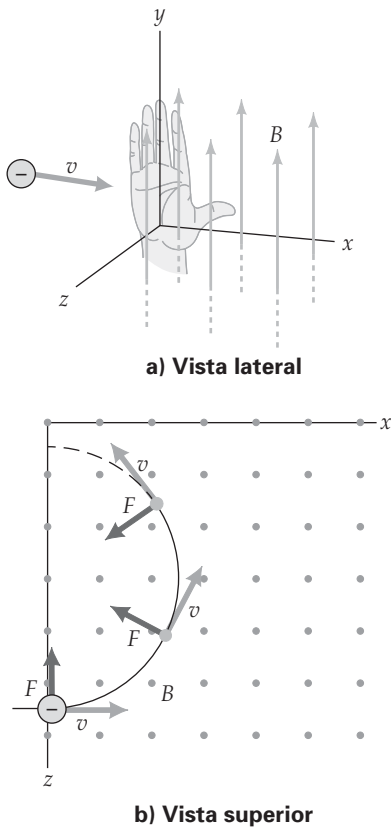
Ahora se sustituye la fuerza magnética (de la ecuación 5.2, ya que $\theta = 90^\circ$) como fuerza neta, y la ecuación de la aceleración centrípeta ($a_c = v^2/r$; véase la sección 5.3 de Física 11), para obtener:

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad \text{o} \quad r = \frac{mv}{qB}$$

Por último, se sustituyen los valores numéricos

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{(2.0 \times 10^{-9} \text{ kg})(1.0 \times 10^3 \text{ m/s})}{(5.0 \times 10^{-4} \text{ C})(0.20 \text{ T})} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.0 \text{ cm}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la partícula fuera un protón que viaja inicialmente en la dirección $+z$, *a)* ¿en qué dirección se desviaría inicialmente? *b)* Si el radio de su trayectoria circular fuera 10 cm y su velocidad fuera $1.0 \times 10^6 \text{ m/s}$, ¿cuál sería la intensidad del campo magnético?



▲ FIGURA 5.6 Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético *a)* Una partícula cargada que entra en un campo magnético uniforme se desvía, en este caso hacia el plano xy , de acuerdo con la regla de la mano derecha, porque la carga es negativa. *b)* En el campo, la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad de la partícula. Esta última se mueve en trayectoria circular si el campo es constante, y si entra en dirección perpendicular a la del campo. (Véase el ejemplo 5.2.)

5.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos

OBJETIVO: Comprender cómo se usa la fuerza magnética en las partículas cargadas en varias aplicaciones prácticas.

Hemos visto que una partícula cargada en movimiento en un campo magnético, por lo general, experimenta una fuerza magnética. Esta fuerza desvía a la partícula en un grado que depende de su masa, carga y velocidad (rapidez y dirección), así como de la intensidad del campo. Veamos cómo es que esta fuerza desempeña un papel fundamental en algunos aparatos, máquinas e instrumentos comunes.

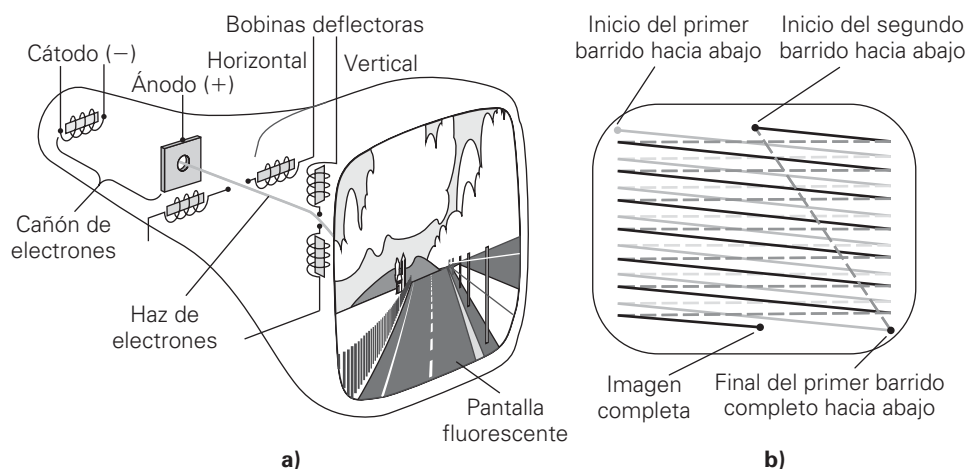
El tubo de rayos catódicos (CRT): pantallas de osciloscopio, televisores y monitores de computadora*

El **tubo de rayos catódicos (CRT)**, siglas en inglés para *cathode-ray tube* es un tubo de vacío que se usa como pantalla de presentación en un instrumento de laboratorio llamado *osciloscopio* (► figura 5.7). El funcionamiento básico tanto del osciloscopio como del cinescopio de un televisor se muestra en la ▼ figura 5.8. Un filamento metálico caliente emite electrones, que son acelerados por un voltaje aplicado entre el cátodo (-) y el ánodo (+) en un “cañón de electrones”. En un diseño, esos instrumentos usan bobinas conductoras para producir un campo magnético (sección 5.6), que controla la desviación del haz de electrones. Al variar rápidamente la intensidad del campo, el haz de electrones barre la pantalla fluorescente en una fracción de segundo. Cuando los electrones llegan al material fluorescente hacen que sus átomos emitan luz. En un televisor blanco y negro, las señales reproducen una imagen en la pantalla, en forma de mosaico de puntos brillantes y oscuros, dependiendo de si el haz está encendido o apagado en determinado instante.

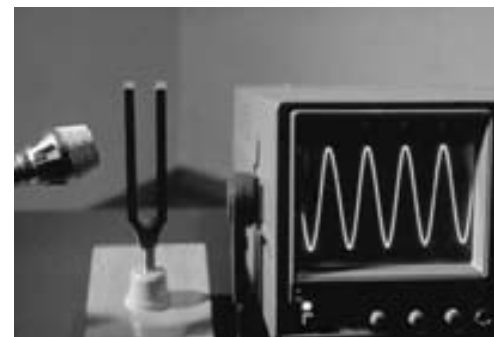
Generar imágenes en un televisor a color o en un monitor a color de computadora es un poco más complicado. Un cinescopio a color común tiene tres haces, uno para cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul; capítulo 10). Puntos fosforescentes en la pantalla se arreglan en grupos de tres (tríadas), con un punto para cada color primario. La excitación de los puntos correspondientes y la emisión resultante (fluorescencia) de una combinación de colores produce una imagen a color.

El selector de velocidad y el espectrómetro de masas

¿Alguna vez ha imaginado cómo se mide la masa de un átomo o una molécula? Los campos eléctricos y magnéticos permiten hacer esto gracias a un **espectrómetro de masas**. Los espectrómetros de masas realizan muchas funciones en los laboratorios modernos. Por ejemplo, se utilizan para seguir moléculas de vida corta en estudios bioquímicos de los organismos vivos. También permiten determinar la estructura de grandes moléculas orgánicas, para analizar la composición de mezclas complejas, por ejemplo, una muestra de aire cargado de esmog. En criminología, los químicos forenses utilizan el espectrómetro de masas para identificar huellas de materiales, por ejemplo, en una marca de pintu-



*Las pantallas planas están sustituyendo a las pantallas basadas en tubos de vacío, gracias al empleo de materiales como los cristales líquidos. En la actualidad, cada vez son más frecuentes los televisores de pantalla LCD y los monitores planos de computadora, que no requieren de fuerzas magnéticas para su operación.



▲ **FIGURA 5.7** Tubo de rayos catódicos (CRT) El movimiento del haz desviado describe una figura sobre una pantalla fluorescente.

◀ **FIGURA 5.8** Cinescopio de televisión a) Un cinescopio de televisión es un tubo de rayos catódicos (de electrones) o CRT. Los electrones son acelerados entre el cátodo y el ánodo, y después son desviados al lugar adecuado de una pantalla fluorescente, mediante los campos magnéticos producidos por las bobinas conductoras de corriente. b) En este diseño, el haz barre una línea sí y otra no sobre la pantalla, en su paso hacia abajo que dura $\frac{1}{60}$ s, y después barre las líneas intermedias en un segundo paso de $\frac{1}{60}$ s. Con lo anterior se forma una imagen completa de 525 líneas en $\frac{1}{30}$ de segundo.

ra que quedó en un accidente automovilístico. En otros campos de conocimiento, como la arqueología y la paleontología, esos instrumentos sirven para separar átomos y determinar la edad de rocas y de artefactos que utilizaron nuestros ancestros. En los hospitales modernos, los espectrómetros de masas son esenciales para medir y mantener la composición adecuada de medicamentos en estado gaseoso, como los gases anestésicos que se administran en una operación quirúrgica.

Nota: la diferencia entre las masas de un átomo o molécula neutros y sus contrapartes con carga (iones) es igual tan sólo a la masa de uno o dos electrones; por consiguiente, es insignificante en la mayor parte de los casos.

En realidad, lo que se mide en el espectrómetro de masas son las masas de los *iones* o moléculas cargadas.* Se producen iones con una carga conocida (+q) quitando electrones a átomos y moléculas. En este punto, el haz de iones que resulta tendría una distribución de velocidades, y no una sola velocidad. Si estas partículas entraran a un espectrómetro de masas, entonces los iones de diferente velocidad tomarían distintas trayectorias en el aparato. Así, antes de que entren al espectrómetro de masas, se seleccionan los iones con una velocidad específica mediante un *selector de velocidad*. Este instrumento consiste en un campo eléctrico y un campo magnético en ángulo recto entre sí.

Este arreglo permite que las partículas que se mueven con una velocidad única pasen sin desviarse. Para visualizar lo anterior, considere un ion positivo que se acerca a los campos cruzados, y forma con ambos ángulo recto. El campo eléctrico produce una fuerza hacia abajo ($F_e = qE$), y el campo magnético produce una fuerza hacia arriba ($F_m = qvB_1$). (Verifique la dirección de cada fuerza en la figura 5.9.)

Si el haz no se va a desviar, la fuerza resultante o neta sobre cada partícula debe ser cero. En otras palabras, estas dos fuerzas se anulan, al ser iguales en magnitud y tener direcciones contrarias. Igualando las dos magnitudes de fuerzas,

$$F_e = F_m \quad \text{o} \quad qE = qvB_1$$

de donde se puede despejar una velocidad “seleccionada”:

$$v = \frac{E}{B_1}$$

Si las placas son paralelas, el campo eléctrico entre ellas se determina mediante $E = V/d$, donde V es el voltaje a través de las placas y d es la distancia entre ellas. Una versión más práctica de la ecuación anterior

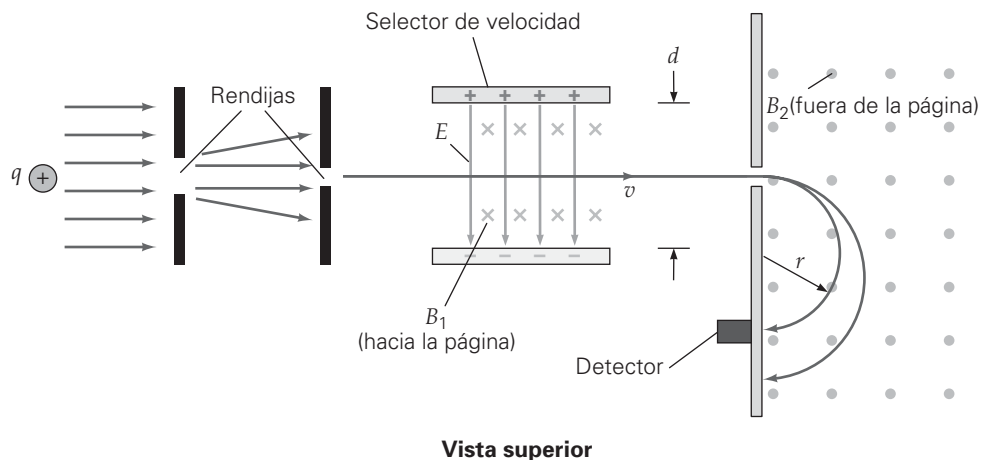
$$v = \frac{V}{B_1 d} \quad \text{Velocidad seleccionada en un selector de velocidad} \quad (5.4)$$

La velocidad deseada se puede seleccionar modificando V , en tanto que B_1 y d son difíciles de cambiar.

Adelante del selector de velocidad, el haz pasa por una rendija y llega a otro campo magnético (B_2), que es perpendicular a la dirección del haz. En este punto, el haz de partículas se flexiona y forma un arco circular. El análisis es idéntico al del ejemplo 5.2 y, en consecuencia

$$F_c = ma_c \quad \text{o} \quad qvB_2 = m \frac{v^2}{r}$$

► **FIGURA 5.9** Principio del espectrómetro de masas Los iones pasan por el selector de velocidad; sólo aquellos que tienen determinada velocidad ($v = E/B_1$) entran en un campo magnético (B_2). Esos iones son desviados; el radio de su trayectoria circular depende de la masa y la carga que tengan. Trayectorias con dos radios distintos indican que el haz contiene iones de dos masas distintas (suponiendo que tienen la misma carga).



*Recuerde que al quitar o agregar electrones a un átomo o molécula se produce un ion. Sin embargo, la masa de un ion tiene una diferencia insignificante con respecto a la masa de su átomo neutral, porque la masa del electrón es muy pequeña en comparación con las masas de los protones y neutrones en los núcleos atómicos.

Se utiliza la ecuación 5.4, y la masa de la partícula es

$$m = \left(\frac{qdB_1B_2}{V} \right) r \quad (\text{masa determinada con un espectrómetro de masas}) \quad (5.5)$$

La cantidad entre paréntesis es una constante (suponiendo que todos los iones tengan la misma carga). Por lo tanto, cuanto mayor sea la masa de un ion, el radio de su trayectoria circular será mayor. En la figura 5.9 se observan dos trayectorias circulares de radios distintos. Esto indica que el haz en realidad contiene iones de dos masas distintas. Si se mide el radio (por ejemplo, registrando la posición donde los iones se encuentran con un detector), es posible calcular la masa del ion mediante la ecuación 5.5.

En un espectrómetro de masas con diseño un poco diferente, el detector está en una posición fija. En este caso, el instrumento funciona variando la magnitud del campo magnético (B_2) en el tiempo, y la computadora registra y almacena la lectura del detector como una función del tiempo. Advertida que en este diseño, m es proporcional a B_2 . Para observar esto, escriba la ecuación 5.5 como $m = (qdB_1r/v)B_2$. Como la cantidad dentro del paréntesis es una constante, entonces $m \propto B_2$. Al variar B_2 , los datos del detector en conexión con la computadora de alta velocidad nos permiten determinar las masas y números relativos (esto es, el porcentaje) de iones de cada masa. Independientemente del diseño, el resultado, que se llama *espectro de masas* (la cantidad de iones graficada en función de su masa), se muestra normalmente en una pantalla de osciloscopio o de computadora, y se digitaliza para fines de almacenamiento y análisis (► figura 5.10). El siguiente ejemplo describe los cálculos en un espectrómetro de masas.

Ejemplo 5.3 ■ La masa de una molécula: un espectrómetro de masas

A una molécula de metano se le quita un electrón antes de que entre a un espectrómetro de masas, como el de la figura 5.9. Después de pasar por el selector de velocidad, el ion tiene una velocidad de 1.00×10^3 m/s. A continuación entra en la región del campo magnético principal, cuya intensidad es de 6.70×10^{-3} T. De ahí, describe una trayectoria circular y llega a 5.00 cm de la entrada al campo. Calcule la masa de esta molécula. (Ignore la masa del electrón que se removió.)

Razonamiento. La fuerza magnética que actúa sobre la molécula cargada da la fuerza centrípeta para la trayectoria en arco circular. Como la velocidad y el campo magnético forman ángulo recto, la fuerza magnética se determina con la ecuación 5.2. Si se aplica la segunda ley de Newton al movimiento circular, es posible determinar la masa de la molécula.

Solución. Primero se listan los datos.

Dado: $q = 1.60 \times 10^{-19}$ C (electrón) **Encuentre:** m (masa de una molécula de metano)
 $r = d/2 = (5.00 \text{ cm})/2 = 0.0250$ m
 $B_2 = 6.70 \times 10^{-3}$ T
 $v = 1.00 \times 10^3$ m/s

La fuerza centrípeta sobre el ion ($F_c = mv^2/r$) la da la fuerza magnética ($F_m = qvB_2$):

$$\frac{mv^2}{r} = qvB_2$$

Se despeja m en esta ecuación y se sustituyen los valores numéricos:

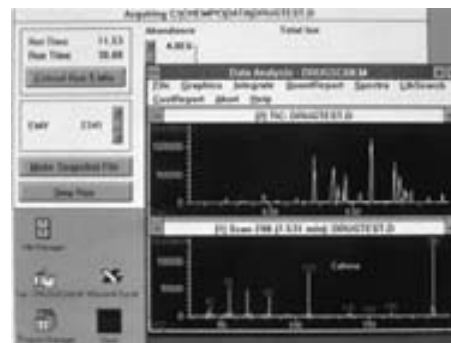
$$m = \frac{qB_2r}{v} = \frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(6.70 \times 10^{-3} \text{ T})(0.0250 \text{ m})}{1.00 \times 10^3 \text{ m/s}} = 2.68 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si el campo magnético entre las placas paralelas del selector de velocidad, que están a 10.0 mm de distancia, es 5.00×10^{-2} T. ¿Qué voltaje se debe aplicar a las placas?

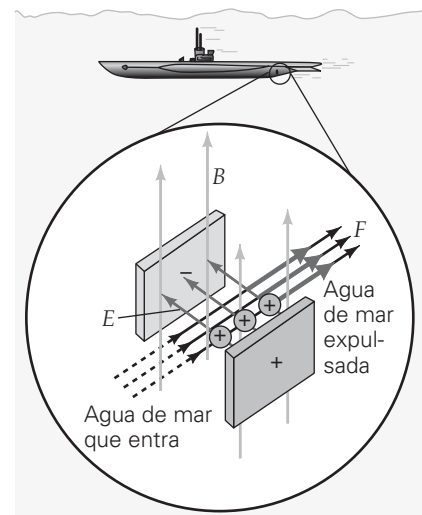
Propulsión silenciosa: magnetohidrodinámica

Buscando métodos silenciosos y eficientes de propulsión en el mar, los ingenieros inventaron un sistema basado en la *magnetohidrodinámica*, el estudio de las interacciones de fluidos en movimiento con campos magnéticos. Este método se basa en la fuerza magnética y no requiere de partes móviles como motores, chumaceras o ejes. Para evitar la detección, la característica de “funcionamiento silencioso” tiene especial importancia en el diseño de los submarinos modernos.

En esencia, el agua de mar entra por el frente de la unidad y se expulsa a alta velocidad por atrás (► figura 5.11). Un electroimán superconductor se usa para producir un gran campo magnético y al mismo tiempo, un generador eléctrico produce un alto voltaje de cd y envía una corriente por el agua de mar. [Recuerde que el agua de mar es un



▲ **FIGURA 5.10** Espectrómetro de masas Pantalla de un espectrómetro de masas, donde el número de moléculas se grafica en el eje vertical, y la masa molecular en el horizontal. La molécula que se analiza es de mioglobina, una proteína que almacena oxígeno en el tejido muscular. Para esa mioglobina, cada pico en la pantalla representa la masa de un fragmento ionizado. Esas gráficas, que son los *espectros de masas*, ayudan a determinar la composición y la estructura de moléculas grandes. El espectrómetro de masas también sirve para identificar cantidades diminutas en una mezcla compleja.



▲ **FIGURA 5.11** Propulsión magnetohidrodinámica En la propulsión magnetohidrodinámica, se hace pasar una corriente eléctrica por agua de mar, con voltaje de cd. Un campo magnético ejerce una fuerza sobre la corriente, empujando al agua hacia fuera del submarino o bote. La fuerza de reacción empuja al barco en dirección contraria.

buen conductor, porque tiene una elevada concentración de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-). La fuerza magnética sobre la corriente eléctrica impulsa al agua hacia atrás, y se expulsa un chorro de agua. De acuerdo con la tercera ley de Newton, una fuerza de reacción impulsa al submarino hacia delante, permitiéndole acelerar en silencio.

5.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica

OBJETIVOS: a) Calcular la fuerza magnética sobre un conductor con corriente eléctrica y el momento de torsión sobre un circuito con corriente y b) explicar el concepto del momento magnético de una espira o bobina.

Cualquier carga eléctrica que se mueve en un campo magnético experimenta una fuerza magnética. Como una corriente eléctrica se compone de cargas en movimiento, cabe esperar que un conductor con corriente eléctrica, cuando se coloca en un campo magnético, también esté sometido a esa fuerza. La suma de las fuerzas magnéticas individuales sobre las cargas en movimiento debe ser igual a la fuerza magnética total sobre el conductor.

Nota: recuerde que considerar una corriente en términos de cargas positivas sólo es una convención útil. En realidad, los electrones negativos son los portadores de la carga en la corriente eléctrica ordinaria.

La dirección de la "corriente convencional" supone que la corriente eléctrica en un conductor se debe al movimiento de cargas positivas, \blacktriangledown figura 5.12.* La fuerza magnética está en su máximo porque $\theta = 90^\circ$. En un momento t , una carga q_i se movería, en promedio, una longitud $L = vt$, donde v es la velocidad promedio de deriva. Como todas las cargas en movimiento (carga total = Σq_i) que hay en este tramo de conductor están bajo la acción de una fuerza magnética en la misma dirección, la magnitud de la fuerza total sobre este tramo de alambre (ecuación 5.2) es

$$F = (\Sigma q_i)vB$$

Se sustituye v por L/t y se reordena, para obtener

$$F = (\Sigma q_i)\left(\frac{L}{t}\right)B = \left(\frac{\Sigma q_i}{t}\right)LB$$

Pero $\Sigma q_i/t$ no es más que la corriente (I). En términos de la corriente del circuito, escribimos

$$F = ILB \quad (\text{válido sólo cuando la corriente y el campo eléctrico son perpendiculares}) \quad (5.6)$$

Este resultado da la fuerza máxima en el conductor. Si la corriente forma un ángulo θ con respecto a la dirección del campo, entonces la fuerza magnética sobre el mismo será menor. En general, la fuerza sobre un tramo de conductor con corriente, dentro de un campo magnético uniforme, es

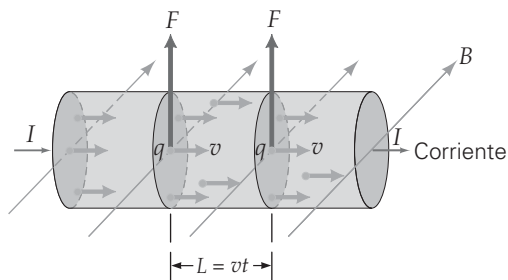
$$F = ILB \sin \theta \quad \text{fuerza magnética sobre un conductor con corriente} \quad (5.7)$$

Si la corriente está en paralelo o en dirección opuesta al campo, la fuerza sobre el conductor es cero.

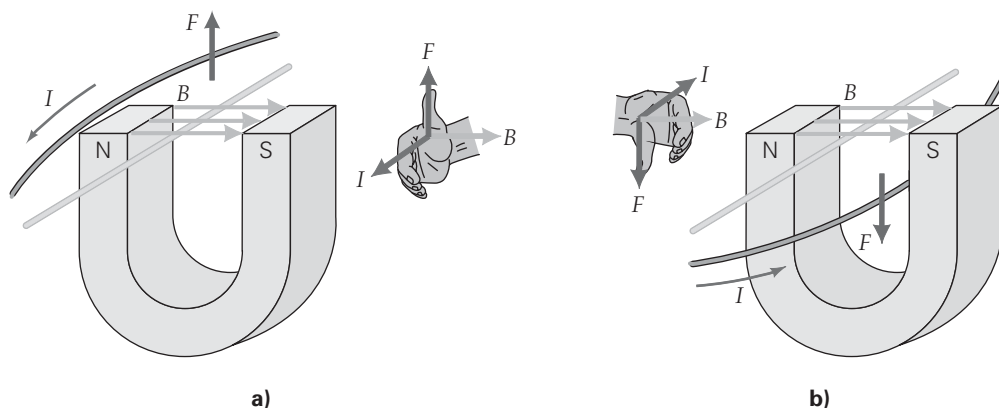
La dirección de la fuerza magnética sobre un conductor con corriente también se determina mediante una regla de la mano derecha. Como en el caso de las partículas cargadas individuales, hay varias versiones equivalentes de la **regla de la mano derecha para la fuerza sobre un conductor con corriente**, y la más común es la siguiente:

Cuando los dedos de la mano derecha apuntan en la dirección de la corriente convencional I , y después se curvan hacia el vector \mathbf{B} , el pulgar extendido apunta en dirección de la fuerza magnética sobre el conductor (véase las figuras 5.13a y b).

► **FIGURA 5.12** Fuerza sobre un segmento de alambre Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre conductores con corriente, porque la corriente eléctrica está formada por partículas cargadas en movimiento. Se indica la fuerza magnética máxima sobre un tramo de un alambre con corriente porque el ángulo entre la velocidad de la carga y el campo es de 90° .



*Use la regla de la fuerza de la mano derecha para que se convenza de que los electrones que viajan hacia la izquierda tendrán la misma dirección de la fuerza magnética.

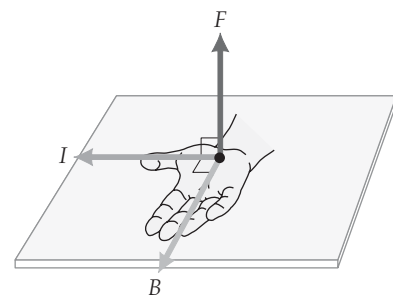


◀ **FIGURA 5.13** Una regla de la mano derecha para conductores con corriente eléctrica. La dirección de la fuerza se obtiene apuntando los dedos de la mano derecha en dirección de la corriente convencional I , y luego doblándolos hacia B . El pulgar extendido apunta en dirección de F . La fuerza es *a)* hacia arriba y *b)* hacia abajo.

En la ►figura 5.14 se presenta una alternativa equivalente:

Cuando los dedos de la mano derecha se estiran en la dirección del campo magnético y el pulgar apunta en dirección de la corriente convencional I en el conductor, la palma de la mano derecha queda hacia la dirección de la fuerza magnética sobre el conductor.

Ambas reglas dan como resultado la misma dirección, porque son extensiones de las reglas de la mano derecha sobre cargas individuales. Para visualizar cómo interactúan magnéticamente dos conductores portadores de corriente eléctrica, considere el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 5.14** Una regla alternativa de la mano derecha. Cuando los dedos de la mano derecha se extienden en dirección del campo magnético B y el pulgar se apunta en la dirección de la corriente convencional I , la palma queda hacia la dirección de F . Compruebe que así se obtiene la misma dirección que con la regla equivalente descrita en la figura 5.13.

Ejemplo integrado 5.4 ■ Fuerzas magnéticas sobre conductores suspendidos en el ecuador

Como un conductor con corriente experimenta una fuerza magnética, podría ser factible suspender ese conductor en reposo sobre el suelo, usando el campo magnético terrestre. *a)* Un conductor largo y recto está en el ecuador. ¿En qué dirección debe ir la corriente en el conductor para lograr esto? 1) Hacia arriba, 2) hacia abajo, 3) hacia el este o 4) hacia el oeste. *b)* Calcule la corriente necesaria para suspender el conductor, suponiendo que el campo magnético de la Tierra es de 0.40 G en el ecuador, que el conductor mide 1.0 m de longitud, y que su masa es de 30 g.

a) Razonamiento conceptual. La dirección requerida en la fuerza es hacia arriba, porque la gravedad actúa hacia abajo (►figura 5.15). El campo magnético terrestre en el ecuador es paralelo al suelo, y apunta al norte. Como la fuerza magnética es perpendicular a la corriente y al campo magnético a la vez, no puede dirigirse hacia arriba ni hacia abajo, lo que elimina las dos primeras opciones. Para decidir entre el este y el oeste, simplemente se elige uno de los casos y se ve si funciona o no. Suponga que la corriente es hacia el oeste. Si se aplica la regla de la mano derecha para la fuerza, se ve que la fuerza actúa hacia abajo. Como eso no es correcto, entonces la única respuesta que queda es la 3: hacia el este. Compruebe que esta opción es correcta aplicando directamente la regla de la mano derecha.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Se conoce la masa del conductor, y, por lo tanto, es posible calcular su peso. Éste debe ser igual y opuesto a la fuerza magnética. La corriente y el campo forman ángulo recto entre sí; así que la fuerza magnética se determina con la ecuación 5.6 y, a partir de esta información, se puede calcular la corriente.

Primero se listan los datos (y se convierten a unidades SI al mismo tiempo):

Dado: $m = 30 \text{ g} = 3.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$

$B = (0.40 \text{ G})(10^{-4} \text{ T/G}) = 4.0 \times 10^{-5} \text{ T}$

$L = 1.0 \text{ m}$

Encuentre: I (la corriente requerida para suspender el conductor)

El peso del conductor es $w = mg = (3.0 \times 10^{-2} \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 0.29 \text{ N}$. Con el conductor suspendido, esto debe ser igual a la fuerza magnética, es decir,

$$w = ILB$$

Por consiguiente,

$$I = \frac{w}{LB} = \frac{0.29 \text{ N}}{(1.0 \text{ m})(4.0 \times 10^{-5} \text{ T})} = 7.4 \times 10^3 \text{ A}$$

Es una corriente enorme, por lo que suspender el conductor de esta forma no es una idea práctica.



▲ **FIGURA 5.15** ¿Desafío de la gravedad con un campo magnético? Cerca del ecuador terrestre existe la posibilidad teórica de anular el tirón de la gravedad con una fuerza magnética hacia arriba sobre un conductor. ¿Cuál debe ser la dirección y la magnitud de la corriente? (Véase el Ejemplo integrado 5.4.)

(continúa en la siguiente página)

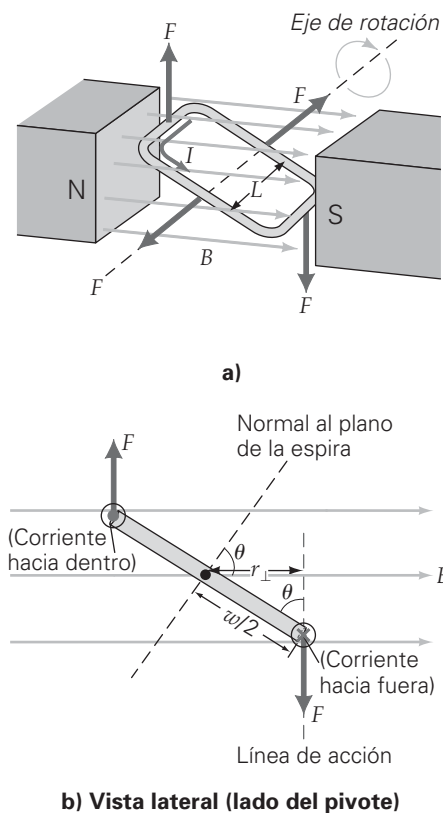


FIGURA 5.16 Fuerza y momento de torsión sobre una espira giratoria con corriente eléctrica

a) Una espira rectangular con corriente eléctrica, orientada dentro de un campo magnético como se observa aquí, está bajo la acción de una fuerza en cada uno de sus lados. Sólo las fuerzas sobre los lados paralelos al eje de rotación producen un momento de torsión que hace girar a la espira. b) En la vista lateral se presenta la geometría para determinar el momento de torsión. (Para conocer los detalles, véase el texto.)

Nota: una bobina consiste en N espiras del mismo tamaño y por todas ellas pasa la misma corriente I en serie.

Ejercicio de refuerzo. a) Con la regla de la mano derecha demuestre que suspender un conductor no funcionaría en el polo sur ni en el polo norte terrestres. b) ¿Cuál sería la masa que debería tener el conductor para que quedara suspendido al conducir una corriente más razonable de 10 A? ¿Parece una masa razonable para un tramo de 1 m de longitud?

Momento de torsión sobre una espira con corriente eléctrica

Otro uso importante del magnetismo consiste en ejercer fuerzas y momentos de torsión sobre espiras conductoras de corriente (la espira rectangular de la figura 5.16a). Suponga que la espira tiene rotación libre alrededor de un eje que pasa por dos lados opuestos. No hay fuerza ni momento de torsión netos que se deban a las fuerzas que actúan en los lados pivoteados de la espira. Las fuerzas sobre ellos son iguales y opuestas, y están en el plano de la espira, por lo que no producen momento de torsión ni fuerza netos. Las fuerzas iguales y opuestas sobre los dos lados de la espira que son paralelos al eje de rotación, aunque no crean una fuerza neta, sí producen un momento de torsión neto (véase el capítulo 6 de Física 11).

Para visualizar lo anterior, examine la figura 5.16b. La magnitud de la fuerza magnética F sobre cada lado no pivoteado (longitud L) está dada por $F = ILB$. El momento de torsión producido por una fuerza (sección 6.2 de Física 11) es $\tau = r_{\perp} F$, donde r_{\perp} es la distancia perpendicular (el brazo de palanca) del eje de rotación a la línea de acción de la fuerza. De acuerdo con la figura 5.16b, $r_{\perp} = \frac{1}{2}w \sin \theta$, donde w es el ancho de la espira y θ es el ángulo que forman la normal al plano de la espira y la dirección del campo magnético. El momento de torsión neto τ se debe a los momentos de torsión de ambas fuerzas y es la suma de los dos, o el doble de uno de ellos (¿por qué?)

$$\tau = 2r_{\perp} F = 2\left(\frac{1}{2}w \sin \theta\right)F = wF \sin \theta = w(ILB) \sin \theta$$

Entonces, ya que wL es el área (A) de la espira, se puede expresar la magnitud del momento de torsión sobre una espira única pivotada y con corriente, como sigue:

$$\tau = IAB \sin \theta \quad \text{momento de torsión sobre una espira con corriente} \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 es válida para una espira plana de cualquier forma y área. Una bobina está formada por N espiras, o vueltas, conectadas en serie (donde $N = 2, 3, \dots$). Así, en una bobina, el momento de torsión es N veces el de una espira (ya que, en cada una, la corriente es la misma). Por lo tanto, el momento de torsión en una bobina es

$$\tau = NIAB \sin \theta \quad \text{momento de torsión sobre una espira con corriente} \quad (5.9)$$

La magnitud del vector **momento magnético** de una bobina, m , se define como

$$m = NIA \quad \text{momento magnético de una bobina} \quad (5.10)$$

(Las unidades SI del momento magnético son: ampere · metro², o A · m²)

La dirección del vector momento magnético \vec{m} se determina doblando en círculo los dedos de la mano derecha, en dirección de la corriente (convencional). El pulgar apunta en dirección del vector. Note que \vec{m} siempre es perpendicular al plano de la bobina (figura 5.17a). La ecuación 5.10 se puede replantear en términos del momento magnético:

$$\tau = mB \sin \theta \quad (5.11)$$

El momento de torsión magnético tiende a alinear al vector momento magnético (\vec{m}) con la dirección del campo magnético. Observe que una espira o bobina en un campo magnético está sujeta a un momento de torsión hasta que $\sin \theta = 0$ (es decir, $\theta = 0^\circ$), y en ese punto las fuerzas que producen el momento de torsión son paralelas al plano de la espira (véase la figura 5.17b). Esta situación se da cuando el plano de la espira es perpendicular al campo. Si la espira parte del reposo, de tal manera que su momento magnético forma cierto ángulo con el campo magnético, sufrirá una aceleración angular que la hará girar hasta la posición en que el ángulo es cero. La inercia rotacional la hará pasar del punto de equilibrio (ángulo cero, figura 5.17c) hacia el otro lado. Ahí, el momento de torsión desacelerará la espira, la detendrá y luego la volverá a acelerar de regreso hacia el equilibrio. El momento de torsión sobre la espira es de *restitución*, y tiende a hacer que el momento magnético oscile respecto a la dirección del campo, en forma muy parecida a la de una brújula que se va deteniendo hasta que apunta al norte.

Ejemplo 5.5 ■ Momento magnético: ¿causa el giro?

Un técnico de laboratorio forma una bobina circular con 100 vueltas de alambre delgado de cobre, cuya resistencia es de 0.50Ω . El diámetro de la bobina es de 10 cm, y está conectada con una batería de 6.0 V. *a)* Determine el momento magnético (magnitud) de la bobina. *b)* Determine el momento de torsión (magnitud) máximo en la bobina, si se coloca entre los polos de un imán, donde la intensidad de campo es de 0.40 T.

Razonamiento. El momento magnético incluye la cantidad de vueltas y el área de la bobina, y la corriente en los conductores. Para calcular la corriente se utiliza la ley de Ohm. El momento de torsión máximo es cuando el ángulo entre el vector momento magnético y el campo B es de 90° , de acuerdo con la ecuación 5.11.

Solución. Se listan los datos; el radio del círculo se expresa en unidades SI:

Dado: $N = 100$ vueltas
 $r = d/2 = 5.0 \text{ cm} = 5.0 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $R = 0.50 \Omega$
 $V = 6.0 \text{ V}$

Encuentre: *a)* m (momento magnético de la bobina)
b) τ (momento de torsión máximo sobre la bobina)

a) El momento magnético se calcula con la ecuación 5.10, el área y la corriente:

$$A = \pi r^2 = (3.14)(5.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

e

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6.0 \text{ V}}{0.50 \Omega} = 12 \text{ A}$$

Por consiguiente, la magnitud del momento magnético es

$$m = NIA = (100)(12 \text{ A})(7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2) = 9.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

b) La magnitud del momento de torsión máximo (utilizando $\theta = 90^\circ$, en la ecuación 5.11) es:

$$\tau = mB \sin \theta = (9.5 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(0.40 \text{ T})(\sin 90^\circ) = 3.8 \text{ m} \cdot \text{N}$$


Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, *a)* demuestre que si se gira la bobina de tal manera que su vector momento magnético quede a 45° , el momento de torsión *no* sería la mitad del momento de torsión máximo. *b)* ¿A qué ángulo el momento de torsión sería la mitad del máximo?

5.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos

OBJETIVO: Explicar el funcionamiento de diversos instrumentos cuyas funciones dependen de interacciones electromagnéticas entre corrientes y campos magnéticos.

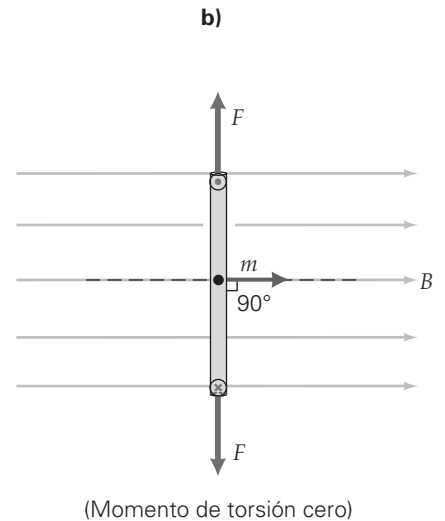
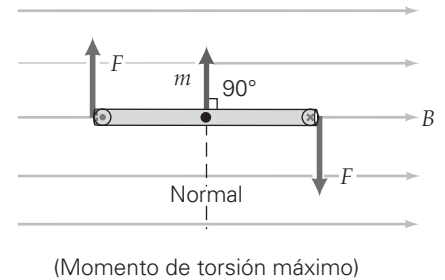
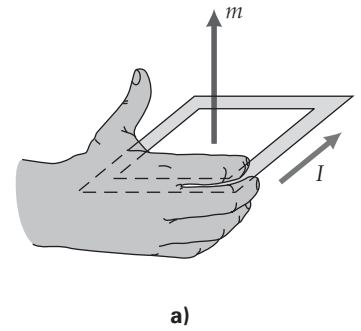
Con los principios de las interacciones electromagnéticas, se comprenderá el funcionamiento de algunos dispositivos que se incluyen en esta sección.

El galvanómetro: base del amperímetro y el voltímetro

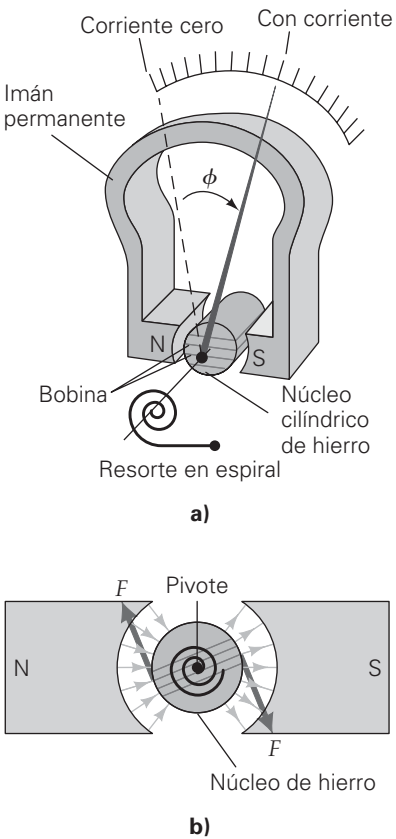
Recuerde que los amperímetros y voltímetros utilizan un *galvanómetro* como parte esencial de su diseño.* Ahora explicaremos cómo funciona. En la , un galvanómetro está formado por una bobina de espiras de alambre sobre un núcleo de hierro, que gira entre los polos de un imán permanente. Cuando pasa una corriente por la bobina, se ejerce un momento de torsión. Un pequeño resorte produce el momento de torsión contrario y, cuando los dos momentos se anulan (al llegar al equilibrio), una aguja indica un ángulo de desviación ϕ que es proporcional a la corriente en la bobina.

Surge un problema cuando el campo magnético del galvanómetro no tiene la forma correcta. Si la bobina girara de su posición de momento de torsión máximo ($\theta = 90^\circ$), el momento de torsión sería menor, y la desviación ϕ de la aguja *no* sería proporcional a la corriente. Para evitarlo, las caras polares deben ser curvas, que abarquen a la bobina devanada sobre un núcleo cilíndrico de hierro. El núcleo concentra las líneas de campo, y \mathbf{B} siempre es perpendicular al lado no pivotado de la bobina (figura 5.18b). Con este diseño, el ángulo de desviación es proporcional a la corriente que pasa por el galvanómetro ($\phi \propto I$), como se requiere.

*Aun cuando muchos voltímetros y amperímetros son digitales, es útil comprender cómo sus versiones mecánicas emplean fuerzas magnéticas para hacer mediciones eléctricas.



▲ **FIGURA 5.17** Momento magnético de una espira con corriente *a)* Con la regla de la mano derecha se determina la dirección del vector momento magnético de la espira, \vec{m} . Los dedos envuelven la espira en dirección de la corriente, y el pulgar señala la dirección de \vec{m} . *b)* Condición para momento de torsión máximo. *c)* Condición de momento de torsión cero. Si la espira gira libremente, su vector momento magnético tenderá a alinearse con la dirección del campo magnético externo.



▲ FIGURA 5.18 El galvanómetro
a) La desviación (ϕ) de la aguja, respecto a su posición cuando la corriente es cero, es proporcional a la corriente que pasa por la bobina. En consecuencia, un galvanómetro puede detectar y medir corrientes.
b) Se usa un imán con zapatas polares curvas, para que las líneas de campo siempre sean perpendiculares a la superficie del núcleo, y el momento de torsión no varíe en función de ϕ .

El motor de corriente directa (cd)

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica. Esa conversión ocurre durante el movimiento de la aguja de un galvanómetro. Sin embargo, no se considera que un galvanómetro sea un motor, porque un **motor de cd** práctico debe girar continuamente para entregar energía en forma continua.

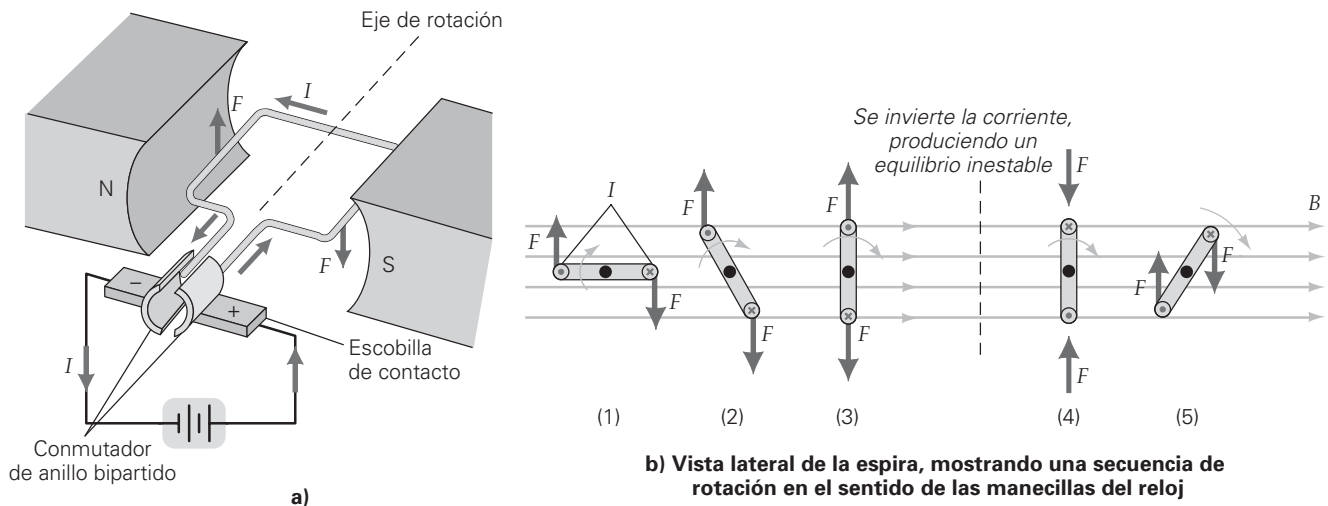
Una bobina con corriente, pivoteada y dentro de un campo magnético girará, pero sólo media vuelta. Cuando el campo magnético y el momento magnético de la bobina se alinean ($\text{sen } \theta = 0$), el momento de torsión sobre la bobina es cero, y esta última se encontrará en equilibrio.

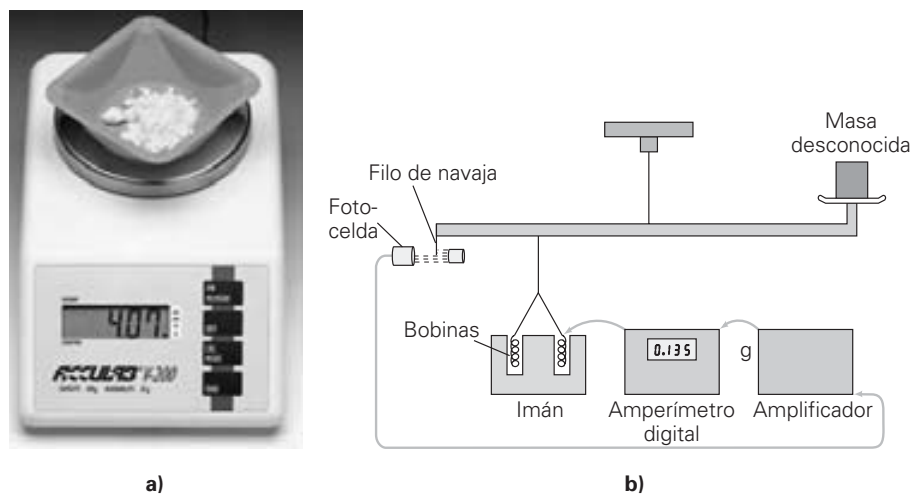
Para obtener una rotación continua, se invierte la corriente cada medio giro, para que se inviertan las fuerzas productoras del momento de torsión. Esto se logra mediante un *conmutador de anillo bipartido*, que consiste en un arreglo de dos medios anillos metálicos, aislados entre sí (▼ figura 5.19a). Los extremos del alambre de la bobina están fijos a los medios anillos, y giran juntos. La corriente se suministra a la bobina a través del conmutador, mediante escobillas de contacto. A continuación, con medio anillo eléctricamente positivo y el otro medio anillo negativo, la bobina y los medios anillos giran. Cuando han descrito media vuelta, los medios anillos entran en contacto con las escobillas opuestas. Como su polaridad está invertida, la corriente en la bobina también tiene la dirección opuesta. Esta acción invierte las direcciones de las fuerzas magnéticas y mantiene el momento de torsión en el mismo sentido (figura 5.19b). Aun cuando el momento de torsión sea cero en la posición de equilibrio, la bobina está en equilibrio inestable y tiene suficiente el movimiento de rotación para rebasar el punto de equilibrio, después del cual aparece el momento de torsión y la bobina gira otro medio ciclo. El proceso se repite de forma continua. En un motor real, al eje giratorio se le llama *armadura*.

La báscula electrónica

Las básculas tradicionales de laboratorio miden masas equilibrando el peso de una masa desconocida con el de una masa conocida. Las nuevas básculas electrónicas digitales (► figura 5.20a) funcionan con un principio diferente. En su diseño sigue habiendo una barra suspendida con un platillo en uno de sus extremos, donde se coloca el objeto por pesar, pero no se necesitan masas conocidas. La fuerza equilibrante hacia abajo es suministrada por bobinas conductoras de corriente, en el campo de un imán permanente (figura 5.20b). Las bobinas se mueven hacia arriba y hacia abajo dentro del espacio libre cilíndrico del imán, y la fuerza hacia abajo es proporcional a la corriente en las bobinas. El peso del objeto se determina a partir de la corriente que pasa por la bobina, que produce una fuerza suficiente para equilibrar la barra. La báscula determina la masa del objeto utilizando el valor local para g , en la fórmula $m = w/g$.

▼ FIGURA 5.19 Un motor de cd **a)** Un conmutador de anillo bipartido invierte la polaridad y la dirección de la corriente cada medio ciclo, de manera que la bobina gira en forma continua. **b)** Vista desde el extremo, que muestra las fuerzas sobre la bobina y su orientación durante un medio ciclo. [Para simplificar, se muestra una sola espira, pero la bobina tiene muchas (N).] Observe la inversión de la corriente (notación de puntos y cruces) entre las situaciones (3) y (4).





◀ **FIGURA 5.20** Báscula electrónica
 a) Una báscula electrónica digital.
 b) Diagrama del principio de una báscula electrónica. La fuerza de equilibrio es suministrada mediante electromagnetismo.

La corriente necesaria para producir el equilibrio se controla de forma automática mediante fotoceldas y una bobina electrónica de retroalimentación. Cuando la barra está en equilibrio y en posición horizontal, una obstrucción en forma de navaja corta una parte de la luz de una fuente, que incide sobre un “ojo eléctrico” fotosensible, cuya resistencia depende de la cantidad de luz que recibe. Esta resistencia controla la corriente que manda un amplificador por la bobina. Si la barra se inclina de manera que el filo de la navaja sube y a la fotocelda llega más luz, aumenta la corriente contrarrestar la inclinación. Así, la barra se mantiene electrónicamente casi en equilibrio horizontal. La corriente que mantiene la barra en posición horizontal se indica en un amperímetro digital, calibrado en gramos o miligramos, y no en amperes.

5.6 Electromagnetismo: la fuente de los campos magnéticos

OBJETIVOS: a) Comprender la producción de un campo magnético por corrientes eléctricas, b) calcular la intensidad del campo magnético en casos sencillos y c) aplicar la regla de la mano derecha para determinar la dirección del campo magnético a partir de la dirección de la corriente que lo produce.

Los fenómenos eléctricos y magnéticos, se relacionan en forma estrecha y fundamental. La fuerza *magnética* sobre una partícula depende de su carga *eléctrica*. Pero, ¿de dónde proviene el campo magnético? El físico danés Hans Christian Oersted contestó esta pregunta en 1820, cuando encontró que las *corrientes eléctricas producen campos magnéticos*. Sus estudios marcaron el inicio de la disciplina llamada **electromagnetismo**, que estudia la relación entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.

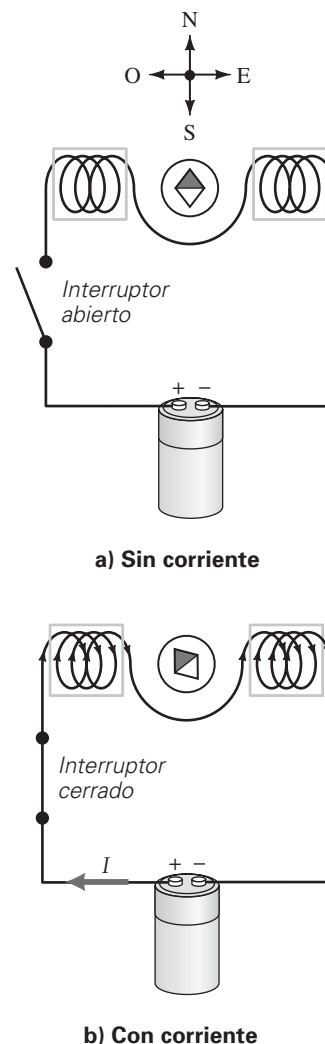
Oersted observó primero que una corriente eléctrica es capaz de desviar la aguja de una brújula. Esta propiedad se puede demostrar con un dispositivo como el de la ▶ figura 5.21. Cuando el circuito está abierto y no pasa corriente, la brújula apunta en dirección al norte. Sin embargo, cuando se cierra el interruptor y hay corriente en el circuito, la brújula apunta a otra dirección, indicando que existe otro campo magnético que afecta a la aguja.

El desarrollo de ecuaciones para determinar el campo magnético que generan diversas configuraciones de conductores de corriente requiere de matemáticas más complicadas. Así, en esta sección sólo se presentarán los resultados para los campos magnéticos en varias configuraciones comunes de corriente.

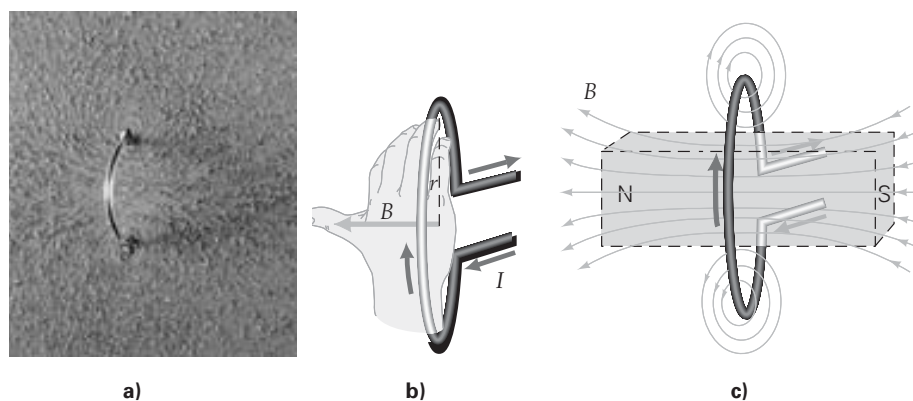
Campo magnético cerca de un conductor largo y recto con corriente

A una distancia perpendicular d desde un conductor largo y recto con corriente I (▶ figura 5.22), la magnitud de \mathbf{B} se determina mediante

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad \text{campo magnético debido a un alambre largo y recto} \quad (5.12)$$



▲ **FIGURA 5.21** Corriente eléctrica y campo magnético
 a) Sin corriente en el alambre, la brújula apunta hacia el norte.
 b) Cuando pasa corriente por el alambre, la brújula se desvía e indica la presencia de un campo magnético adicional, sobrepuesto al de la Tierra. En este caso, la intensidad del campo adicional es aproximadamente igual a la del campo terrestre. ¿Por qué se afirma esto?



◀ **FIGURA 5.24** Campo magnético provocado por una espira circular con corriente eléctrica *a)* Figura que forman las limaduras de hierro para una espira con corriente. Observe que el campo magnético en el centro de la espira es perpendicular al plano de ésta. *b)* La dirección del campo en el área encerrada por la espira se obtiene mediante la regla de la mano derecha. Con los dedos abarcando la espira en dirección de la corriente convencional, el pulgar indica la dirección de \vec{B} en el plano de la espira. *c)* El campo magnético general de una espira circular con corriente es similar al de un imán recto.

En este caso (y en todas las configuraciones donde la corriente describe un círculo, como en los solenoides, que se describirán más adelante), es conveniente determinar la dirección del campo magnético aplicando una regla de la mano derecha que es un poco distinta, pero equivalente, a la de los conductores rectos:

Si se coloca la mano en una espira circular de conductores con corriente, de tal forma que los dedos se doblen en la dirección de la corriente, la dirección del campo magnético dentro del área circular formada por la espira se determina con la dirección en que apunta el pulgar extendido (véase la figura 5.24b).

En todos los casos, las líneas magnéticas forman circuitos cerrados, cuya dirección se determina mediante la regla de la mano derecha. Sin embargo, recuerde que la dirección de \vec{B} es tangente a la línea de campo y, por lo tanto, depende de su ubicación (figura 5.24c). Observe que el campo general de la espira es similar geoméricamente al de un imán recto. Se hablará más de esto posteriormente.

Campo magnético en un solenoide con corriente

Un *solenoid* se forma devanando un alambre largo en forma de una bobina apretada, o hélice, con muchas espiras o vueltas circulares, como se ve en la figura 5.25. Si el radio del solenoide es pequeño en comparación con su longitud (L), el campo magnético en el interior es paralelo al eje longitudinal del solenoide, y su magnitud es constante. Cuanto más largo es el solenoide, más uniforme será el campo interno. Observe cómo el campo del solenoide (figura 5.25) se parece mucho al de un imán recto permanente.

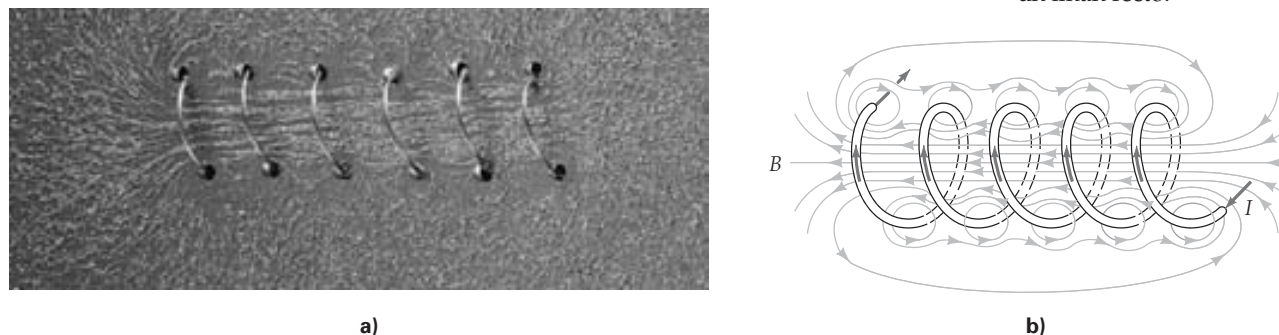
Como es habitual, la dirección del campo en el interior del solenoide se determina con la regla de la mano derecha con geometría circular. Si el solenoide tiene N vueltas y cada una conduce una corriente I , la magnitud del campo eléctrico cerca de su centro es

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad \text{campo magnético cerca del centro de un solenoide} \quad (5.14)$$

Hay que advertir que el campo del solenoide depende de qué tan próximas estén las vueltas del conductor; en otras palabras, depende de cuánta densidad tengan (note la relación N/L). Por lo tanto, n se define como $n = N/L$, para hacer una cuantificación. Sus unidades son vueltas por metro, y a esto se le llama *densidad lineal de vueltas*. En estos términos, la ecuación 5.14 se expresa en ocasiones en la forma $B = \mu_0 nI$.

Para ver por qué el solenoide resulta más conveniente para aplicaciones magnéticas que requieren de un gran campo magnético, considere el siguiente ejemplo.

▼ **FIGURA 5.25** Campo magnético de un solenoide *a)* El campo magnético de un solenoide con corriente eléctrica es bastante uniforme cerca del eje central, como se ve en esta figura que forman las limaduras de hierro. *b)* La dirección del campo en el interior se determina aplicando la regla de la mano derecha a cualquiera de las espiras. Observe la semejanza con el campo cerca de un imán recto.



Ejemplo 5.7 ■ Comparación entre un alambre y un solenoide: concentración del campo magnético

Un solenoide tiene 0.30 m de longitud, con 300 vueltas, y conduce una corriente de 15.0 A. a) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de este solenoide? b) Compare su resultado con el campo cerca del conductor único del ejemplo 5.6.

Razonamiento. El campo B depende de la cantidad de vueltas (N), de la longitud del solenoide (L) y de la corriente (I). Ésta es una aplicación directa de la ecuación 5.14.

Solución.

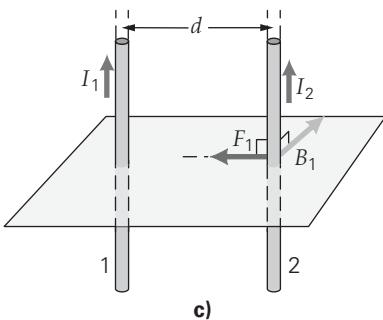
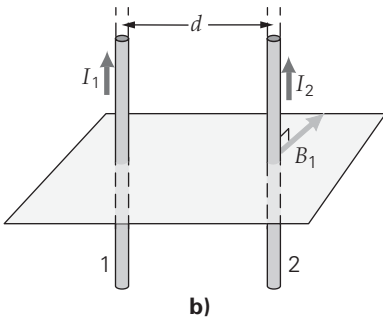
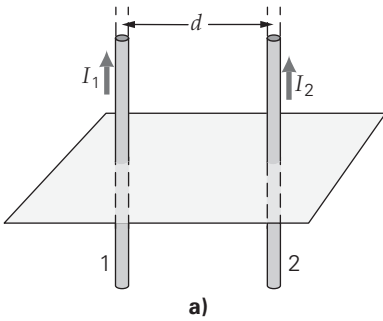
Dado: $I = 15.0 \text{ A}$ **Encuentre:** a) B (la magnitud del campo magnético cerca del centro del solenoide)
 $N = 300$ vueltas b) Compare la respuesta con el ejemplo 5.6, para un conductor largo y recto
 $L = 0.30 \text{ m}$

a) Según la ecuación 19.14,

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(300)(15.0 \text{ A})}{0.30 \text{ m}} = 6\pi \times 10^{-3} \text{ T} \approx 18.8 \text{ mT}$$

b) Observe que es unas 60 veces mayor que el campo cercano al alambre del ejemplo 5.6. Enrollar muchas espiras muy juntas en forma de hélice incrementa el campo y permite el paso de la misma corriente. La razón es que el campo del solenoide es igual a la suma vectorial de los campos de 300 vueltas, las direcciones individuales del campo magnético son aproximadamente iguales.

Ejercicio de refuerzo. Si la corriente se redujera a 1.0 A, y el solenoide se acortara a 0.10 m, ¿cuántas vueltas se necesitarían para crear el mismo campo magnético?



▲ **FIGURA 5.26** Interacción mutua entre conductores paralelos con corriente eléctrica a) Dos conductores paralelos llevan corriente en la misma dirección. b) El conductor 1 forma un campo magnético por donde pasa el conductor 2. c) El conductor 2 es atraído hacia el alambre 1 por una fuerza. (Para más detalles, véase el Ejemplo integrado 5.8.)

En el siguiente Ejemplo integrado intervienen los aspectos del electromagnetismo: fuerzas sobre corrientes eléctricas y la producción de campos magnéticos por corrientes eléctricas. Estúdielo, en especial el uso de la regla de la mano derecha.

Ejemplo integrado 5.8 ■ Atracción o repulsión: fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Dos conductores largos y paralelos tienen corrientes en la misma dirección, como se ilustra en la figura 19.26a. a) La fuerza magnética entre esos conductores ¿es de 1) atracción o 2) de repulsión? Realice un esquema que muestre cómo llegó al resultado. b) Si por cada conductor pasa una corriente de 5.0 A, si tienen longitudes de 50 cm y la distancia entre ellos es de 3.0 mm, calcule la magnitud de la fuerza sobre cada conductor.

a) Razonamiento conceptual. Se elige un conductor y se determina la dirección del campo magnético que produce en el otro conductor. En la figura 5.26b se eligió el conductor 1. El campo que produce la corriente en el conductor 1 es el campo en el que se coloca el conductor 2. Se aplica la regla de la mano derecha en el conductor 2 y se determina la dirección de la fuerza sobre éste. El resultado (figura 5.26c) es una fuerza de atracción, por lo que la respuesta 1 es la correcta. Demuestre que el conductor 2 ejerce una fuerza de atracción sobre el conductor 1, según la tercera ley de Newton.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Para calcular la intensidad del campo magnético producido por el conductor 1, se usará la ecuación 5.12. Como el campo magnético forma ángulo recto con la corriente en el conductor 2, la magnitud de la fuerza sobre ese conductor es ILB . Los símbolos aparecen en la figura 5.26. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI.

Dado: $I_1 = I_2 = 5.0 \text{ A}$ **Encuentre:** F (la magnitud de la fuerza entre los conductores)
 $d = 3.0 \text{ mm} = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $L = 50 \text{ cm} = 5.0 \times 10^{-1} \text{ m}$

El campo magnético que se debe a I_1 en el conductor 2 es

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(5.0 \text{ A})}{2\pi(3.0 \times 10^{-3} \text{ m})} = 3.3 \times 10^{-4} \text{ T}$$

La magnitud de la fuerza magnética sobre el conductor 2 es

$$F_2 = I_2 L B_1 = (5.0 \text{ A})(0.50 \text{ m})(3.3 \times 10^{-4} \text{ T}) = 8.3 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Ejercicio de refuerzo. a) En este ejemplo, determine la dirección de la fuerza, si se invierte la dirección de la corriente en cualquiera de los dos. b) Si la magnitud de la fuerza entre los conductores permanece igual que en este ejemplo, pero se triplica la corriente, ¿qué tan separados están los conductores?

La fuerza magnética entre conductores paralelos dispuestos como en la configuración analizada en el Ejemplo integrado 5.8 constituye la base para definir al ampere. El National Institute of Standards and Technology (NIST) define al ampere como

la corriente que, si se mantiene en cada uno de dos conductores largos y paralelos separados por una distancia de 1 m en el espacio libre, produce una fuerza magnética entre ellos exactamente igual a 2×10^{-7} N por cada metro de conductor.

5.7 Materiales magnéticos

OBJETIVOS: a) Explicar cómo es que los materiales ferromagnéticos aumentan los campos magnéticos externos, b) comprender el concepto de permeabilidad magnética de un material, c) explicar cómo se producen los imanes “permanentes” y d) explicar cómo se puede destruir el magnetismo “permanente”.

¿Por qué algunos materiales son magnéticos o se magnetizan con facilidad? ¿Cómo puede un imán recto crear un campo magnético, si no conduce corriente eléctrica en forma obvia? Se sabe que se necesita una corriente para producir un campo magnético. Si se comparan los campos magnéticos de un imán recto y de un solenoide largo (véase las figuras 5.1 y 5.25), parece que el campo magnético del imán recto se debe a corrientes *internas*. Quizá estas corrientes “invisibles” se deban a los electrones en órbita en torno a los núcleos atómicos, o por el espín de los electrones. Sin embargo, un análisis detallado de la estructura atómica demuestra que el campo magnético neto producido por los movimientos orbitales es cero, o muy pequeño.

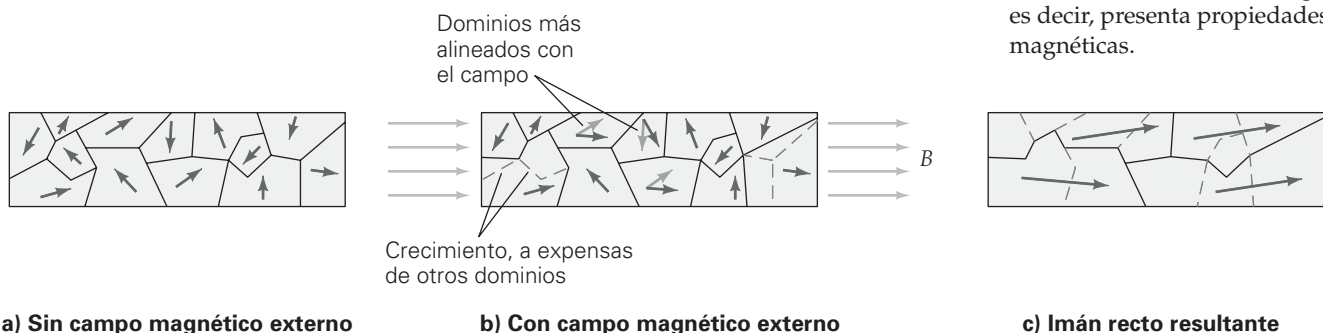
¿Cuál es la fuente del magnetismo producido por los materiales magnéticos? La teoría cuántica moderna dice que el magnetismo del tipo permanente, como el que presenta un imán recto de hierro, se produce por el *espín del electrón*. En la física clásica se compara un electrón con espín, con la Tierra que gira en torno a su eje. Sin embargo, esta analogía mecánica *no* es en realidad ilustrativa. El espín del electrón es un efecto mecánico cuántico, sin una analogía clásica directa. No obstante, la imagen de que los electrones giratorios crean campos magnéticos es útil para la deducción y el razonamiento cualitativos. Cada electrón “giratorio” produce un campo similar al de una espira de corriente (figura 5.24c). Esta figura, que se parece a la de un pequeño imán recto, nos permite considerar a los electrones como agujas de brújulas diminutas.

En los átomos con varios electrones, éstos se arreglan *normalmente* por pares, con sus espines alineados en forma opuesta (un “espín hacia arriba” y un “espín hacia abajo”, en lenguaje químico). Sus campos magnéticos se anulan entre sí, y el material no puede ser magnético. Uno de esos materiales es el aluminio.

Sin embargo, en los **materiales ferromagnéticos**, los campos que se deben a los espines de los electrones en los átomos individuales no se anulan. Por consiguiente, cada átomo tiene un momento magnético. Hay una fuerte interacción entre esos momentos contiguos, que conduce a la formación de regiones llamadas **dominios magnéticos**. En un dominio dado, muchos de los espines electrónicos están alineados en la misma dirección, y se produce un campo magnético (neto) relativamente fuerte. No hay muchos materiales ferromagnéticos en la naturaleza. Los más comunes son el hierro, el níquel y el cobalto. El gadolinio y algunas aleaciones manufacturadas —como el neodimio y otras raras aleaciones— también son ferromagnéticos.

En un material ferromagnético no magnetizado, los dominios tienen orientación aleatoria, y no hay magnetización neta (▼figura 5.27a). Pero cuando se pone un mate-

▼ **FIGURA 5.27** Dominios magnéticos a) Cuando no hay campo magnético externo, los dominios magnéticos de un material ferromagnético se orientan al azar, y el material no se magnetiza. b) En un campo magnético externo, los dominios con orientación paralela al campo crecen a expensas de otros, y las orientaciones de algunos dominios pueden alinearse más con el campo. c) Como resultado, el material se magnetiza, es decir, presenta propiedades magnéticas.



a) Sin campo magnético externo

b) Con campo magnético externo

c) Imán recto resultante

A FONDO 5.1 LA FUERZA MAGNÉTICA EN LA MEDICINA DEL FUTURO

Desde tiempos ancestrales, los humanos han buscado el poder curativo en el magnetismo. Con frecuencia se afirma de que el magnetismo reduce las inflamaciones, elimina problemas en las articulaciones y cura el cáncer, pero ninguna se ha podido sustentar teóricamente. Sin embargo, existen diversas aplicaciones del magnetismo en la medicina moderna, como el sistema de imágenes por resonancia magnética (MRI).

Ciertos tipos de bacterias son capaces de crear minúsculos imanes permanentes en su interior (véase la sección A fondo 5.2, sobre el magnetismo en la naturaleza). Los científicos han propuesto cultivar estos diminutos imanes, que son tan pequeños como para pasar a través de una aguja hipodérmica. Estos imanes podrían unirse a moléculas de medicamentos. Al colocar un campo magnético cerca del sitio de interés, las moléculas serían atraídas y permanecerían ahí. Mantener a las moléculas de un medicamento en el lugar adecuado aumentaría su efectividad y reduciría los efectos colaterales que se presentan cuando los medicamentos circulan por otras partes del cuerpo.

Un problema que entraña esta propuesta es la necesidad de desarrollar técnicas para extraer los diminutos imanes bacteriales y producirlos en grandes cantidades. Algunas propuestas alternativas incluyen crear minúsculas piezas no magnetizadas de hierro por medios químicos, unirlas a las moléculas de los medicamentos y hacer que se muevan alrededor de campos magnéticos en una versión microscópica de limaduras de hierro. Ambas propuestas implican riesgos, como el hecho de que las moléculas de los medicamentos se atraigan entre sí formando grumos, que bloquearían el flujo sanguíneo.

Tal vez, en lugar de ello, microesferas magnéticas podrían llenarse con medicamentos o material radiactivo y dirigirse al lugar preciso manteniéndolas ahí mediante campos magnéticos.

Una aplicación sería en el tratamiento de las úlceras que sufren los diabéticos, comúnmente en los pies; se trata de lesiones difíciles de sanar. La herida se cubriría con imanes delgados, pero fuertes, con la ayuda de una venda. Luego, se aplicaría una inyección de microesferas llenas con medicamentos de lenta liberación, como un antibiótico. Los imanes atraerían a las microesferas hacia el lugar preciso de la úlcera y las mantendrían ahí. Conforme las microesferas se rompan en el curso de varias semanas, liberarían los medicamentos lentamente, ayudando al cuerpo a sanar la herida. Microesferas llenas con material radiactivo podrían ayudar en el tratamiento de tumores en el hígado, pulmones, cerebro y en algunos otros órganos.

Otra terapia experimental utiliza calor inducido magnéticamente (técnicas *hipertérmicas*) para tratar el cáncer de seno. Esta terapia sería especialmente importante para destruir los pequeños tumores que ahora se localizan fácilmente con técnicas modernas que generan imágenes del cuerpo. Para estos tumores, se inyectaría magnetita fluida (Fe_3O_4) directamente en el tumor. En los tumores mayores que unos cuantos milímetros cúbicos, las partículas de hierro se distribuirían a través del sistema circulatorio luego de unirse a biomoléculas que se dirigen a las células cancerígenas.

En presencia de un campo magnético externo, las partículas de hierro se calentarían gracias a corrientes inducidas (véase el capítulo 6 sobre inducción electromagnética). Un aumento en la temperatura de unos cuantos grados Celsius por encima de la temperatura normal del cuerpo puede matar células cancerígenas. En teoría, este calentamiento ocurriría sólo en los tumores y sería una técnica poco invasiva. Experimentos iniciales han dado resultados positivos, de manera que el panorama es alentador.

rial ferromagnético (como un imán recto de hierro) en un campo magnético externo, los dominios cambian su orientación y tamaño (figura 5.27b). Recuerde la imagen del electrón como una pequeña brújula; los electrones comienzan a “alinearse” en un campo magnético externo. Conforme el campo externo y la barra de hierro comienzan a interactuar, el hierro presenta los dos efectos siguientes:

1. Los contornos de los dominios cambian, y los dominios con orientaciones magnéticas en dirección del campo externo crecen a expensas de los demás.
2. La orientación magnética de algunos dominios puede cambiar un poco, para alinearse más con el campo.

Al remover los campos externos, los dominios de hierro permanecen más o menos alineados en la dirección del campo externo original, creando así su propio campo magnético general “permanente”.

Ahora también comprenderá por qué una pieza de hierro no imanada es atraída hacia un imán, y por qué las limaduras de hierro se alinean con un campo magnético. En esencia, las piezas de hierro se transforman en imanes inducidos (figura 5.27c). Algunos usos de los imanes permanentes y de las fuerzas magnéticas en la medicina moderna se describen en la sección A fondo 5.1, en esta página.

Electroimanes y permeabilidad magnética

Los materiales ferromagnéticos se usan para fabricar electroimanes, casi siempre devanando un alambre de acero en torno a un núcleo de hierro (►figura 5.28a). La corriente en la bobina crea un campo magnético en el hierro, que a su vez crea su propio campo, que, por lo general, es muchas veces mayor que el de la bobina. Si se conecta y desconecta la corriente, se puede activar y desactivar el campo magnético a voluntad. Cuando la corriente está conectada, induce magnetismo en los materiales ferromagnéticos (como en el caso de los trozos de hierro de la figura 5.28b) y, si las fuerzas son suficientemente intensas, puede utilizarse para cargar grandes cantidades de chatarra (figura 5.28c).

El hierro que se usa en un electroimán se llama *hierro suave*. Cuando se le elimina un campo externo, los dominios magnéticos se desalinean y el hierro se desmagnetiza. El adjetivo “suave” se refiere a sus propiedades magnéticas. Cuando un electroimán está encendido (dibujo inferior de la figura 5.28a), el núcleo de hierro se magnetiza y contribuye al campo del solenoide. El campo total se expresa como sigue:

$$B = \frac{\mu NI}{L} \quad \text{campo magnético en el centro de un solenoide con núcleo de hierro} \quad (5.15)$$

Observe que esta ecuación es idéntica a la del campo magnético de un solenoide con núcleo de aire (ecuación 5.14), excepto porque contiene μ en lugar de μ_0 . Aquí, μ representa la **permeabilidad magnética** del *material del núcleo*, y no el espacio libre. El papel que juega la permeabilidad en el magnetismo es similar al de la permisividad ϵ en electricidad (capítulo 2). Para los materiales magnéticos, la permeabilidad magnética se define en función de su valor en el espacio libre; es decir,

$$\mu = \kappa_m \mu_0 \quad (5.16)$$

donde κ_m es la permeabilidad *relativa* (adimensional), y es el análogo magnético de la constante dieléctrica κ .

El valor de κ_m para el vacío es igual a la unidad. Como para los materiales ferromagnéticos, el campo magnético total es mayor que el de un alambre enrollado, se deduce que $\mu \gg \mu_0$ y que $\kappa_m \gg 1$. Un núcleo de un material ferromagnético con una gran permeabilidad, en un electroimán, aumenta ese campo miles de veces, en comparación con un núcleo de aire. Los materiales ferromagnéticos tienen valores de κ_m del orden de los miles.

Ejemplo 5.9 ■ Ventaja magnética: uso de materiales ferromagnéticos

Un solenoide de laboratorio con 200 vueltas en una longitud de 30 cm está limitado a conducir una corriente máxima de 2.0 A. Los científicos necesitan un campo magnético interno cuya intensidad sea, por lo menos, de 2.0 T y están debatiendo acerca de si necesitan emplear un núcleo ferromagnético. *a)* ¿Es posible ese campo si ningún material llena el núcleo? *b)* Si no, determine la permeabilidad magnética mínima del material ferromagnético que podría formar el núcleo.

Razonamiento. El campo B depende del número de vueltas (N), de la longitud del solenoide (L), de la corriente (I) y de la permeabilidad del material del núcleo (μ). Ésta es una aplicación directa de las ecuaciones 5.14 y 5.15.

Solución.

Dado: $I_{\text{máx}} = 2.0 \text{ A}$ **Encuentre:** *a)* ¿Es posible $B = 2.0 \text{ T}$ sin material en el núcleo?
 $N = 200$ vueltas *b)* La permeabilidad magnética requerida para que $B = 2.0 \text{ T}$
 $L = 0.30 \text{ m}$

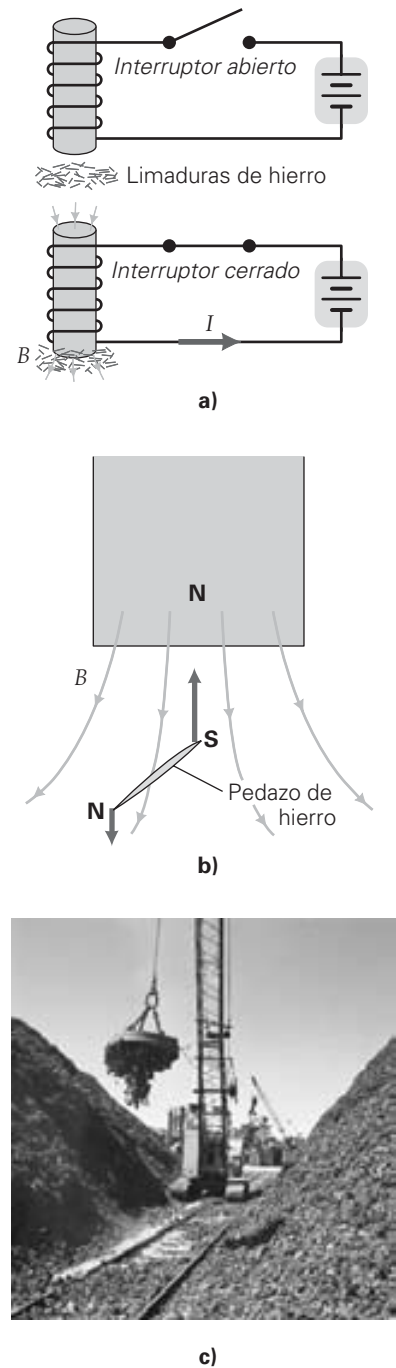
a) De acuerdo con la ecuación 5.14, sin ningún material en el núcleo, es evidente que el campo interno no sería suficientemente grande.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(200)(2.0 \text{ A})}{0.30 \text{ m}} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ T} = 1.7 \text{ mT}$$

b) El campo que se requiere es de $2.0 \text{ T}/1.7 \times 10^{-3} \text{ T}$ o unas 1200 veces más fuerte que la respuesta al inciso *a*. Por lo tanto, como $B \propto \mu$ si todo lo demás permanece constante, para alcanzar un valor de 2.0 T se requiere una permeabilidad $\mu \geq 1200 \mu_0$ o $\mu \geq 1.5 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si los científicos encontraran una forma para que el solenoide pudiera conducir 5.0 A, ¿cuál sería la nueva permeabilidad requerida?

Según la ecuación 5.15, la intensidad del campo magnético de un electroimán depende de la corriente en los conductores. Las corrientes grandes producen campos grandes, pero esa generación de campos va acompañada de un calentamiento joule (pérdidas I^2R) mayor en los conductores; por eso, se requieren tubos de enfriamiento de agua. El problema se puede reducir usando alambres superconductores, porque tienen resistencia cero y, no tiene calentamiento joule. Para uso comercial, los imanes superconductores todavía no son prácticos, por la gran cantidad de energía que se requiere para enfriar y mantener los conductores en su estado superconductor, a bajas temperaturas. Si algún día se encuentran superconductores que funcionen a temperaturas cercanas a la tempe-



▲ **FIGURA 5.28** Electroimán *a)* (arriba) Cuando no hay corriente en el circuito, no hay fuerza magnética. (*abajo*) Sin embargo, cuando pasa corriente por la bobina, hay un campo magnético y el núcleo de hierro se magnetiza. *b)* Detalle del extremo inferior del electroimán del inciso *a*. El pedazo de hierro es atraído hacia el extremo del electroimán. *c)* Un electroimán levantando chatarra

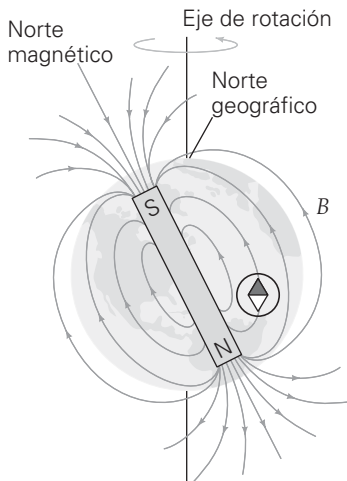
ratura ambiente, los campos magnéticos de elevada intensidad serán comunes en muchos aparatos y aplicaciones.

La clase de hierro que retiene algo de su magnetismo después de haber estado en un campo magnético externo se llama *hierro duro*, y se usa para fabricar imanes permanentes. Seguramente habrá notado que un sujetapapeles o la hoja de un destornillador se magnetizan después de estar cerca de un imán. Los imanes permanentes se producen calentando en un horno piezas de un material ferromagnético y dejándolas enfriar dentro de un campo magnético intenso. En los imanes permanentes, los dominios *no* se desalinean cuando se elimina el campo magnético externo.

Un imán *permanente* no siempre es permanente, porque se puede destruir su magnetismo. Si se golpea con un objeto duro, o se deja caer al piso, se puede perder parte o todo el alineamiento de los dominios y así se reduce o elimina el campo magnético general del imán. Con el calentamiento también se pierde el magnetismo, porque provoca un aumento en los movimientos aleatorios (térmicos) de los átomos y tiende a perturbar el alineamiento de los dominios. Al dejar una cinta magnética de audio o de video sobre el tablero de instrumentos de un automóvil en un día caluroso, el movimiento térmico causado por el calor destruye parcialmente la señal magnética de audio o de video. Arriba de cierta temperatura crítica, llamada **temperatura de Curie** (o temperatura de transición magnética), se destruye el acoplamiento entre los dominios a causa de las mayores oscilaciones térmicas, y un material ferromagnético pierde su ferromagnetismo. El físico francés Pierre Curie (1859-1906), esposo de Marie Curie, descubrió este efecto. La temperatura de Curie del hierro es de 770 °C.

El alineamiento de los dominios ferromagnéticos desempeña un papel importante en la geología y la geofísica. Se sabe que, cuando se enfrían, los flujos de lava de los volcanes, que inicialmente contienen hierro arriba de su temperatura de Curie, retienen algo de su magnetismo como cuando la lava se enfriaba por debajo de la temperatura de Curie y se endurecía. Al medir la intensidad y la orientación del campo en estas antiguas corrientes de lava, en diversos lugares del mundo, los geofísicos han podido registrar los cambios en el campo magnético terrestre y en su polaridad, a través del tiempo.

Algunas de las primeras pruebas en que se apoya el estudio del movimiento tectónico se debieron a mediciones de la dirección de la polaridad magnética de muestras del lecho marino que contienen hierro.* Por ejemplo, el lecho marino cercano a la Cordillera Central Atlántica está formado por flujos de lava de volcanes submarinos. Se encontró que esas corrientes solidificadas tienen magnetismo permanente, pero que la polaridad varía con el tiempo conforme ha cambiado la polaridad magnética de la Tierra.



▲ **FIGURA 5.29** El campo geomagnético El campo magnético terrestre se parece al de un imán recto. Sin embargo, no podría existir un imán recto sólido dentro de la Tierra, por las altas temperaturas que se registran allí. Se cree que el campo magnético terrestre está relacionado con movimientos del núcleo externo líquido, a gran profundidad en el planeta.

*5.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre

OBJETIVOS: a) Presentar las características generales del campo magnético terrestre b) explicar algunas teorías acerca de sus posible causas y c) describir las formas en las que el campo magnético terrestre afecta el ambiente local de nuestro planeta.

El campo magnético de la Tierra se usó durante siglos, antes de que las personas tuvieran idea alguna sobre su origen. En la antigüedad, los navegantes usaron piedras imán, o agujas magnetizadas, para ubicar el norte. Algunas otras formas de vida, incluyendo ciertas bacterias y palomas mensajeras, también usan el campo magnético terrestre para navegar. (Véase la sección A fondo 5.2, sobre el magnetismo en la naturaleza.)

Sir William Gilbert, un científico inglés, estudió por primera vez el magnetismo alrededor del año 1600. Al investigar el campo magnético de una *piedra imán* de forma esférica, cortada especialmente para simular a la Tierra, concluyó que la Tierra funciona como un imán. Gilbert pensó que un gran cuerpo de material magnetizado permanentemente, en el interior de la Tierra, producía el campo magnético de ésta.

El campo magnético terrestre externo o *campo geomagnético* como se le llama, sí tiene una configuración parecida a la que produciría un imán recto gigantesco con su polo sur apuntando al norte (◀ figura 5.29). La magnitud del componente horizontal del campo magnético terrestre en el ecuador magnético es de 10^{-5} T (0.4 G), y la del com-

*La capa sólida más externa de la corteza terrestre está formada por secciones o "placas", que están en movimiento constante: una velocidad normal es de un centímetro por año. En algunas de sus intersecciones, por ejemplo, la zona donde la placa del Pacífico se encuentra con la costa de Alaska, las placas chocan y originan volcanes y sismos. En otras intersecciones, como en la Cordillera Central del Atlántico, las placas se alejan entre sí, y sale material nuevo del interior de la Tierra en forma de lava caliente.

A FONDO 5.2 EL MAGNETISMO EN LA NATURALEZA

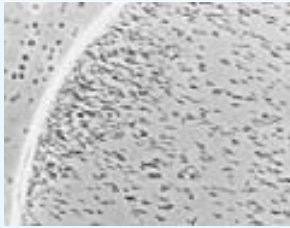


FIGURA 1 Migración de bacterias magnetotácticas
Las bacterias en una gota de agua lodosa, vistas al microscopio, se alinean en dirección del campo magnético aplicado (el norte hacia la izquierda) y se acumulan en el borde. Cuando se invierte el campo, también se invierte la dirección de migración.

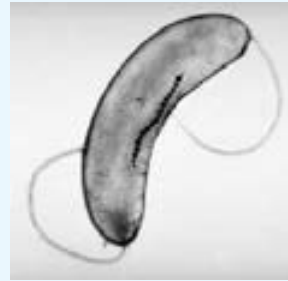


FIGURA 2 Una bacteria magnetotáctica elíptica
Micrografía electrónica de una bacteria magnetotáctica de agua dulce. Se observan con claridad dos apéndices como látigos, o flagelos, junto con una cadena de partículas de magnetita.

Durante siglos, los seres humanos confiaron en las brújulas para obtener información sobre el rumbo que querían seguir (figura 5.29). Investigaciones recientes indican que algunos organismos parecen tener sus propios sensores direccionales incorporados. Por ejemplo, se sabe que algunas especies de bacterias son *magnetotácticas*, es decir, sienten la presencia y la dirección del campo magnético terrestre.

En la década de 1980, se hicieron experimentos con bacterias que comúnmente se encuentran en lodazales, pantanos o estanques.* En un campo magnético en el laboratorio, cuando se observaba al microscopio una gota de agua lodosa, había una especie de bacterias que siempre migraban en dirección del campo (figura 1), de la misma forma como lo hacen en su ambiente natural, con el campo de la Tierra. Además, cuando esas bacterias morían y ya no podían migrar, mantenían su alineamiento con el campo magnético, incluso cuando éste cambiaba su dirección. Se concluyó que los miembros de esta especie funcionan como dipolos magnéticos o brújulas biológicas. Una vez alineadas con el campo, emigran a lo largo de líneas de campo magnético, tan sólo moviendo sus *flagelos* (apéndices con forma de látigo), como se observa en la figura 2.

¿Qué es lo que hace que estas bacterias sean brújulas vivientes? Aun entre las especies magnetotácticas conocidas, las "nuevas" bacterias (formadas por división celular) carecen en principio de este sentido magnetotáctico. Sin embargo, si viven en una solución que contenga una mínima concentración de hierro, son capaces de sintetizar una cadena de diminutas par-

tículas magnéticas (figura 2). Es raro, pero esas brújulas internas tienen la misma composición química que los antiguos trozos del mineral que usaban los marinos antiguos, y que se encuentra en la naturaleza: la magnetita (símbolo químico Fe_3O_4). Las partículas individuales en la cadena miden aproximadamente 50 nm transversales, y la cadena de una bacteria madura contiene, por lo general, unas 20 de esas partículas, cada una de las cuales es un dominio magnético independiente.

En esencia, las bacterias se dirigen pasivamente de acuerdo con sus brújulas internas. Pero, ¿por qué tiene importancia biológica que esas bacterias sigan la dirección del campo magnético terrestre? Se encontró una pieza importante de este rompecabezas cuando los investigadores estudiaban la misma especie en aguas del hemisferio sur. Esas bacterias emigran en sentido *contrario* a la dirección del campo terrestre, a diferencia de sus contrapartes en el hemisferio norte. Recuerde que en el hemisferio norte, el campo terrestre se inclina hacia abajo, y que sucede lo contrario en el hemisferio sur. Este descubrimiento condujo a los investigadores a creer que las bacterias usan la dirección del campo para sobrevivir. Como para ellas el oxígeno es tóxico, es más probable que sobrevivan en profundidades lodosas y ricas en nutrientes, y el campo magnético terrestre les indica la dirección (figura 3). Su sentido de orientación también les ayuda cerca del ecuador. Allí, el campo no las dirige hacia abajo, sino que las mantiene a una profundidad constante, con lo que evitan una migración hacia arriba, hacia las mortales aguas superficiales ricas en oxígeno.

No sólo se han encontrado pruebas de navegación con el campo magnético en las bacterias, sino también en organismos tan diversos como abejas, mariposas, palomas mensajeras y delfines.

* Véase, por ejemplo, R. P. Blakemore y R. B. Frankel, "Magnetic Navigation in Bacteria", *Scientific American*, diciembre de 1981. Agradecemos al profesor Frankel varias descripciones interesantes acerca de este tema.

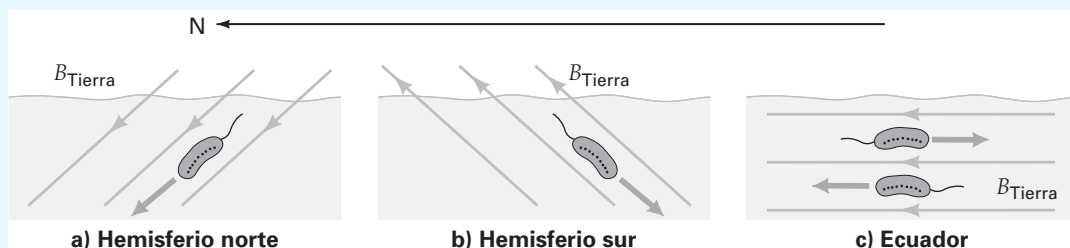


FIGURA 3 ¿Supervivencia del más apto? a) En el hemisferio norte, donde el campo magnético terrestre se inclina hacia abajo, las bacterias magnetotácticas siguen el campo para llegar a profundidades ricas en oxígeno. **b)** En el hemisferio sur, el campo geomagnético está inclinado hacia arriba, pero las bacterias emigran en dirección opuesta al campo, por lo que permanecen en aguas profundas, como sus parientes del hemisferio norte. **c)** Cerca del ecuador, las bacterias se mueven en dirección paralela a la superficie del agua, y se mantienen así alejadas de las aguas poco profundas, ricas en oxígeno y, por consiguiente, tóxicas.

ponente vertical en los polos geomagnéticos es de 10^{-4} T (aproximadamente 1 G). Se ha calculado que para que un material ferromagnético con magnetización máxima produzca ese campo, tendría que ocupar aproximadamente el 0.01% del volumen de la Tierra.

La idea de un imán ferromagnético de este tamaño dentro de la Tierra quizá no parezca irracional al principio, pero no es un modelo correcto. La temperatura interior de la Tierra está muy por arriba de las temperaturas de Curie del hierro y el níquel, que, al parecer, son los materiales ferromagnéticos más abundantes en el interior de la Tierra. Por ejemplo, para el hierro, la temperatura de Curie se alcanza a una profundidad de tan sólo 100 km con respecto a la superficie terrestre. La temperatura es incluso más elevada a mayores profundidades. Por consiguiente, no es posible la existencia de un imán permanente interno.

El conocimiento de que una corriente eléctrica produce un campo magnético ha hecho que los científicos especulen que el campo magnético terrestre está asociado con movimientos en el núcleo externo líquido, que, a su vez, podrían estar vinculados de alguna forma con la rotación de la Tierra. Se sabe que Júpiter, un planeta que es principalmente gaseoso y gira con mucha rapidez, tiene un campo magnético mucho mayor que el de la Tierra. Mercurio y Venus tienen campos magnéticos muy débiles; esos planetas se parecen más a la Tierra y giran con relativa lentitud.

Se han propuesto varios modelos teóricos para explicar el origen del campo magnético terrestre. Por ejemplo, se ha sugerido que éste se debe a corrientes asociadas con ciclos de convección térmica en el núcleo externo líquido, causados por el núcleo interno caliente. Pero todavía no se aclaran los detalles de este mecanismo.

Se sabe que el eje del campo magnético terrestre *no* coincide con el eje de rotación del planeta, que es el que define los polos geográficos. Por consiguiente, el polo magnético (sur) de la Tierra y el Polo Norte geográfico no coinciden (véase la figura 5.29). El polo magnético queda a miles de kilómetros al sur del Polo Norte geográfico (el norte verdadero). El polo norte magnético de la Tierra está todavía más desplazado con respecto a su polo sur geográfico, lo que significa que el eje magnético ni siquiera pasa por el centro de la Tierra.

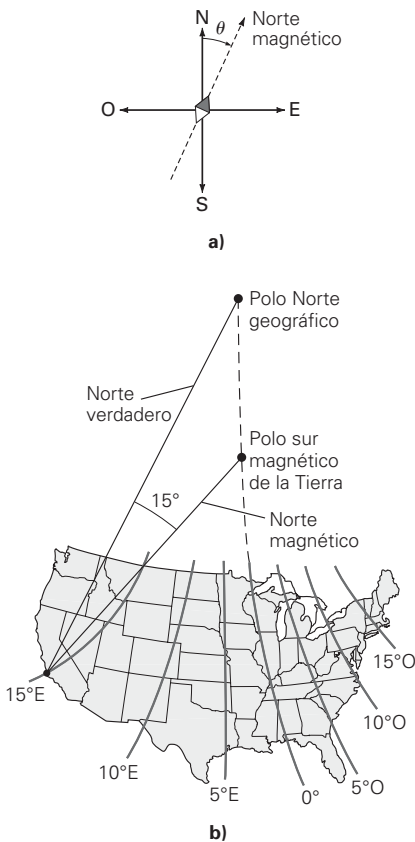
Una brújula indica la dirección del *norte magnético*, y no del norte “verdadero” o geográfico. La diferencia angular entre esas dos direcciones se llama *declinación magnética* (véase la figura 5.30). La declinación magnética varía para distintos lugares. Como se podrá imaginar, el conocimiento de las variaciones de declinación magnética tiene especial importancia en la navegación precisa de aviones y barcos. Más recientemente, con la aparición de los sistemas de posicionamiento global (GPS), que son muy precisos, los viajeros ya no dependen de las brújulas tanto como antes.

El campo magnético terrestre también presenta una diversidad de fluctuaciones a través del tiempo. Como se explicó antes, el magnetismo permanente creado en rocas ricas en hierro, al enfriarse en el campo magnético terrestre, nos ha dado muchas evidencias de esas fluctuaciones a través de periodos prolongados. Por ejemplo, los polos magnéticos terrestres han intercambiado polaridad en diversas épocas del pasado; la última vez que sucedió esto fue hace unos 700 000 años. Durante un periodo de polaridad invertida, el polo sur magnético queda cerca del polo sur geográfico, lo contrario a la polaridad actual. El mecanismo por el que se realiza esta inversión de polaridad aún no está claro del todo y los científicos están en proceso de investigarlo.

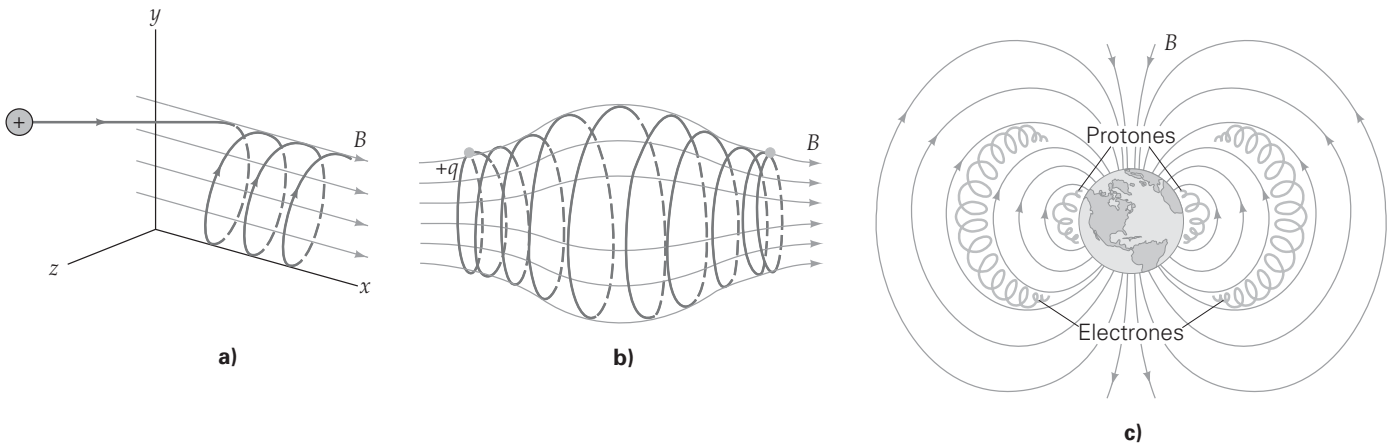
En escala de tiempos más cortos, los polos magnéticos también tienden a “deambular”, es decir, a cambiar de lugar. Por ejemplo, el polo sur magnético (cerca del polo norte geográfico) se ha movido en fecha reciente aproximadamente 1° de latitud (unos 110 km o 70 mi) por década. Por alguna razón desconocida se ha movido hacia el norte en forma consistente, a partir de su latitud de 69°N en 1904, y también hacia el oeste, cruzando el meridiano 100°O . Esa deriva polar de largo plazo indica que el mapa de declinación magnética (figura 5.30b) varía a través del tiempo, y se debe actualizar en forma periódica.

En escalas de tiempo todavía más cortas, a veces hay corrimientos diarios hasta de 80 km (50 mi), seguidos por un regreso a la posición inicial. Se cree que esos corrimientos son causados por partículas cargadas que proceden del Sol y que llegan a la atmósfera superior de la Tierra formando corrientes que cambian el campo magnético general del planeta.

Las partículas cargadas que proceden del Sol y entran al campo magnético terrestre dan lugar a otros fenómenos. Una partícula cargada que entra en dirección *no* perpendicular a un campo magnético, describe una espiral en forma de hélice (véase la figura 5.31a). Esto se debe a que el componente de la velocidad de la partícula, que es para-



▲ **FIGURA 5.30** Declinación magnética *a)* La diferencia angular entre el norte magnético y el norte “verdadero” o geográfico se llama declinación magnética. *b)* La declinación magnética varía según el lugar y el tiempo. El mapa muestra las líneas *isogónicas* (líneas con la misma declinación magnética) para la zona continental de Estados Unidos. Para lugares sobre la línea de 0° , el norte magnético está en la misma dirección que el norte verdadero (o geográfico). A los lados de esa línea, una brújula tiene una inclinación hacia el este o hacia el oeste. Por ejemplo, sobre una línea de 15°E , una brújula tiene una declinación de 15° hacia el este. (El norte magnético se encuentra 15° al este del norte verdadero.)



▲ FIGURA 5.31 Confinamiento magnético *a)* Una partícula cargada que entra a un campo magnético uniforme, formando un ángulo distinto a 90°, describe una trayectoria en espiral. *b)* En un campo magnético no uniforme y convexo, las partículas van y vienen en espiral, como si estuvieran confinadas en una botella magnética. *c)* Las partículas cargadas quedan atrapadas en el campo magnético terrestre, y las regiones donde se concentran se llaman cinturones de Van Allen.

lelo al campo, no cambia. (Recuerde que un campo magnético sólo actúa a lo largo del componente perpendicular de la velocidad.) Los movimientos de las partículas cargadas en un campo no uniforme son bastante complicados. Sin embargo, para un campo convexo como el que se ve en la figura 5.31b, las partículas van y vienen en espiral, como si estuvieran dentro de una “botella magnética”.

Un fenómeno análogo sucede en el campo magnético terrestre, dando lugar a regiones con concentraciones altas de partículas cargadas. Hay dos regiones en forma de dona, a varios miles de kilómetros de altitud, llamadas *cinturones de radiación de Van Allen* (figura 5.31c). En el cinturón de Van Allen inferior se producen emisiones luminosas llamadas *auroras*: la aurora boreal o luces del norte, en el hemisferio norte, y la aurora austral o luces del sur, en el hemisferio sur. Esas luces fantásticas y fluctuantes se observan con más frecuencia en las regiones polares de la Tierra, pero se han visto en zonas de menor latitud (►figura 5.32).

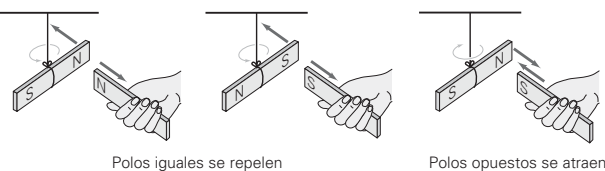
Una aurora se forma cuando las partículas solares cargadas quedan atrapadas en el campo magnético de la Tierra. Se ha observado que la actividad máxima de la aurora ocurre después de una alteración solar, como las llamaradas solares, que son tormentas magnéticas violentas en el Sol que expelen grandes cantidades de partículas cargadas. Atrapadas en el campo magnético de la Tierra, estas partículas cargadas son guiadas hacia las regiones polares, donde excitan o ionizan los átomos de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera. Cuando las moléculas excitadas retornan a su estado normal y los iones vuelven a tener su número normal de electrones, hay emisiones de luz, y la aurora brilla.



▲ FIGURA 5.32 Aurora boreal: las luces del norte Esta imagen espectacular se debe a partículas solares energéticas que quedan atrapadas en el campo magnético terrestre. Las partículas excitan, o ionizan, los átomos del aire; cuando estos últimos dejan de estar excitados (o cuando se recombinan), emiten luz. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Repaso del capítulo

- La **ley de fuerza polar**, o **ley de los polos**, establece que los polos magnéticos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen.



Polos iguales se repelen

Polos opuestos se atraen

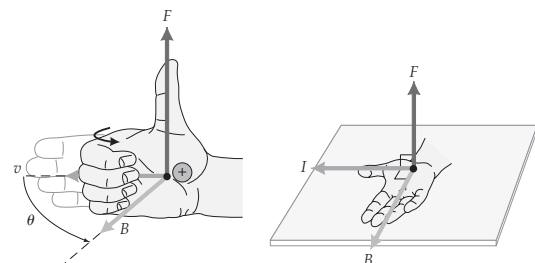
- El **campo magnético** (\vec{B}) se expresa en unidades SI de **tesla** (**T**), y $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$. Los campos magnéticos pueden ejercer fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento y sobre corrientes eléctricas. La fuerza magnética sobre una partícula cargada se expresa por

$$F = qvB \sin \theta \quad (5.3)$$

La magnitud de la fuerza magnética sobre un conductor con corriente se expresa por

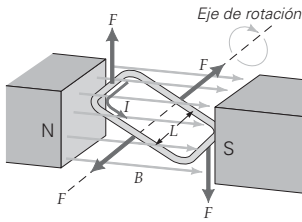
$$F = ILB \sin \theta \quad (5.7)$$

- Para determinar la dirección de una **fuerza magnética** sobre una partícula cargada en movimiento, y sobre conductores con corriente, se usan las **reglas de la mano derecha**.



- Una serie de N espiras circulares con corriente, cada una con una área plana A y por la cual pasa una corriente I , experimenta un **momento de torsión magnético** al colocarse en un campo magnético. La ecuación para calcular la magnitud del momento de torsión sobre una configuración de este tipo es

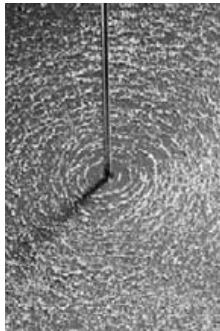
$$\tau = NIAB \sin \theta \quad (5.9)$$



- La magnitud del **campo magnético** producido por un conductor largo y recto se determina con

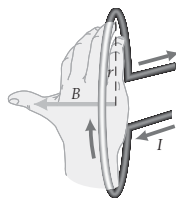
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \quad (5.12)$$

en donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ es la **permeabilidad magnética del espacio libre**. Para conductores largos y rectos, las líneas de campo son círculos cerrados con centro en el conductor.



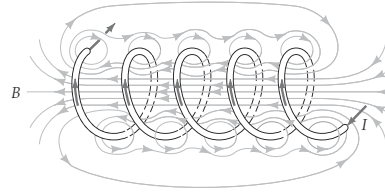
- La magnitud del campo magnético producido en el centro de una serie de N espiras de radio r es

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r} \quad (5.13)$$

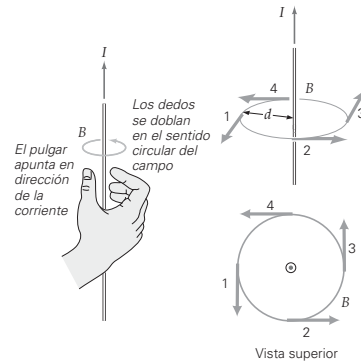


- La magnitud del campo magnético producido cerca del centro en el interior de un **solenoid** con N espiras y longitud L es

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (5.14)$$



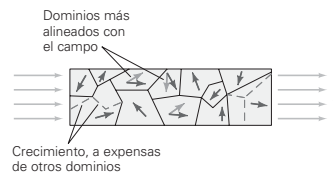
- Para determinar la dirección del campo magnético producido con diversas configuraciones de corriente, se usan las **reglas de la mano derecha**.



- En los **materiales ferromagnéticos** los espines se alinean, creando **dominios**. Cuando se aplica un campo externo, su efecto es aumentar el tamaño de los dominios que ya apuntan en dirección del campo, a expensas de los demás. Cuando se quita el campo magnético externo, queda un **imán permanente**.



a) Sin campo magnético externo



b) Con campo magnético externo



c) Imán recto resultante

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

5.1 Imanes, polos magnéticos y dirección del campo magnético

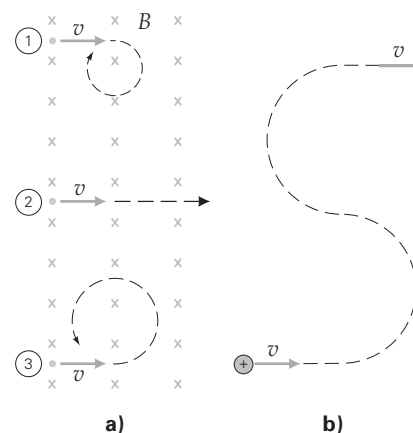
- OM** Cuando los extremos de dos imanes rectos están cercanos entre sí, se atraen. Los extremos deben ser *a*) uno norte y el otro sur, *b*) uno sur y el otro norte, *c*) ambos norte, *d*) ambos sur o *e*) cualquiera de los casos *a* o *b*.

- OM** Una brújula calibrada en el campo magnético de la Tierra se coloca cerca del extremo de un imán recto permanente y apunta alejándose del extremo del imán. Se concluye que este extremo del imán *a*) actúa como un polo magnético norte, *b*) actúa como un polo magnético sur, *c*) no es posible concluir algo acerca de las propiedades magnéticas del imán permanente.

3. **OM** Si se ve directamente hacia abajo sobre el polo sur de un imán recto, el campo magnético apunta *a)* hacia la derecha, *b)* hacia la izquierda, *c)* alejándose del observador o *d)* hacia el observador.
4. **PC** Se tienen dos imanes rectos idénticos, uno de los cuales es permanente y el otro no está magnetizado. ¿Cómo se podría distinguir uno de otro, usando sólo los dos imanes?
5. **PC** La dirección de cualquier campo magnético se toma en la dirección en que apunta una brújula calibrada con la Tierra. Explique por qué esto significa que las líneas de campo magnético deben partir del polo norte de un imán recto permanente y entrar en su polo sur.

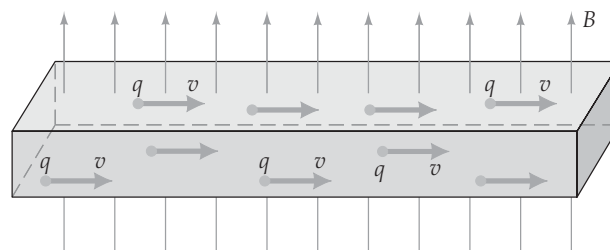
5.2 Intensidad del campo magnético y fuerza magnética

6. **OM** Un protón se mueve verticalmente hacia arriba, en dirección perpendicular a un campo magnético uniforme, y se desvía hacia la derecha mientras usted lo observa. ¿Cuál es la dirección del campo magnético? *a)* Directamente alejándose de usted, *b)* directamente hacia usted, *c)* hacia la derecha o *d)* hacia la izquierda.
7. **OM** Un electrón se mueve horizontalmente hacia el este en un campo magnético uniforme, que es vertical. Se encuentra que se desvía hacia el norte. ¿Cuál es la dirección del campo magnético? *a)* Hacia arriba, *b)* hacia abajo o *c)* no es posible determinar la dirección a partir de los datos.
8. **OM** Si una partícula con carga negativa se moviera hacia abajo, a lo largo del borde derecho de esta página, ¿cómo se debería orientar un campo magnético (perpendicular al plano del papel) para que la partícula se desviara inicialmente hacia la izquierda? *a)* Hacia fuera de la página, *b)* en el plano de la página o *c)* hacia dentro de la página.
9. **OM** Un electrón pasa por un campo magnético sin ser desviado. ¿Qué se concluye acerca del ángulo entre la dirección del campo magnético y la de la velocidad del electrón, suponiendo que no actúan otras fuerzas sobre él? *a)* Podrían estar en la misma dirección, *b)* podrían ser perpendiculares, *c)* podrían ser contrarias o *d)* las opciones *a* y *c* son posibles.
10. **PC** Un protón y un electrón se mueven a la misma velocidad, perpendicularmente a un campo magnético constante. *a)* ¿Cómo se comparan las magnitudes de las fuerzas magnéticas sobre ellos. *b)* ¿Y las magnitudes de sus aceleraciones?
11. **PC** Si una partícula cargada se mueve en línea recta y no hay otras fuerzas, a excepción quizá de un campo magnético, ¿se puede decir con certeza que no hay campo magnético presente? Explique por qué.
12. **PC** Tres partículas entran a un campo magnético uniforme, como se ve en la **figura 5.33a**. Las partículas 1 y 3 tienen velocidades iguales y cargas de igual magnitud. ¿Qué se concluye decir acerca de *a)* las cargas de las partículas y *b)* sus masas?
13. **PC** Se desea desviar una partícula con carga positiva para que su trayectoria sea una "S", como se ve en la **figura 5.33b**, usando sólo campos magnéticos. *a)* Explique cómo se podría lograr esto usando campos magnéticos perpendiculares al plano de la página. *b)* ¿Cómo se compara la magnitud de la velocidad de una partícula que sale del campo, comparada con su velocidad inicial?



▲ **FIGURA 5.33** Cargas en movimiento Véanse los ejercicios 12 y 13.

14. **EI** ● Una carga positiva se mueve horizontalmente hacia la derecha, cruzando esta página, y entra en un campo magnético dirigido verticalmente hacia abajo en el plano de la página. *a)* ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre la carga? 1) Hacia la página, 2) hacia fuera de la página, 3) hacia abajo en el plano de la página o 4) hacia arriba en el plano de la página. Explique por qué. *b)* Si la carga es de 0.25 C , su velocidad es $2.0 \times 10^2\text{ m/s}$, y sobre ella actúa una fuerza de 20 N , ¿cuál es la intensidad del campo magnético?
15. ● Una carga de 0.050 C se mueve verticalmente en un campo de 0.080 T , orientado a 45° con respecto a la vertical. ¿Qué velocidad debe tener la carga para que la fuerza que actúa sobre ella sea de 10 N ?
16. ●● Se puede usar un campo magnético para determinar el signo de los portadores de carga en un conductor con corriente. Se tiene una banda conductora ancha dentro de un campo magnético orientado como se ve en la **figura 5.34**. Los portadores de carga son desviados por la fuerza magnética y se acumulan en un lado de la banda, dando lugar a un voltaje medible a través de ella. (Este fenómeno se conoce como *efecto Hall*.) Si se desconoce el signo de los portadores de carga (que son cargas positivas que se mueven como indican las flechas en la figura, o bien, cargas negativas que se mueven en sentido contrario), ¿cómo se puede determinar el signo de la carga con la polaridad o el signo del voltaje medido? Suponga que sólo un tipo de portador de carga es el causante de la corriente.



▲ **FIGURA 5.34** El efecto Hall Véase el ejercicio 16.

17. ●● Un haz de protones se acelera a una velocidad de $5.0 \times 10^6\text{ m/s}$ en un acelerador de partículas, y sale de éste en dirección horizontal, entrando a un campo magnético uniforme. ¿Qué campo \vec{B} perpendicular a la velocidad del protón anularía la fuerza de gravedad y mantendría al haz moviéndose exactamente en dirección horizontal?

18. **El** ●● Un electrón se mueve en dirección $+x$ dentro de un campo magnético, y sobre él actúa una fuerza magnética en dirección $-y$. *a)* ¿En cuál de las siguientes direcciones podría orientarse el campo magnético? 1) $-x$, 2) $+y$, 3) $+z$ o 4) $-z$. Explique por qué. *b)* Si la velocidad del electrón es 3.0×10^6 m/s y la magnitud de la fuerza es 5.0×10^{-19} N, ¿cuál es la intensidad del campo magnético?
19. ●● Un electrón se mueve a una velocidad de 2.0×10^4 m/s a través de un campo magnético uniforme, cuya magnitud es 1.2×10^{-3} T. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza magnética sobre el electrón, si su velocidad y el campo magnético *a)* son perpendiculares entre sí, *b)* forman un ángulo de 45° , *c)* son paralelos o *d)* son exactamente opuestos?
20. ●● ¿Qué ángulo(s) debe formar la velocidad de una partícula con la dirección del campo magnético para que la partícula esté sometida a la mitad de la fuerza magnética máxima posible?
21. ●●● Un haz de protones se acelera primero en línea recta hacia el este a una velocidad de 3.0×10^5 m/s en un acelerador de partículas. A continuación entra en un campo magnético uniforme de 0.50 T, que está orientado en un ángulo de 37° por arriba de la horizontal en relación con la dirección del haz. *a)* ¿Cuál es la aceleración inicial de un protón en el haz acelerado? *b)* ¿Qué sucedería si el campo magnético formara un ángulo de 37° por debajo de la horizontal? *c)* Si el haz fuera de electrones y no de protones, y el campo formara un ángulo de 37° hacia arriba, ¿cuál sería la diferencia de fuerzas sobre las partículas, al entrar el haz en el campo magnético?

5.3 Aplicaciones: partículas cargadas en campos magnéticos

22. **OM** En un espectrómetro de masas, dos iones con carga y rapidez idénticas se aceleran en dos arcos semicirculares diferentes. El arco del ion A tiene un radio de 25.0 cm y el radio del arco de B mide 50.0 cm. ¿Qué podría decirse acerca de sus masas relativas? *a)* $m_A = m_B$, *b)* $m_A = 2m_B$, *c)* $m_A = \frac{1}{2}m_B$ o *d)* no es posible afirmar algo a partir de los datos.
23. **OM** En un espectrómetro de masas, dos iones con masa y rapidez idénticas se aceleran en dos arcos semicirculares diferentes. El arco del ion A tiene un radio de 25.0 cm y el radio del arco de B mide 50.0 cm. ¿Qué podría decirse acerca de sus cargas netas? *a)* $q_A = q_B$, *b)* $q_A = 2q_B$, *c)* $q_A = \frac{1}{2}q_B$ o *d)* no es posible afirmar algo a partir de los datos.
24. **OM** En el selector de velocidad de la figura 5.9, ¿hacia dónde se desviará un ion si su velocidad es mayor que E/B_1 ? *a)* Hacia arriba, *b)* hacia abajo, *c)* no se desviará.
25. **PC** Explique por qué un imán cercano puede distorsionar la imagen en un monitor de computadora o en el kinescopio de un televisor (▼ figura 5.35).
26. **PC** El círculo amplificado de la figura 5.11 muestra cómo los iones positivos (Na^+) en agua de mar son acelerados y expulsados por la parte trasera del submarino para suministrar una fuerza de propulsión. Pero, ¿qué sucede con los iones negativos (Cl^-) en el agua de mar? Como tienen carga de signo contrario, ¿acaso no se aceleran hacia el frente dando por resultado una fuerza neta de cero en el submarino? Explique su respuesta.
27. **PC** Explique claramente por qué la velocidad seleccionada en un selector de velocidad (similar al de la figura 5.9) no depende de las cargas en cualquiera de los iones que pasan a través de él.
28. ● Un deuterón ionizado (una partícula con carga $+e$) pasa por un selector de velocidad cuyos campos magnético y eléctrico perpendiculares tienen magnitudes de 40 mT y 8.0 kV/m, respectivamente. Calcule la rapidez del ion.
29. ● En un selector de velocidad, un imán grande produce el campo magnético uniforme de 1.5 T. Dos placas paralelas separadas 1.5 cm producen el campo eléctrico perpendicular. ¿Qué voltaje se debe aplicar a las placas para que *a)* un ion con una carga que se mueva a 8.0×10^4 m/s pase sin desviarse o *b)* un ion con doble carga que viaje con la misma velocidad pase sin desviarse?
30. ● Una partícula cargada se mueve sin desviarse a través de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares, cuyas magnitudes son 3000 N/C y 30 mT, respectivamente. Calcule la rapidez de la partícula si es *a)* un protón o *b)* una partícula alfa. (Una partícula alfa es un núcleo de helio, es decir, un ion positivo con carga positiva doble.)
31. ●● En una técnica experimental de tratamiento de tumores profundos, se bombardean piones (π^+ , partículas elementales cuya masa es 2.25×10^{-28} kg) con carga positiva para que penetren en el tejido y desintegren el tumor, liberando energía que mata las células cancerosas. Si se requieren piones con energía cinética de 10 keV y si se usa un selector de velocidad con una intensidad de campo eléctrico de 2.0×10^3 V/m, ¿cuál debe ser la intensidad del campo magnético?
32. ●● En un espectrómetro de masas, se selecciona un ion con una sola carga y con determinada velocidad usando un campo magnético de 0.10 T, perpendicular a un campo eléctrico de 1.0×10^3 V/m. Este mismo campo magnético se usa a continuación para desviar al ion, que describe una trayectoria circular de 1.2 cm de radio. ¿Cuál es la masa del ion?
33. ●● En un espectrómetro de masas se selecciona un ion con carga doble y determinada velocidad, usando un campo magnético de 100 mT, perpendicular a un campo eléctrico de 1.0 kV/m. Este mismo campo magnético se usa a continuación para desviar al ion, que describe una trayectoria circular de 15 mm de radio. Calcule *a)* la masa del ion y *b)* su energía cinética. *c)* ¿Aumenta la energía cinética del ion en la trayectoria circular? Explique por qué.
34. ●●● En un espectrómetro de masas un haz de protones entra en un campo magnético. Algunos protones describen exactamente un arco de un cuarto de círculo, de 0.50 m de radio. Si el campo siempre es perpendicular a la velocidad del protón, ¿cuál es la magnitud del campo, si los protones que salen tienen una energía cinética de 10 keV?



◀ FIGURA 5.35 Perturbación magnética Véase el ejercicio 25.

5.4 Fuerzas magnéticas sobre conductores con corriente eléctrica y

5.5 Aplicaciones: conductores con corriente en campos magnéticos

35. **OM** Un conductor largo, recto y horizontal está en el ecuador y lleva una corriente dirigida hacia el este. ¿Cuál es la dirección de la fuerza sobre el conductor que se debe al campo magnético terrestre? *a)* Hacia el este, *b)* hacia el oeste, *c)* hacia el sur o *d)* hacia arriba.
36. **OM** Un conductor largo, recto y horizontal está en el ecuador y conduce una corriente. ¿En qué dirección debería estar la corriente si se pretende que el objeto equilibre el peso del conductor con la fuerza magnética sobre él? *a)* Hacia el este, *b)* hacia el oeste, *c)* hacia el sur o *d)* hacia arriba.
37. **OM** Usted está viendo horizontalmente hacia el oeste, directamente al plano circular de una bobina que conduce corriente. La bobina está en un campo magnético uniforme y vertical hacia arriba. Cuando se libera, la parte superior de la bobina comienza a tirar alejándose de usted conforme la parte inferior gira hacia usted. ¿Cuál es el sentido de la corriente en la bobina? *a)* El de las manecillas del reloj, *b)* contrario a las manecillas del reloj o *c)* no es posible determinarlo a partir de los datos.
38. **PC** Dos conductores rectos son paralelos entre sí y las corrientes en ellos tienen el mismo sentido. ¿Los conductores se atraerán o se repelerán? ¿Cómo se comparan las magnitudes de estas fuerzas sobre cada conductor?
39. **PC** Prediga qué sucede a la longitud de un resorte cuando pasa una gran corriente eléctrica por él. [*Sugerencia:* examine la dirección de la corriente en las espiras vecinas del resorte.]
40. **PC** ¿Es posible orientar una espira de corriente dentro de un campo magnético uniforme de tal manera que no exista un momento de torsión sobre ella? En caso afirmativo, describa la orientación (u orientaciones).
41. **PC** Explique el funcionamiento de un timbre eléctrico y de las campanillas eléctricas que se ilustran en la **figura 5.36**.

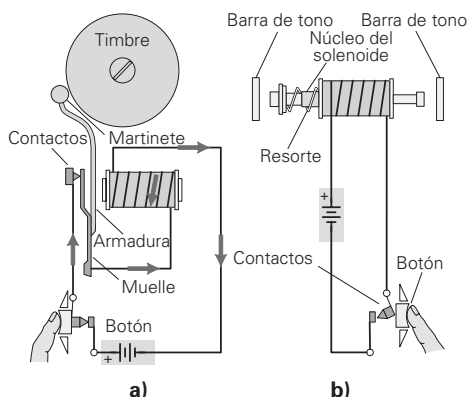


FIGURA 5.36 Aplicaciones del electromagnetismo Tanto *a)* el timbre eléctrico como *b)* la campanilla eléctrica tienen electroimanes. Véase el ejercicio 41.

42. **EI** ● Un segmento de conductor, recto y horizontal, transporta una corriente en dirección $+x$ dentro de un campo magnético con la dirección $-z$. *a)* ¿La fuerza magnética sobre el conductor está dirigida hacia 1) $-x$, 2) $+z$, 3) $+y$ o 4) $-y$? Explique por qué. *b)* Si el conductor tiene 1.0 m de longitud y transporta una corriente de 5.0 A, y la magnitud del campo magnético es 0.30 T, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre el conductor?

43. ● Un tramo de alambre de 2.0 m de longitud conduce una corriente de 20 A, dentro de un campo magnético uniforme de 50 mT, cuya dirección forma un ángulo de 37° con la dirección de la corriente. Determine la fuerza sobre el alambre.
44. ●● Demuestre cómo se puede aplicar una regla de la mano derecha para determinar la dirección de la corriente en un conductor dentro de un campo magnético uniforme, si se conoce la fuerza sobre el conductor. En la **figura 5.37** se muestran las fuerzas sobre algunos conductores específicos.

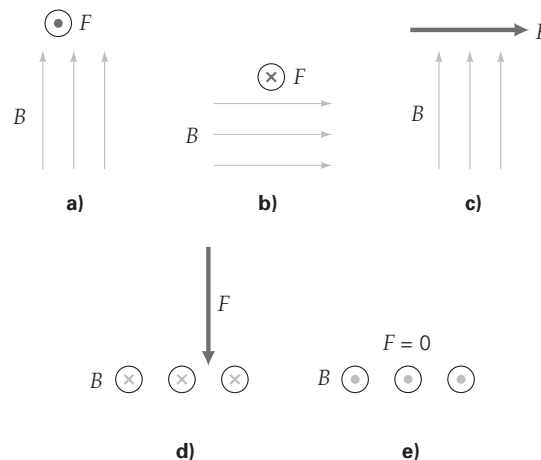
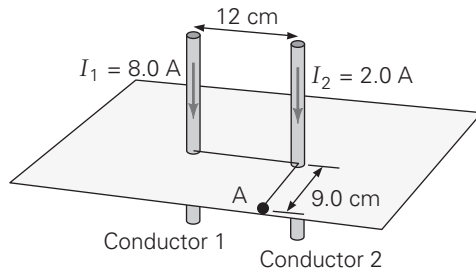


FIGURA 5.37 La regla de la mano derecha Véase el ejercicio 44.

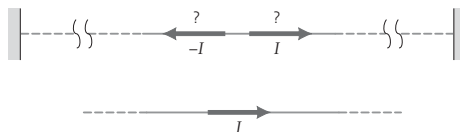
45. ●● Un conductor recto de 50 cm de longitud transporta una corriente de 4.0 A, dirigida verticalmente hacia arriba. Si sobre el conductor actúa una fuerza de 1.0×10^{-2} N en dirección al este, que se debe a un campo magnético en ángulo recto con el tramo de alambre, ¿cuáles son la magnitud y la dirección del campo magnético?
46. ●● Un campo magnético horizontal de 1.0×10^{-4} T forma un ángulo de 30° con la dirección de la corriente que pasa por un conductor largo y recto de 75 cm de longitud. Si el conductor lleva una corriente de 15 A, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre él?
47. ●● Un alambre conduce 10 A de corriente en dirección $+x$, dentro de un campo magnético uniforme de 0.40 T. Calcule la magnitud de la fuerza por unidad de longitud, y la dirección de la misma, si el campo magnético apunta en dirección *a)* $+x$, *b)* $+y$, *c)* $+z$, *d)* $-y$ y *e)* $-z$.
48. ●● Un conductor recto de 25 cm de longitud está orientado verticalmente dentro de un campo magnético uniforme horizontal de 0.30 T, que apunta en dirección $-x$. ¿Qué corriente (incluyendo su dirección) hará que el conductor esté sometido a una fuerza de 0.050 N en la dirección $+y$?
49. ●● Por un conductor pasa una corriente de 10 A en la dirección $+x$. Calcule la fuerza por unidad de longitud del conductor, si se encuentra en un campo magnético cuyos componentes son $B_x = 0.020$ T, $B_y = 0.040$ T y $B_z = 0$ T.
50. ●● Para arrancar un automóvil desde el acumulador de otro se usan unos cables pasacorriente para conectar las terminales de los dos acumuladores. Si por los cables pasan 15 A de corriente durante el arranque, y son paralelos y están a 15 cm de distancia, ¿cuál es la fuerza por unidad de longitud sobre los cables?

51. **EI** ●● Dos conductores largos, rectos y paralelos llevan corriente en la misma dirección. *a)* Aplique las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las fuerzas sobre los conductores son 1) de atracción o 2) de repulsión. *b)* Si los conductores están a 24 cm de distancia y las corrientes que conducen son de 2.0 A y 4.0 A, respectivamente, calcule la fuerza por unidad de longitud sobre cada uno.
52. **EI** ●● Dos conductores largos, rectos y paralelos están a 10 cm de distancia y conducen corrientes en sentidos contrarios. *a)* Utilice las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las fuerzas sobre los conductores son de 1) atracción o 2) repulsión. *b)* Si los alambres conducen corrientes iguales de 3.0 A, ¿cuál es la fuerza por unidad de longitud sobre ellos?
53. ●● Una línea de transmisión eléctrica cd casi horizontal, sobre las latitudes medias de América del Norte, conduce 1000 A de corriente, directamente hacia el este. Si el campo magnético terrestre en ese lugar es hacia el norte y con una magnitud de 5.0×10^{-5} T a un ángulo de 45° por debajo de la horizontal, ¿cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza magnética sobre un tramo de 15 m de la línea?
54. ●● ¿Cuál es la fuerza (incluyendo dirección) por unidad de longitud sobre el conductor 1 de la ▼ figura 5.38?



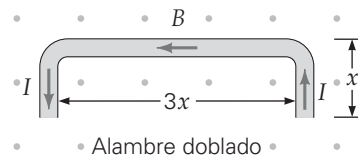
▲ FIGURA 5.38 Conductores paralelos con corriente Véanse los ejercicios 54, 55, 67, 73 y 76.

55. ●● ¿Cuál es la fuerza (incluyendo dirección) por unidad de longitud sobre el conductor 2 de la figura 5.38?
56. **EI** ●● Se coloca un alambre largo a 2.0 cm directamente debajo de otro rígidamente montado (▼ figura 5.39). *a)* Utilice las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas, y determine si las corrientes en los alambres deberían tener 1) el mismo sentido o 2) sentido contrario para que el alambre inferior esté en equilibrio (es decir, para que “flote”). *b)* Si el alambre inferior tiene una densidad lineal de masa de 1.5×10^{-3} kg/m y los alambres conducen la misma corriente, ¿cuál debe ser esa corriente?



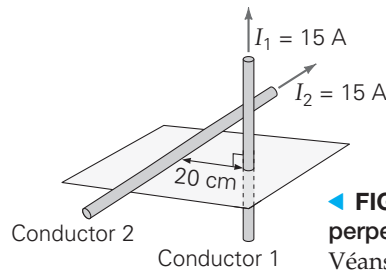
▲ FIGURA 5.39 Levitación magnética El alambre de abajo es atraído magnéticamente hacia el alambre de arriba (fijo rígidamente). Véase el ejercicio 56.

57. ●● Un alambre se dobla como en la ▼ figura 5.40 y se coloca en un campo magnético de 1.0 T de magnitud, en la dirección indicada. Calcule la magnitud de la fuerza neta sobre cada segmento del conductor, si $x = 50$ cm, y si por él pasa una corriente de 5.0 A en la dirección que se indica.



◀ FIGURA 5.40 Conductor con corriente en un campo magnético Véase el ejercicio 57.

58. **EI** ●●● Una espira de alambre con corriente está en un campo magnético de 1.6 T. *a)* Para que el momento de torsión magnético sobre la espira sea máximo, el plano de la espira debe ser 1) paralelo, 2) perpendicular o 3) a 45° respecto al campo magnético? Explique por qué. *b)* Si la espira es rectangular, y sus dimensiones son 20 por 30 cm, y por ella pasa una corriente de 1.5 A, ¿cuál es la magnitud del momento magnético de la espira y cuál es el momento de torsión máximo? *c)* ¿Cuál sería el ángulo (o ángulos) entre el vector momento magnético y la dirección del campo magnético si la espira experimentara sólo el 20% de su momento de torsión máximo?
59. ●●● Dos conductores rectos forman ángulo recto entre sí como se ve en la ▼ figura 5.41. ¿Cuál es la fuerza neta sobre cada uno? ¿Hay un momento de torsión neto sobre cada uno?



◀ FIGURA 5.41 Conductores perpendiculares con corriente Véanse los ejercicios 59 y 84.

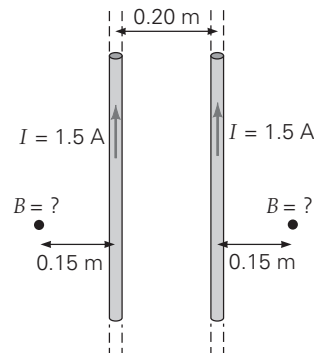
60. ●●● Un alambre forma una espira rectangular con 0.20 m^2 de área y conduce 0.25 A de corriente. La espira puede girar libremente en torno a un eje perpendicular a un campo magnético uniforme de 0.30 T de intensidad. El plano de la espira forma un ángulo de 30° con la dirección del campo magnético. *a)* ¿Cuál es la magnitud del momento de torsión sobre la espira? *b)* ¿Cómo cambiaría el campo magnético para duplicar la magnitud del momento de torsión en el inciso *a*? *c)* ¿Podría duplicarse el momento de torsión en el inciso *a* sólo cambiando el ángulo? Explique su respuesta. Si es así, encuentre ese ángulo.

5.6 Electromagnetismo: las fuentes de los campos magnéticos

61. **OM** Un conductor largo y recto es paralelo al suelo y lleva una corriente constante hacia el este. En un punto directamente debajo de él, ¿cuál es la dirección del campo magnético que produce? *a)* Norte, *b)* este, *c)* sur, *d)* oeste.
62. **OM** Usted ve directamente hacia un extremo de un solenoide largo. El campo magnético en su centro apunta hacia usted. ¿Cuál es el sentido de la corriente en el solenoide, tal como usted la ve? *a)* El de las manecillas del reloj, *b)* contrario al de las manecillas del reloj, *c)* directamente hacia usted, *d)* directamente alejándose de usted.

63. **OM** Una espira de alambre que conduce corriente está en el plano de esta página. Fuera de la espira, su campo magnético apunta hacia la página. ¿Cuál es el sentido de la corriente en la espira? *a)* El de las manecillas del reloj, *b)* contrario al de las manecillas del reloj o *c)* no es posible determinarlo a partir de los datos.
64. **PC** Una espira circular con corriente yace plana sobre una mesa y crea un campo en su centro. Una brújula calibrada, cuando se coloca en el centro de la espira, apunta hacia abajo. Viéndola directamente hacia abajo, ¿cuál es la dirección de la corriente? Explique su razonamiento.
65. **PC** Si la distancia que hay entre usted y un conductor largo con corriente se duplica, ¿qué tendría que hacer a la corriente para conservar la intensidad del campo magnético que había en la posición cercana pero invirtiendo la dirección? Explique su respuesta.
66. **PC** Se tienen dos solenoides, uno con 100 vueltas y el otro con 200. Si ambos conducen la misma corriente, ¿el que tiene más vueltas producirá necesariamente un campo magnético más intenso en su centro? Explique por qué.
67. **PC** Para minimizar los efectos del campo magnético, la mayoría de los cables de los aparatos se colocan muy juntos. Explique cómo funciona esto para reducir el campo externo de la corriente en el cable.
68. **PC** Dos espiras de alambre circulares son coplanares (es decir, sus áreas están en el mismo plano) y tienen un centro común. La externa conduce una corriente de 10 A en el sentido de las manecillas del reloj. Para crear un campo magnético cero en su centro, ¿cuál debería ser la dirección de la corriente en la espira interior? ¿Su corriente debería ser de 10 A, mayor que 10 A, o menor que 10 A? Explique su razonamiento.
69. ● El campo magnético en el centro de una bobina de 50 vueltas y 15 cm de radio es de 0.80 mT. Calcule la corriente que pasa por la bobina.
70. ● Un alambre largo y recto conduce 2.5 A. Calcule la magnitud del campo magnético a 25 cm del alambre.
71. ● En un laboratorio de física, un alumno descubre que la magnitud de un campo magnético, a cierta distancia de un alambre largo, es $4.0 \mu\text{T}$. Si el alambre conduce una corriente de 5.0 A, ¿cuál es la distancia del campo magnético al alambre?
72. ● Un solenoide tiene 0.20 m de longitud y está formado por 100 vueltas de alambre. En su centro, produce un campo magnético de 1.5 mT de intensidad. Calcule la corriente que pasa por la bobina.
73. ●● Dos conductores largos y paralelos llevan 8.0 A y 2.0 A (figura 5.38). *a)* ¿Cuál es la magnitud del campo magnético a la mitad de la distancia entre los conductores? *b)* ¿Dónde es igual a cero el campo magnético sobre una recta que une a los dos conductores y es perpendicular a ellos?
74. ●● Dos conductores largos y paralelos están a 50 cm de distancia y cada uno lleva una corriente de 4.0 A en dirección horizontal. Calcule el campo magnético a medio camino entre los conductores, si las corrientes tienen *a)* el mismo sentido y *b)* sentido contrario.

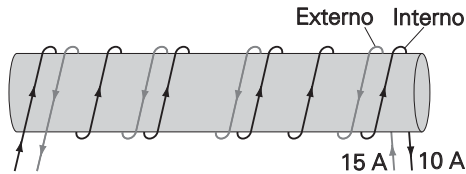
75. ●● Dos conductores largos y paralelos están a 0.20 m de distancia y llevan corrientes iguales de 1.5 A en la misma dirección. Calcule la magnitud del campo magnético a 0.15 m de cada conductor, en su lado opuesto al otro conductor (▼ figura 5.42).



▲ FIGURA 5.42 Suma de campos magnéticos Véase el ejercicio 75.

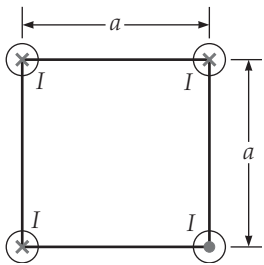
76. ●● En la figura 5.38, determine el campo magnético (magnitud y dirección) en el punto A, que se encuentra a 9.0 cm del conductor 2, sobre una perpendicular a la recta que une los conductores.
77. ●● Supongamos que la corriente en el conductor 1 de la figura 5.38 tuviera sentido contrario. ¿Cuál sería el campo magnético a la mitad de la distancia entre los conductores?
78. ●● ¿Cuánta corriente debe pasar en una espira circular de 10 cm de radio para producir un campo magnético en su centro, de la misma magnitud que el componente horizontal del campo magnético terrestre en el ecuador (aproximadamente de 0.40 G)?
79. ●● Una bobina circular de cuatro vueltas y 5.0 cm de radio conduce una corriente de 2.0 A en el sentido de las manecillas del reloj, vista desde arriba de su plano. ¿Cuál es el campo magnético en su centro?
80. **El** ●● Una espira circular de alambre en el plano horizontal conduce una corriente en sentido contrario al de las manecillas del reloj, vista desde arriba. *a)* Utilice la regla de la mano derecha para fuentes y determine si la dirección del campo magnético en el centro de la espira 1) es hacia el observador o 2) se aleja del observador. *b)* Si el diámetro de la espira es de 12 cm y la corriente es de 1.8 A, ¿cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de la espira?
81. ●● Una espira circular de alambre, de 5.0 cm de radio, conduce una corriente de 1.0 A. Otra espira circular es concéntrica a la primera (esto es, las dos espiras tienen un centro común) y tiene un radio de 10 cm. El campo magnético en el centro de las espiras es el doble de lo que produciría la primera por sí sola, pero con dirección opuesta. ¿Cuál es el radio de la segunda espira?
82. ●●● Se devana un solenoide de 10 cm de longitud con 1000 vueltas de alambre. En el centro del solenoide se produce un campo magnético de $4.0 \times 10^{-4} \text{ T}$. *a)* ¿Qué tan largo debe ser el solenoide para producir un campo de $6.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ en su centro? *b)* Si sólo se ajustan las vueltas, ¿qué número se necesitará para producir un campo de $8.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ en el centro? *c)* ¿Qué corriente en el solenoide será necesaria para producir un campo de $9.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ pero con dirección opuesta?

83. ●●● Se devana un solenoide con 200 vueltas de alambre por centímetro. Sobre este devanado se enrolla una segunda capa de alambre aislado con 180 vueltas por centímetro. Cuando el solenoide funciona, la capa interior conduce una corriente de 10 A y la exterior una de 15 A, en sentido contrario a la de la capa interior (▼ figura 5.43). a) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el centro de este solenoide con dos devanados? b) ¿Cuál es la dirección del campo magnético en el centro de esta configuración?



▲ FIGURA 5.43 ¿Se duplica? Véase el ejercicio 83.

84. ●●● Dos conductores largos y perpendiculares entre sí conducen corrientes de 15 A, como se muestra en la figura 5.41. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético a media distancia de la línea que une a los conductores?
85. ●●● Cuatro alambres ocupan las esquinas de un cuadrado de lado a , como se ve en la ▼ figura 5.44, y conducen corrientes iguales I . Calcule el campo magnético en el centro del cuadrado, en función de estos parámetros.



◀ FIGURA 5.44 Conductores con corriente en un arreglo cuadrado Véase el ejercicio 85.

86. ●●● Una partícula de carga q y masa m se mueve en un plano horizontal, en ángulo recto respecto a un plano magnético uniforme vertical B . a) ¿Cuál es la frecuencia f del movimiento circular de la partícula, en función de a , B y m ? (Ésta es la llamada *frecuencia ciclotrónica*.) b) Demuestre que el tiempo necesario para que cualquier partícula cargada describa una revolución completa es independiente de su velocidad y de su radio. c) Calcule el radio de la trayectoria a la frecuencia ciclotrónica, si la partícula es un electrón con velocidad $v = 1.0 \times 10^5$ m/s, y la intensidad del campo es $B = 1.0 \times 10^{-4}$ T.

5.7 Materiales magnéticos

87. OM La fuente principal de magnetismo en los materiales magnéticos la constituye(n) a) las órbitas de los electrones, b) el espín del electrón, c) los polos magnéticos o d) las propiedades magnéticas.
88. OM Cuando se coloca un material ferromagnético en un campo magnético externo, a) la orientación de los dominios puede cambiar, b) las fronteras de los dominios pueden cambiar, c) se crean nuevos dominios o d) tanto a como b son válidas.
89. PC Si se ve hacia abajo sobre el plano de la órbita de un electrón en un átomo de hidrógeno, y el electrón la reco-

rre en sentido contrario al de las manecillas del reloj, ¿cuál es la dirección del campo magnético que el electrón produce en el protón?

90. PC ¿Cuál es la finalidad del núcleo de hierro que se usa con frecuencia en el centro de un solenoide?
91. PC Explique varias formas de destruir o reducir el campo magnético de un imán permanente.
92. ●● Un solenoide con 100 vueltas por centímetro tiene un núcleo de hierro cuya permeabilidad relativa es de 2000. Por el solenoide pasa una corriente de 0.040 A. a) ¿Cuál es el campo magnético en el centro del solenoide? b) ¿Cuántas veces es mayor el campo magnético con el núcleo de hierro que sin él?
93. ●●● En el centro de la órbita circular del electrón en un átomo de hidrógeno, ¿cuál es el campo magnético (generado sólo por el electrón)? El radio de la órbita es de 0.0529 nm. [Sugerencia: calcule el periodo del electrón, teniendo en cuenta la fuerza centrípeta.]

*5.8 Geomagnetismo: el campo magnético terrestre

94. OM El campo magnético terrestre a) tiene polos que coinciden con los polos geográficos, b) sólo existe en los polos, c) invierte su polaridad luego de unos cuantos siglos o d) ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
95. OM Las auroras boreales (véase la figura 5.32) a) sólo se presentan en el hemisferio norte, b) se relacionan con el cinturón inferior de Van Allen, c) suceden por las inversiones de los polos magnéticos terrestres o d) suceden principalmente cuando no hay perturbaciones solares.
96. OM Si la dirección de su brújula calibrada apuntara en línea recta hacia abajo, ¿dónde estaría usted? a) Cerca del polo norte geográfico, b) cerca del ecuador o c) cerca del polo sur geográfico.
97. OM Si un protón estuviera en órbita por encima del ecuador de la Tierra en el cinturón de Van Allen, ¿en qué dirección tendría que estar orbitando? a) Hacia el oeste, b) hacia el este o c) en cualquiera de las dos direcciones.
98. PC Determine la dirección de la fuerza que ejerce el campo magnético terrestre sobre un electrón cerca del ecuador para cada una de las siguientes situaciones. La velocidad del electrón se dirige a) al sur, b) al noroeste o c) hacia arriba?
99. PC Se supone que en un tiempo relativamente corto en términos geológicos, se invertirá la dirección del campo magnético de la Tierra. Después de eso, ¿cuál sería la polaridad del polo magnético cerca del polo norte geográfico de la Tierra?

Ejercicios adicionales

100. Un haz de protones se acelera desde el reposo, mediante una diferencia de potencial de 3.0 kV. Después, entra en una región donde su velocidad es inicialmente perpendicular a un campo eléctrico. El campo se produce con dos placas paralelas a 10 cm de distancia, y con una diferencia de potencial de 250 V entre ellas. Calcule la magnitud del

campo magnético (perpendicular a \vec{E}) necesario para que el haz de protones pase sin desviarse entre las placas.

101. Un solenoide de 10 cm de longitud tiene 3000 vueltas de alambre, y por él pasa una corriente de 5.0 A. Lo rodea de forma concéntrica una bobina de 2000 vueltas de alambre, de la misma longitud (concéntrico significa que los dos dispositivos tienen un mismo eje central). Por la bobina externa pasa una corriente de 10 A, en la misma dirección que la corriente en el solenoide interior. Calcule el campo magnético en el centro común.
102. **EI** Un haz horizontal de electrones va de norte a sur en un tubo de descarga localizado en el hemisferio norte. *a)* La dirección de la fuerza magnética sobre el electrón se dirige 1) hacia el oeste, 2) hacia el este, 3) hacia el sur o 4) hacia el norte. Explique por qué. *b)* Si la velocidad del electrón es 1.0×10^3 m/s y se sabe que el componente vertical del campo magnético terrestre es 5.0×10^{-5} T, ¿cuál es la magnitud de la fuerza sobre cada electrón?
103. Un protón entra en un campo magnético uniforme que forma ángulo recto con su velocidad. La intensidad del campo es de 0.80 T, y el protón describe una trayectoria circular de 4.6 cm de radio. ¿Cuál es *a)* la cantidad de movimiento y *b)* la energía cinética del protón?
104. Al salir de un acelerador lineal, un haz horizontal y delgado de protones viaja en línea recta hacia el norte. Si 1.75×10^{13} protones pasan por un punto dado por segundo, determine la dirección del campo magnético y su intensidad a 2.40 m al este del haz. ¿Es probable que éste interfiera con la banda magnética de una tarjeta bancaria de cajero automático en comparación con el campo de la Tierra.
105. Una bobina circular de alambre de 200 vueltas tiene un radio de 10.0 cm y una resistencia total de 0.115Ω . En su centro, la intensidad del campo magnético es de 7.45 mT. Determine el voltaje del suministro de potencia que genera la corriente en la bobina.
106. Una bobina circular de 100 vueltas tiene un radio de 20.0 cm y conduce una corriente de 0.400 A. La normal al área de la bobina apunta en línea recta hacia el este. Cuando se coloca una brújula en el centro de la bobina, no apunta hacia el este, sino, en lugar de ello, forma un ángulo de 60° al norte del este. Con estos datos, determine *a)* la magnitud del componente horizontal del campo de la Tierra en ese lugar y *b)* la magnitud del campo de la Tierra en ese lugar si forma un ángulo de 55° por debajo de la horizontal.
107. **EI** Dos conductores largos y rectos están orientados de forma perpendicular a esta página. El conductor 1 lleva una corriente de 20.0 A hacia la página y, a 15.0 cm a su izquierda, el conductor 2 lleva una corriente de 5.00 A. En algún lugar de la línea que une a los dos conductores, hay un campo magnético igual a cero. *a)* ¿Cuál es la dirección de la corriente en el conductor 2? 1) Hacia fuera de la página, 2) hacia la página o 3) no es posible determinarla a partir de los datos. *b)* Encuentre el lugar donde el campo magnético es igual a cero.
108. **EI** Una bobina circular de alambre tiene la normal a su área apuntando hacia arriba. Una segunda bobina, más pequeña y concéntrica, conduce una corriente en sentido contrario. *a)* ¿En qué lugar del plano de estas bobinas, el campo magnético podría ser cero? 1) Sólo dentro de la de menor tamaño, 2) sólo entre la interior y la exterior, 3) sólo afuera de la más grande o 4) dentro de la más pequeña y fuera de la más grande. *b)* La de mayor tamaño es una bobina de alambre de 200 vueltas con un radio de 9.50 cm y conduce una corriente de 11.5 A. La segunda es de 100 vueltas y tiene un radio de 2.50 cm. Determine la corriente en la bobina interior de manera que el campo magnético en su centro común sea cero. Ignore el campo de la Tierra.
109. Un solenoide de 50 cm de largo tiene 100 vueltas de alambre y conduce una corriente de 0.95 A. Tiene un núcleo ferromagnético que llena por completo su interior, donde el campo es de 0.71 T. Determine *a)* la permeabilidad magnética y *b)* la permeabilidad relativa del material.

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.1 | Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz | 155 |
| 6.2 | Generadores eléctricos y contra fem | 161 |
| 6.3 | Transformadores y transmisión de energía | 166 |
| 6.4 | Ondas electromagnéticas | 170 |

HECHOS DE FÍSICA

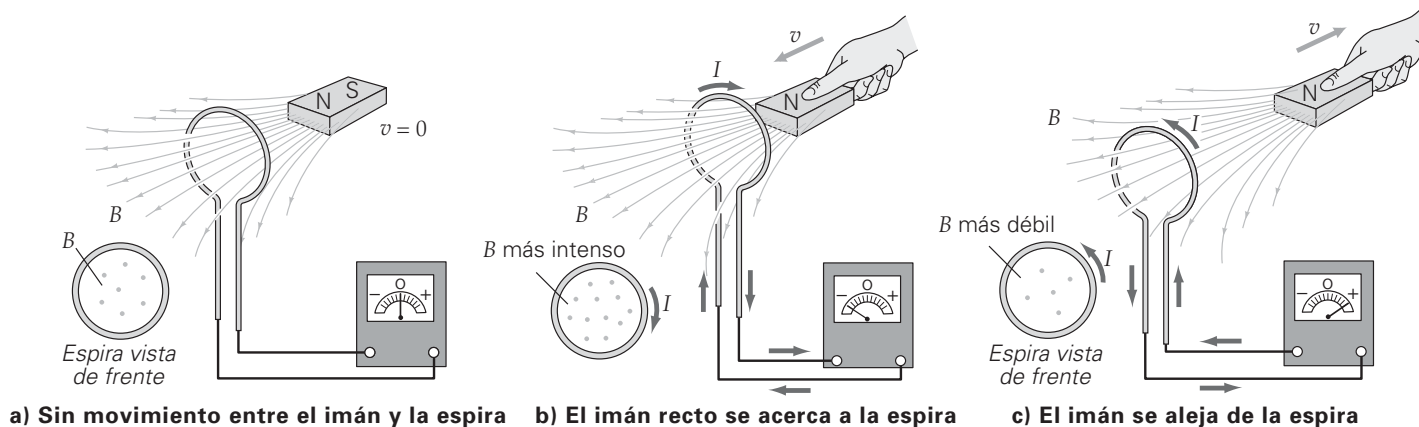
- Nikola Tesla (1856-1943), el científico e inventor serbio-estadounidense cuyo apellido es la unidad SI de intensidad de campo magnético, inventó los dínamos, transformadores y motores de ca. Vendió los derechos de patente de estos aparatos a George Westinghouse. Esto desembocó en una lucha entre los sistemas de cd de Thomas Edison y la versión de ca de Westinghouse de generación y distribución de energía eléctrica. Finalmente, este último ganó e instaló el primer generador eléctrico a gran escala en las cataratas del Niágara.
- Para demostrar la seguridad de la energía eléctrica ante un público escéptico a principios del siglo xx, Tesla organizó exhibiciones de lámparas eléctricas y permitía que la electricidad fluyera por su cuerpo. Westinghouse utilizó su sistema para iluminar la exposición World's Columbian en Chicago, en 1893. Tesla demostró que la Tierra podría servir como conductor y, sin la ayuda de cables, encendió 200 lámparas a una distancia de 25 millas. Con su transformador gigante (una bobina de Tesla), Westinghouse creó iluminación artificial, produciendo rayos que medían unos 100 pies (30 metros) de largo.
- Las ondas de radio, radar, luz visible y rayos X son ondas electromagnéticas. Mejor conocidas como luz, todas ellas obedecen las mismas relaciones matemáticas; sólo difieren en su frecuencia y longitud de onda. En el vacío, todas ellas viajan exactamente con la misma rapidez, c (3.00×10^8 m/s).
- El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) desarrolló e integró por completo las ecuaciones de electricidad y magnetismo. En conjunto, se conocen como las ecuaciones de Maxwell, y su interpretación de las mismas fue uno de los mayores logros en la física del siglo xix.



Como se vio en el capítulo anterior, una corriente eléctrica produce un campo magnético. Pero la relación entre la electricidad y el magnetismo no termina ahí. En este capítulo explicaremos que, en las condiciones adecuadas, un campo magnético produce una corriente eléctrica. ¿Cómo sucede esto? En el capítulo 5 sólo se consideraron campos magnéticos *constantes*. En una espira de alambre estacionaria en un campo magnético constante no se induce ninguna corriente. Sin embargo, si cambia el campo magnético al paso del tiempo, o si la espira de alambre se mueve a través del campo, o si gira en él, *sí* se induce una corriente.

Los usos prácticos de esta interrelación entre electricidad y magnetismo son numerosos. Un ejemplo se presenta durante la reproducción de una cinta de video, que en realidad es una cinta magnética con información codificada de acuerdo con las variaciones en su magnetismo. Con esas variaciones se producen corrientes eléctricas que, a su vez, son amplificadas y la señal se envía al televisor para su reproducción. Cuando se guarda información en un disco de computadora o cuando se recupera información se realizan procesos similares.

En mayor escala está la generación de energía eléctrica, la base de nuestra civilización moderna. En las plantas hidroeléctricas, como la que aparece en la fotografía, se utiliza una de las fuentes de energía más antiguas y sencillas del mundo —la caída del agua— para generar electricidad. La energía potencial gravitacional del agua se convierte en energía cinética, y parte de esta energía cinética se transforma finalmente en energía eléctrica. Pero, ¿cómo sucede este último paso? Independientemente de cuál sea la fuente inicial de la energía —como la combustión de petróleo, carbón o gas, un reactor nuclear o la caída de agua—, la conversión real a energía eléctrica se hace mediante campos magnéticos e inducción electromagnética. En este capítulo no sólo se examinan los principios electromagnéticos básicos que hacen posible esa conversión, sino también se describen varias aplicaciones prácticas. Además, también se verá que la creación y propagación de la radiación electromagnética se relaciona estrechamente con la inducción electromagnética.



6.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz

OBJETIVOS: a) Definir el flujo magnético y explicar cómo se crea una corriente inducida y b) determinar las fuerzas electromagnéticas inducidas y las corrientes

Recuerde que en el capítulo 3 vimos que *fem* significa *fuerza electromotriz*, que es un voltaje o diferencia de potencial eléctrico capaz de crear una corriente eléctrica. Se observa en forma experimental que un imán que se mantiene estacionario cerca de una espira de alambre conductor *no* induce una fem (y, por lo tanto, no produce corriente) en esa espira (▲ figura 6.1a). Sin embargo, si el imán se acerca a la espira, como se ve en la figura 6.1b, la desviación de la aguja de un galvanómetro indica que existe corriente en la espira, pero sólo durante el movimiento. Además, si el imán se aleja de la espira, como se ve en la figura 6.1c, la aguja del galvanómetro se desvía en dirección contraria, indicando una inversión de la dirección de la corriente; pero de nuevo, esto sólo sucede durante el movimiento.

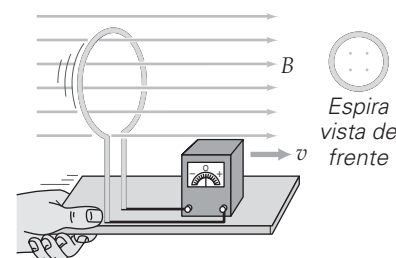
Los movimientos de la aguja del galvanómetro, que indican la presencia de *corrientes inducidas*, también se registran si la espira se mueve acercándose o alejándose de un imán estacionario. Por lo tanto, el efecto depende del movimiento *relativo* de la espira y del imán. También se deduce que la corriente inducida depende de la rapidez de ese movimiento. Sin embargo, según los experimentos, hay una excepción notable. Si una espira se mueve (sin girar) dentro de un campo magnético *uniforme*, como se muestra en la ► figura 6.2, no se induce corriente. Más adelante, en este apartado, veremos por qué esto es así.

Hay otra forma de inducir una corriente en una espira estacionaria de alambre, que consiste en variar la corriente en otra espira cercana. Cuando en el circuito de la ▼ figura 6.3a se cierra el interruptor de la batería, la corriente en la espira derecha pasa de cero a algún valor constante, en un breve lapso. Sólo durante ese tiempo el campo magnético provocado por la corriente en esa espira aumenta en la región de la espira izquierda. En ese momento, la aguja del galvanómetro se mueve, indicando que hay corriente en la espira izquierda. Cuando la corriente en la espira derecha llega a su valor estable, el campo magnético que produce se vuelve constante, y la corriente en la espira izquierda baja a cero. De igual manera, cuando se abre el interruptor de la espira derecha (figura 6.3b), su corriente y su campo disminuyen hasta llegar a cero, y el galvanómetro se desvía en dirección contraria, indicando una inversión de la dirección de la corriente inducida en la espira izquierda. El hecho que hay que hacer notar es que *la corriente inducida en una espira sólo se presenta cuando cambia el campo magnético en esa espira*.

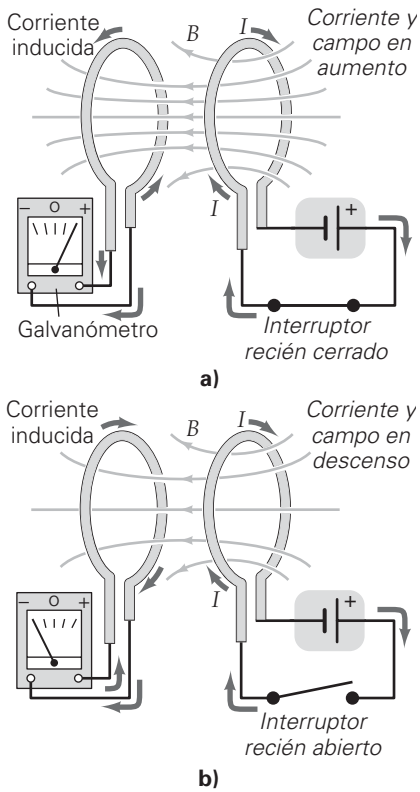
En la figura 6.1, al mover el imán, cambia el ambiente magnético en una espira, y provoca una fem inducida, que, a la vez, causa una corriente inducida. Para el caso de *dos* espiras estacionarias (figura 6.3), una corriente variable en la espira derecha produjo un ambiente magnético variable en la espira izquierda, induciendo así una fem y una corriente en ella.* Hay una forma práctica de resumir lo que sucede tanto en la figura 6.1 como en la figura 6.3: para inducir corrientes en una espira o en un circuito completo —proceso que se llama **inducción electromagnética**—, lo que importa es si cambia el campo magnético por la espira o circuito.

*Se usa el término *inducción mutua* para describir el caso en el que se inducen fuerzas electromotrices y corrientes entre dos o más espiras.

▲ **FIGURA 6.1** Inducción electromagnética a) Cuando no hay movimiento relativo entre el imán y la espira de alambre, la cantidad de líneas de campo que pasan por la espira (7 en este caso) es constante, y el galvanómetro no indica variación. b) Al acercar el imán hacia la espira aumenta la cantidad de líneas de campo que la atraviesan (ahora son 12), y se detecta una corriente inducida. c) Al alejar el imán de la espira disminuye (a 5) la cantidad de líneas de campo que atraviesan esta última. Ahora la corriente inducida tiene dirección contraria. (Observe la desviación de la aguja.)

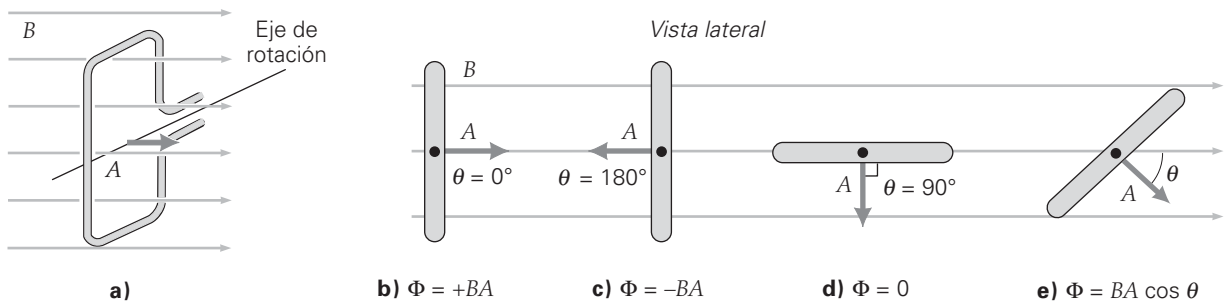


▲ **FIGURA 6.2** Movimiento relativo sin inducción Cuando una espira se mueve en dirección paralela a la de un campo magnético uniforme, no cambia la cantidad de líneas de campo que pasan por ella y, en consecuencia, no hay corriente inducida.



▲ FIGURA 6.3 Inducción mutua
a) Cuando está cerrando el interruptor en el circuito de la espira de la derecha, la acumulación de corriente produce un campo magnético que cambia en la otra espira, e induce una corriente en ella. **b)** Cuando se abre el interruptor, el campo magnético desaparece y el campo magnético en la espira de la izquierda disminuye. La corriente inducida tiene entonces la dirección contraria. Las corrientes inducidas sólo se producen cuando cambia el campo magnético que atraviesa una espira y desaparecen cuando el campo alcanza un valor constante.

▼ FIGURA 6.4 Flujo magnético **a)** El flujo magnético Φ es una medida de la cantidad de líneas de campo que pasan por una área A . El área se puede representar con un vector \vec{A} perpendicular al plano del área. **b)** Cuando el plano de una espira es perpendicular al campo y $\theta = 0^\circ$, entonces $\Phi = \Phi_{\text{máx}} = +BA$. **c)** Cuando $\theta = 180^\circ$, el flujo magnético tiene la misma magnitud, pero su dirección es contraria: $\Phi = -\Phi_{\text{máx}} = -BA$. **d)** Cuando $\theta = 90^\circ$, entonces $\Phi = 0$. **e)** Conforme cambia la orientación del plano de la espira desde perpendicular al campo a una más paralela a éste, hay menos área abierta a las líneas de campo y, por lo tanto, disminuye el flujo. En general, $\Phi = BA \cos \theta$.



Michael Faraday, en Inglaterra, y Joseph Henry, en Estados Unidos, realizaron experimentos detallados con la inducción electromagnética, alrededor de 1830. Faraday determinó que el factor importante en la inducción electromagnética es la rapidez de cambio de la cantidad de líneas magnéticas que pasan por el área de la espira o el circuito. Esto es, descubrió que

se produce una fem inducida en una espira o en un circuito completo siempre que cambia la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por el plano de la espira o del circuito.

Flujo magnético

Puesto que la fem inducida en una espira depende de la rapidez de cambio de la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por ella, para determinarla se necesita cuantificar la cantidad de líneas de campo que pasan por ella. Consideremos una espira de alambre dentro de un campo magnético uniforme (▼ figura 6.4a). La cantidad de líneas de campo que pasan por ella dependen de su área, de su orientación en relación con el campo, y de la intensidad de ese campo. Para describir la orientación de la espira se emplea el concepto de un *vector área* (\vec{A}). Su dirección es normal al plano de la espira, y su magnitud es igual a esa área. Para medir la orientación relativa, se usa un ángulo θ , formado entre el vector campo magnético (\vec{B}) y el vector área (\vec{A}). Por ejemplo, en la figura 6.4a, $\theta = 0^\circ$, lo que significa que los dos vectores tienen la misma dirección o, de forma alternativa, que el plano del área es perpendicular al campo magnético.

Para el caso de un campo magnético que no varía dentro del área, la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por esa área particular (el área dentro de la espira, en nuestro caso) es proporcional al **flujo magnético** (Φ), que se define como

$$\Phi = BA \cos \theta \quad \begin{array}{l} \text{flujo magnético} \\ \text{(en un campo magnético constante)} \end{array} \quad (6.1)$$

La unidad SI de flujo magnético es tesla-metro cuadrado ($T \cdot m^2$), o weber (Wb)*

La unidad SI de campo magnético es el tesla y las unidades SI de flujo magnético son $T \cdot m^2$. En ocasiones, esta combinación se expresa como weber, que se define como $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot m^2$. La orientación de la espira con respecto al campo magnético afecta la cantidad de líneas de campo que pasan por ella, y este factor se explica por el término de coseno en la ecuación 6.1. A continuación se describirán varias orientaciones posibles:

- Si \vec{B} y \vec{A} son paralelos ($\theta = 0^\circ$), entonces el flujo magnético es positivo y tiene un valor máximo $\Phi_{\text{máx}} = BA \cos 0^\circ = +BA$. Por la espira pasa la cantidad máxima posible de líneas de campo magnético en esta orientación (figura 6.4b).
- Si \vec{B} y \vec{A} tienen dirección contraria ($\theta = 180^\circ$), entonces la magnitud del flujo magnético de nuevo es máxima, pero de signo contrario: $\Phi_{180^\circ} = BA \cos 180^\circ = -BA = -\Phi_{\text{máx}}$ (figura 6.4c).

*Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), un físico alemán, fue reconocido por sus investigaciones en magnetismo y electricidad, en especial, por sus estudios del magnetismo terrestre. La unidad *weber* se adoptó como la unidad SI de flujo magnético en 1935.

- Si \vec{B} y \vec{A} son perpendiculares, no hay líneas de campo que pasen por el plano de la espira, y el flujo es cero: $\Phi_{90^\circ} = BA \cos 90^\circ = 0$ (figura 6.4d).
- Para los casos de orientaciones en ángulos intermedios, el flujo tiene un valor menor que el máximo, pero es distinto de cero (figura 6.4e). Se puede interpretar que $A \cos \theta$ es el área efectiva de la espira, perpendicular a las líneas de campo (►figura 6.5a). De manera alternativa, se puede considerar que $B \cos \theta$ es el componente perpendicular del campo que pasa por toda el área A de la espira, como se ve en la figura 6.5b. Así, se puede pensar que la ecuación 6.1 es $\Phi = (B \cos \theta)A$, o $\Phi = B(A \cos \theta)$, dependiendo de la interpretación. En cualquiera de estos casos, el resultado es el mismo.

Ley de Faraday de inducción y ley de Lenz

Con base en experimentos cuantitativos, Faraday determinó que la fem (\mathcal{E}) inducida en una bobina (que, por definición, consiste en una serie de N espiras individuales o vueltas) depende de la rapidez de cambio de la cantidad de líneas de campo magnético que pasan por todas las vueltas, es decir, *la rapidez de cambio del flujo magnético por todas las vueltas (flujo total)*. Esta dependencia se llama **ley de Faraday de la inducción** y se expresa en forma matemática como sigue:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t} \quad \text{ley de Faraday para fem inducida} \quad (6.2)$$

donde $\Delta \Phi$ es el cambio de flujo que pasa por una espira. En una bobina de N vueltas de alambre, el cambio total de flujo es $N\Delta \Phi$. Observe que la fem inducida en la ecuación 6.2 es un valor promedio para el intervalo de tiempo Δt (¿por qué?).

En la ecuación 6.2 se incluye el signo menos para indicar la *dirección*, de la fem inducida, que no hemos analizado aún. El físico ruso Heinrich Lenz (1804-1865) descubrió la ley que establece la dirección de la fem inducida. La **ley de Lenz** se enuncia como sigue:

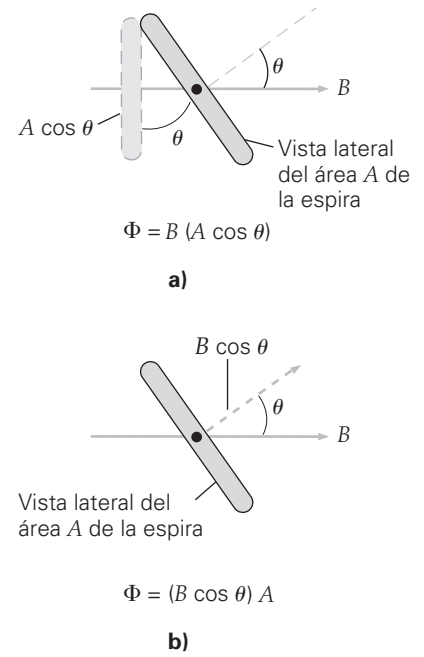
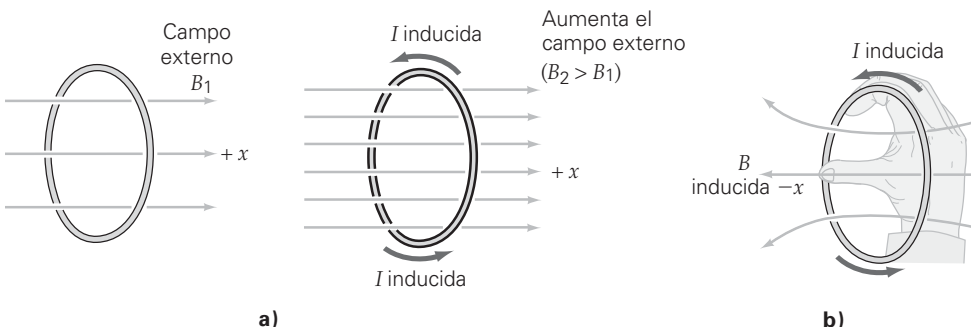
Una fem inducida en una espira o bobina de alambre tiene una dirección tal que la corriente que origina genera su propio campo magnético, que se opone al cambio de flujo magnético que pasa por esa espira o bobina.

Esta ley significa que el campo magnético *generado por la corriente inducida* tiene una dirección que trata de evitar que cambie el flujo que pasa por la espira. Por ejemplo, si el flujo aumenta en la dirección $+x$, el campo magnético generado por la corriente inducida tendrá la dirección $-x$ (►figura 6.6a). Este efecto tiende a anular el aumento de flujo, es decir, a *oponerse al cambio*. En esencia, el campo magnético generado por la corriente inducida trata de mantener el flujo magnético existente. A veces, este efecto se conoce como “inercia electromagnética” por analogía de la tendencia que tienen los objetos a resistirse a los cambios en su velocidad. A la larga, la corriente inducida no puede evitar que cambie el flujo magnético. Sin embargo, mientras cambia el flujo magnético que pasa por la espira, el campo magnético inducido se opondrá al cambio.

La dirección de la corriente inducida se establece con la **regla de la mano derecha para corriente inducida**:

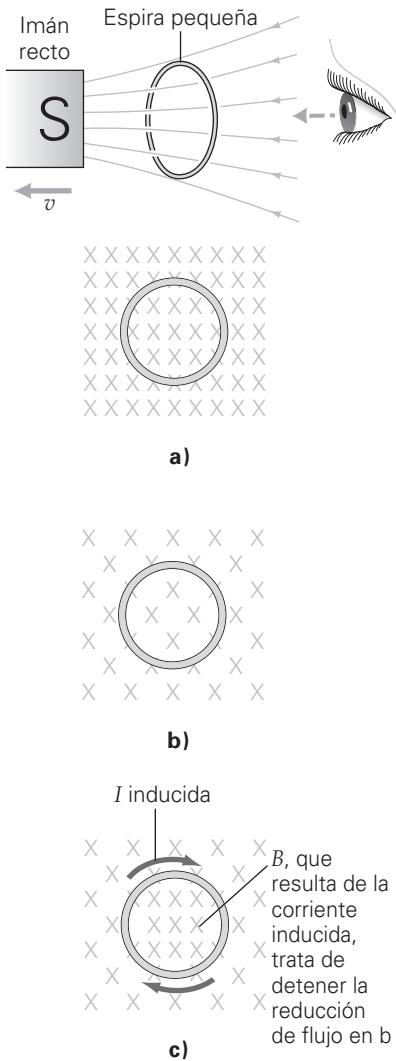
Cuando el pulgar de la mano derecha apunta en la dirección del campo inducido, los demás dedos apuntan en dirección de la corriente inducida.

(Véase la figura 6.6b y el Ejemplo integrado 6.1.) Tal vez usted reconozca que esta regla es una versión de las reglas de mano derecha, con las que se determina la dirección de un campo magnético producido por una corriente (capítulo 5). En este caso se usa



▲ **FIGURA 6.5** Flujo magnético a través de una espira: una interpretación alternativa En lugar de definir el flujo (Φ) a) en función del campo magnético (B) que pasa por una área reducida ($A \cos \theta$), se puede definir b) en función del componente perpendicular ($B \cos \theta$) del campo magnético que atraviesa a A . En cualesquiera de las formas, Φ es una medida de la cantidad de líneas de campo que pasan por A , y se determina mediante $\Phi = BA \cos \theta$ (ecuación 6.1).

◀ **FIGURA 6.6** Determinación de la dirección de la corriente a) Un campo magnético externo que aumenta hacia la derecha. La corriente inducida crea su propio campo magnético para tratar de contrarrestar el cambio de flujo. b) La regla de la mano derecha (para fuentes) para la corriente (inducida) determina la dirección de esta última. Aquí, la dirección del campo magnético inducido es hacia la izquierda. Cuando el pulgar de la mano derecha apunta en esa dirección, los demás dedos indican la dirección de la corriente.



▲ FIGURA 6.7 Inducción de corrientes mediante un imán recto *a)* El extremo sur de un imán recto se aleja rápidamente de una pequeña espira de alambre. *b)* Una vista de la espira desde la derecha revela que el campo magnético apunta alejándose del observador (es decir, en dirección hacia la página) y que, además, disminuye. *c)* Para tratar de contrarrestar la pérdida de flujo magnético hacia la página, se induce corriente en el sentido de las manecillas del reloj, para formar su propio campo magnético también hacia la página. Véase el Ejemplo integrado 6.1.

a la inversa. Por lo general, se conoce la dirección del campo inducido (por ejemplo, $-x$ en la figura 6.6b), y se desea conocer la dirección de la corriente que lo produce. En el Ejemplo integrado 6.1 se ilustra una aplicación de la ley de Lenz.

Ejemplo integrado 6.1 ■ La ley de Lenz y las corrientes inducidas

a) El extremo sur de un imán recto se aleja de una pequeña bobina de alambre (véase la figura 6.7a.) Viendo desde atrás de la bobina hacia el extremo sur del imán (figura 6.7b), ¿qué dirección tiene la corriente inducida? 1) Sentido contrario al de las manecillas del reloj, 2) sentido de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. *b)* Suponga que inicialmente el campo magnético que cruza el área de la bobina tiene un valor constante de 40 mT; el radio de la bobina mide 2.0 mm, y esta última tiene 100 vueltas de alambre. Calcule la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina, si se retira el imán recto en 0.75 s.

a) Razonamiento conceptual. Al principio hay flujo magnético que entra en el plano de la bobina (figura 6.7b) y, más adelante, cuando el imán está muy alejado de la bobina, no hay flujo magnético: el flujo cambió. Así, debe haber algo de fem inducida, y se sabe que la respuesta 3 no es correcta. Conforme se aleja el imán recto, el campo se debilita, pero mantiene su dirección. La fem inducida entonces producirá una corriente (inducida) que, a la vez, producirá un campo magnético hacia la página, para tratar de evitar la disminución del flujo. La fem inducida y la corriente siguen el sentido de las manecillas del reloj, según se determina aplicando la regla de la mano derecha para corriente inducida (figura 6.7c). La respuesta correcta es la 2.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Este ejemplo es una aplicación directa de la ecuación 6.2. El flujo inicial es el máximo posible. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI:

Dado: $B_i = 40 \text{ mT} = 0.040 \text{ T}$ **Encuentre:** la fem \mathcal{E} inducida (magnitud)
 $r = 2.00 \text{ mm} = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $N = 100 \text{ vueltas}$
 $\Delta t = 0.75 \text{ s}$

Para determinar el flujo magnético inicial que atraviesa una espira de la bobina, se utiliza la ecuación 20.1, con el ángulo $\theta = 0^\circ$. (¿Por qué?) El área es $A = \pi r^2 = \pi(2.00 \times 10^{-3} \text{ m})^2 = 1.26 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Así, el flujo inicial Φ_i que atraviesa una espira es positivo (¿por qué?) y está dado por

$$\Phi_i = B_i A \cos \theta = (0.040 \text{ T})(1.26 \times 10^{-5} \text{ m}^2) \cos 0^\circ = +5.03 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

Como el flujo final es cero, $\Delta \Phi = \Phi_f - \Phi_i = 0 - \Phi_i = -\Phi_i$. Entonces, el valor absoluto de la fem promedio inducida es

$$|\mathcal{E}| = N \frac{|\Delta \Phi|}{\Delta t} = (100 \text{ vueltas}) \frac{(5.03 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}^2 \text{ vuelta})}{(0.75 \text{ s})} = 6.70 \times 10^{-5} \text{ V}$$

Ejercicio de reforzamiento. En este ejemplo, *a)* ¿qué dirección tiene la corriente inducida si un polo norte magnético se acerca a la bobina rápidamente? Explique por qué. *b)* En este ejemplo, ¿cuál sería la corriente promedio inducida si la bobina tuviera una resistencia total de 0.2 Ω ? (Las respuestas de todos los ejercicios de reforzamiento aparecen al final del libro.)

La ley de Lenz incorpora el principio de la conservación de la energía. Imagine un caso en el que por una espira de alambre pasa un flujo magnético creciente. Contraviniendo la ley de Lenz, suponga que el campo magnético producido por la corriente inducida se sumará al flujo, en vez de mantenerlo en su valor original. Este aumento de flujo produciría una corriente inducida todavía mayor. Esta mayor corriente inducida produciría un flujo magnético todavía mayor, lo que produciría una mayor corriente inducida, y así sucesivamente. Es un caso en el que se da algo de energía por nada, lo que viola la ley de la conservación de la energía.

Para comprender la dirección de la fem inducida en una espira, en función de fuerzas, considere un imán en movimiento (como, el de la figura 6.1b). Una espira con corriente eléctrica crea su propio campo magnético, semejante al de un imán recto (figuras 5.3 y 5.25). Así, la corriente inducida establece un campo magnético en la espira, y ésta funciona como un imán recto, cuya polaridad se opone al movimiento del imán recto real (figura 6.8). Trate de demostrar que si el imán recto se aleja de la espira, ésta ejerce una atracción magnética, para evitar que el imán se aleje: es la inercia electromagnética en acción.

Si se sustituye la ecuación 6.1 para el flujo magnético (Φ) en la ecuación 6.2, se obtiene

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{N \Delta (BA \cos \theta)}{\Delta t} \tag{6.3}$$

Por consiguiente, se produce una fem inducida si

1. cambia la intensidad del campo magnético,
2. cambia el área de la espira, y/o
3. cambia el ángulo entre el área de la espira y la dirección del campo.

En el caso 1, se produce un cambio de flujo a causa de un campo magnético variable en el tiempo, como el que se puede obtener de una corriente variable en el tiempo, en un circuito cercano, o al acercar un imán a una bobina, como en la figura 6.1 (o al acercar la bobina al imán).

En el caso 2, se produce un cambio de flujo a causa de un área de espira variable. Esto ocurre si una espira tiene circunferencia ajustable (como una espira que rodea a un globo al inflarlo; véase el ejercicio 23).

Por último, en el caso 3, se produce un cambio de flujo como resultado de un cambio en la orientación de la espira. Este caso se presenta cuando gira una bobina en un campo magnético. Es evidente el cambio en la cantidad de líneas de campo que atraviesan a la espira en las secuencias de la figura 6.4. La rotación de una bobina dentro de un campo magnético es una forma frecuente de inducir una fem, y se explicará por separado en el apartado 6.2. Las fem producidas al cambiar la intensidad del campo y el área de la espira se analizan en los dos ejemplos siguientes. (Véase también la sección A fondo 6.1, en la p. 162, en torno a algunas aplicaciones de la inducción electromagnética en relación con la lucha antiterrorista y con su contribución para hacer nuestra vida más fácil y segura.)

Ejemplo conceptual 6.2 ■ Campos en los campos: la inducción electromagnética

En las áreas rurales donde las líneas de transmisión eléctrica pasan en camino a las grandes ciudades, es posible generar pequeñas corrientes eléctricas mediante la inducción en una espira conductora. Las líneas aéreas conducen corrientes alternas relativamente grandes, que invierten su dirección 60 veces por segundo. ¿Cómo debería orientarse el plano de la espira para maximizar la corriente inducida, si las líneas eléctricas van de norte a sur? a) De forma paralela a la superficie del terreno, b) perpendicular a la superficie del terreno, en dirección norte-sur o c) perpendicular a la superficie del terreno, en dirección este-oeste. (Véase la figura 6.9a.)

Razonamiento y respuesta. Las líneas de campo magnético que se originan en conductores largos tienen forma circular. (Véase la figura 5.23.) Según la regla de la mano derecha para fuentes, la dirección del campo magnético a nivel del terreno es paralela a la superficie del mismo, pero alterna su dirección. Las opciones de orientación se muestran en la figura 6.9b. Ni la respuesta a ni la c son correctas, porque en esas orientaciones *nunca* habrá flujo magnético que pase por la espira. En este caso, el flujo sería constante y no habría fem inducida. Por consiguiente, la respuesta correcta es la b. Si la espira está orientada perpendicularmente a la superficie terrestre, con su plano en la dirección norte-sur, el flujo que la atraviesa variaría de cero hasta su valor máximo, y de regreso, 60 veces por segundo; esto maximiza la fem inducida y la corriente en la espira.

Ejercicio de refuerzo. Sugiera formas posibles de aumentar la corriente inducida en este ejemplo, cambiando sólo las propiedades de la espira y no de los cables aéreos.

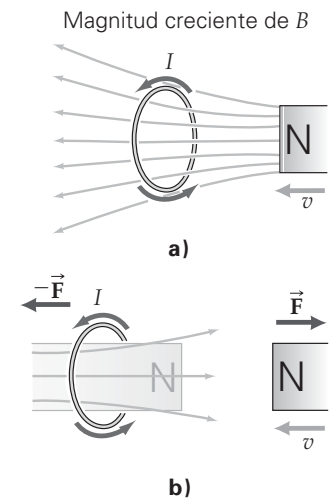
Ejemplo 6.3 ■ Corrientes inducidas: ¿riesgo potencial para los equipos?

Los instrumentos eléctricos se pueden dañar si hay un campo magnético que cambie con rapidez. Esto ocurre cuando un instrumento está cerca de un electroimán que funcione con corriente alterna; es posible que el campo externo del electroimán produzca un flujo magnético variable dentro de un instrumento cercano. Si las corrientes inducidas son suficientemente fuertes, podrían dañar el instrumento. Considere una bocina de una computadora que está cerca de ese electroimán (véase la figura 6.10, p. 160). Suponga que el electroimán expone a la bocina a un campo magnético máximo de 1.00 mT, que invierte su dirección cada 1/120 s.

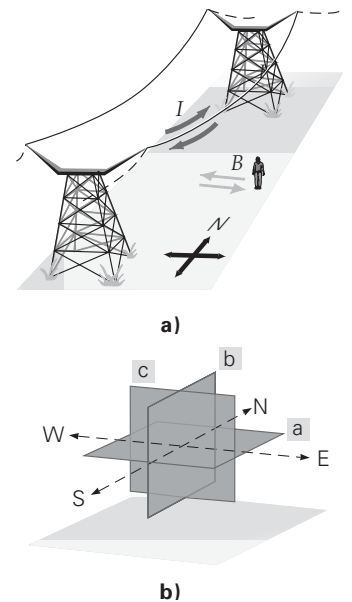
Suponga que la bobina del altavoz tiene 100 vueltas circulares de alambre (cada una de 3.00 cm de radio) y que su resistencia total es de 1.00 Ω . De acuerdo con el fabricante de la bocina, la corriente que pase por la bobina no debe exceder 25.0 mA. a) Calcule la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina durante el intervalo de 1/120 s. b) ¿es probable que la corriente inducida dañe la bobina de la bocina?

Razonamiento. a) El flujo pasa de un valor (máximo) positivo hasta un valor (máximo) negativo, en 1/120 s. El cambio de flujo magnético se determina utilizando la ecuación 6.1, con $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 180^\circ$. La fem promedio inducida se calcula entonces con la ecuación 6.2. b) Una vez conocida la fem, se calcula la corriente inducida con $I = \mathcal{E}/R$.

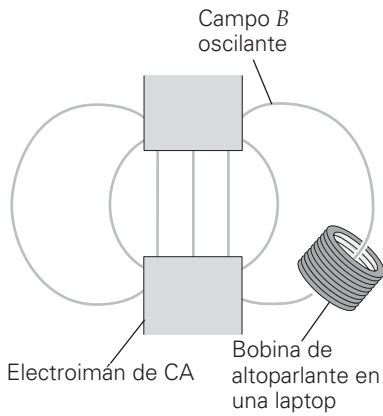
(continúa en la siguiente página)



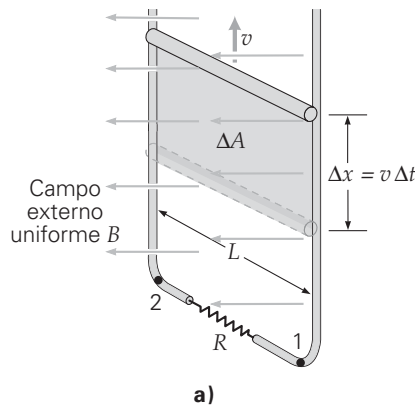
▲ FIGURA 6.8 Descripción de la ley de Lenz en función de fuerzas a) Si el extremo norte de un imán recto se acerca con rapidez a una espira de alambre, se induce en ella la corriente en la dirección que se indica. b) Mientras existe la corriente inducida, la espira funciona como un pequeño imán recto con su “polo norte” cercano al extremo norte del imán real. Por consiguiente, hay una repulsión magnética. Es una forma alternativa de visualizar la ley de Lenz: inducir una corriente para tratar de evitar que cambie el flujo; en este caso, se trata de mantener alejado el imán y de mantener el valor inicial del flujo, es decir, cero.



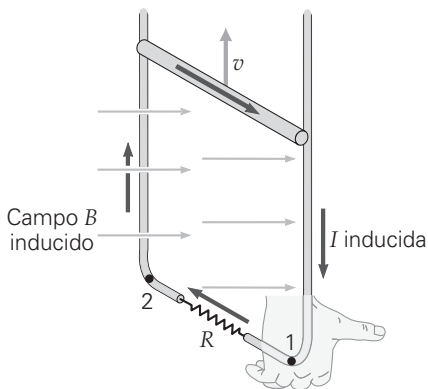
▲ FIGURA 6.9 Fem inducidas debajo de las líneas de transmisión a) Si las líneas eléctricas tienen la dirección norte-sur, entonces, directamente por debajo de la corriente alterna se produce un campo magnético que oscila entre este y oeste. b) Hay tres opciones para orientar la espira en el Ejemplo conceptual 6.2.



▲ FIGURA 6.10 ¿Riesgo para los instrumentos? La bobina de un sistema de altoparlante en una computadora se coloca cerca de un electroimán con corriente alterna. El flujo variable en la bobina produce una fem inducida y, en consecuencia, una corriente inducida que depende de la resistencia de la bobina. Véase el ejemplo 6.3.



a)



b)

▲ FIGURA 6.11 Fem de movimiento a) Cuando se tira de la varilla metálica en el marco metálico, el área del circuito rectangular varía en el tiempo. Se induce en el circuito una corriente como resultado del flujo que cambia. b) Para contrarrestar el aumento de flujo hacia la izquierda, una corriente inducida debe crear un campo magnético hacia la derecha. Véase el Ejemplo integrado 6.4.

Solución. Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI,

Dado $B_i = +1.00 \text{ mT} = +1.00 \times 10^{-3} \text{ T}$ **Encuentre:** a) \mathcal{E} (magnitud de la fem promedio inducida)
 + en una dirección
 $B_f = -1.00 \text{ mT} = -1.00 \times 10^{-3} \text{ T}$ b) I (magnitud de la corriente promedio inducida)
 (en dirección contraria)
 $\Delta t = 1/120 \text{ s} = 8.33 \times 10^{-3} \text{ s}$
 $N = 100$ vueltas
 $R = 1.00 \Omega$
 $r = 3.00 \text{ cm} = 3.00 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $I_{\text{máx}} = 25.0 \text{ mA} = 2.50 \times 10^{-2} \text{ A}$

a) El área de la espira circular es $A = \pi r^2 = \pi(3.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Entonces, el flujo inicial que atraviesa una espira es (véase la ecuación 6.1):

$$\Phi_i = B_i A \cos \theta = (1.00 \times 10^{-3} \text{ T})(2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{vuelta})(\cos 0^\circ) = 2.83 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

/vuelta

Como el flujo final es el negativo de esto, el cambio de flujo a través de una espira es

$$\Delta \Phi = \Phi_f - \Phi_i = -\Phi_i - \Phi_i = -2\Phi_i = -5.66 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{vuelta}$$

Por consiguiente, la fem promedio inducida es (según la ecuación 6.2)

$$\mathcal{E} = N \frac{|\Delta \Phi|}{\Delta t} = (100 \text{ vueltas}) \left(\frac{5.66 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{vuelta}}{8.33 \times 10^{-3} \text{ s}} \right) = 6.79 \times 10^{-2} \text{ V}$$

b) Este voltaje es pequeño, en relación con los que se presentan en la vida cotidiana, pero tome en cuenta que también la resistencia de la bobina es pequeña. Para determinar la corriente inducida en la bobina, se utiliza la relación entre voltaje, resistencia y corriente:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{6.79 \times 10^{-2} \text{ V}}{1.00 \Omega} = 6.79 \times 10^{-2} \text{ A} = 67.9 \text{ mA}$$

Este valor excede la corriente permitida de 25.0 mA para la bobina, por lo que es probable que la bobina resulte dañada.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si se alejaron la bobina del altoparlante y el imán, podría llegarse a un punto en el que la corriente promedio estuviera por debajo del nivel “peligroso” de 25.0 mA. Calcule la intensidad del campo magnético $B_{\text{máx}}$ en este punto.

Como un caso especial, es posible inducir fem y corrientes en conductores conforme éstos se mueven a través de un campo magnético. En esta situación, la fem inducida se llama *fem de movimiento*. Para ver cómo funciona esto, considere la situación en la figura 6.11a. Conforme la barra se mueve hacia arriba, el área del circuito aumenta por $\Delta A = L\Delta x$ (figura 6.11a). A rapidez constante, la distancia recorrida por la barra en un tiempo Δt es $\Delta x = v\Delta t$. Por consiguiente, $\Delta A = Lv\Delta t$. El ángulo (θ) entre el campo magnético y la normal al área siempre es 0° . Pero el área cambia, de manera que el flujo varía. Sin embargo, se sabe que $\Phi = BA \cos 0^\circ = BA$; por eso, podemos escribir $\Delta \Phi = B\Delta A$ o $\Delta \Phi = BLv\Delta t$. Por consiguiente, a partir de la ley de Faraday, la magnitud de esta fem “de movimiento” (inducida), \mathcal{E} , es $|\mathcal{E}| = |\Delta \Phi|/\Delta t = BLv\Delta t/\Delta t = BLv$. Ésta es la idea fundamental detrás de la generación de energía eléctrica: mover un conductor en un campo magnético y convertir el trabajo realizado en energía eléctrica. Para conocer más detalles al respecto, considere el siguiente Ejemplo integrado.

Ejemplo integrado 6.4 ■ La esencia de la generación de energía eléctrica: conversión de trabajo mecánico en corriente eléctrica

Considere la situación de la figura 6.11a. Una fuerza externa efectúa trabajo cuando la barra móvil se mueve hacia arriba, y este trabajo se convierte en energía eléctrica. Como el “circuito” (conductores, resistor y barra) está dentro de un campo magnético, el flujo que lo atraviesa cambia con el tiempo induciendo una corriente. a) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el resistor? 1) de 1 a 2 o 2) de 2 a 1. b) Si la barra mide 20 cm de longitud y se mueve con una rapidez constante de 10 cm/s, ¿cuál será la corriente inducida si el valor de la resistencia es de 5.0Ω y el circuito se encuentra en un campo magnético uniforme de 0.25 T ?

a) Razonamiento conceptual. Como se observa en la figura 6.11a, el flujo magnético se dirige hacia la izquierda y se incrementa. Según la ley de Lenz, el campo que se origina por la corriente inducida debe dirigirse hacia la derecha. Al aplicar la regla de la mano derecha para la corriente inducida se ve que ésta va de 1 a 2 (figura 6.11b), así que la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. El cambio de flujo se debe a un cambio de área conforme la barra se mueve hacia arriba. El análisis para fem de movimiento se expuso en la página anterior. Por último, una vez que se encuentra la fem de movimiento, es posible calcular la corriente utilizando la ley de Ohm.

Se listan los datos y se hace la conversión a unidades SI:

Dado: $B = 0.25 \text{ T}$

$L = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$

$v = 10 \text{ cm/s} = 0.10 \text{ m/s}$

$R = 5.0 \Omega$

Encuentre: la corriente inducida en el resistor

En la página anterior, se demostró que la magnitud de la fem inducida \mathcal{E} se determina mediante BLv , de forma que numéricamente se tiene:

$$|\mathcal{E}| = BLv = (0.25 \text{ T})(0.20 \text{ m})(0.10 \text{ m/s}) = 5.0 \times 10^{-3} \text{ V}$$

Por lo tanto, la corriente inducida es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{5.0 \times 10^{-3} \text{ V}}{5.0 \Omega} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Es evidente que este arreglo no es una forma práctica de generar grandes cantidades de energía eléctrica. Aquí, la potencia disipada en el resistor es apenas $5.0 \times 10^{-6} \text{ W}$. (Verifique esto.)

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si se aumentara tres veces el campo magnético y el ancho de la barra fuera de 45 cm, ¿cuál debería ser la rapidez de esta última para generar una corriente inducida de 0.1 A?

6.2 Generadores eléctricos y contra fem

OBJETIVOS: a) Comprender el funcionamiento de los generadores eléctricos y calcular la fem producida por un generador de ca y b) explicar el origen de la contra fem y su efecto sobre el comportamiento de los motores.

Un método para inducir una fem en una espira es cambiando la orientación de esta última en su campo magnético (figura 6.4). Éste es el principio operativo detrás de los generadores eléctricos.

Generadores eléctricos

Un *generador eléctrico* es un aparato que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En esencia, la función de un generador es contraria a la de un motor.

Una batería suministra corriente directa (cd). Esto es, la polaridad del voltaje (y la dirección de la corriente) no cambia. Sin embargo, la mayoría de los generadores producen *corriente alterna* (ca), que se llama así porque la polaridad del voltaje (y la dirección de la corriente) cambia de forma periódica. Así, la energía eléctrica que se usa en los hogares y en la industria se entrega en forma de voltaje y corriente alternos.

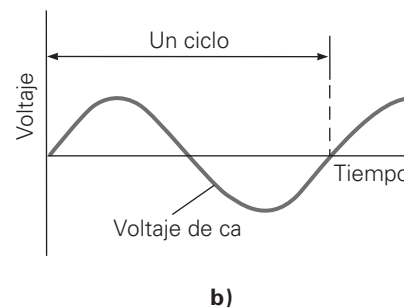
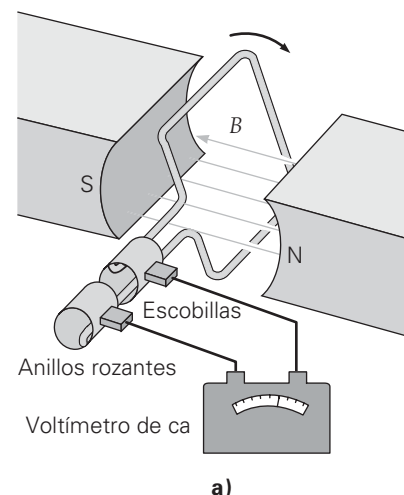
Un **generador de ca** se conoce también como *alternador*. En la figura 6.12 se ilustran los elementos de un generador sencillo de ca. Una espira de alambre, llamada *armadura*, se hace girar mecánicamente dentro de un campo magnético, con propulsión externa, por ejemplo, mediante vapor o una corriente de agua que pasa por los álabes de una turbina. Por su parte, la rotación de los álabes provoca la rotación de la espira. Esto hace que cambie el flujo magnético que atraviesa la espira, y en esta última se induce una fem. Los extremos de la espira se conectan a un circuito externo mediante anillos rozantes y escobillas. En este caso, las corrientes inducidas se incorporarán a ese circuito. En la práctica, los generadores tienen muchas espiras, o devanados, en sus armaduras.

Cuando la espira se hace girar con una rapidez angular (ω) constante, el ángulo (θ) que forman los vectores del campo magnético y del área de la espira cambia con el tiempo: $\theta = \omega t$ (suponiendo que $\theta = 0^\circ$ cuando $t = 0$). Resulta entonces que la cantidad de líneas de campo que pasan por la espira cambia con el tiempo, causando una fem inducida. De acuerdo con la ecuación 6.1, el flujo (para una espira) varía como sigue:

$$\Phi = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

A partir de esto, se observan que la fem inducida también varía en función del tiempo. Para una bobina giratoria de n espiras, la ley de Faraday es

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -NBA \left(\frac{\Delta (\cos \omega t)}{\Delta t} \right)$$



▲ FIGURA 6.12 Un generador sencillo de ca a) La rotación de una espira de alambre en un campo magnético produce b) una salida de voltaje cuya polaridad se invierte cada medio ciclo. Este voltaje alterno se recoge mediante anillos rozantes y escobillas, como se ilustra.

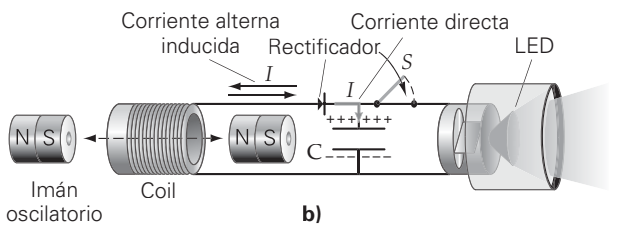
A FONDO

6.1 LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL TRABAJO: LINTERNAS Y ANTITERRORISMO

En nuestra vida diaria, utilizamos la inducción electromagnética de muchas formas, sin ser conscientes de ello en la mayor parte de los casos. Un invento reciente es la linterna que funciona sin baterías (figura 1a). Al agitar la linterna, un fuerte imán permanente en su interior oscila a través de las bobinas, induciendo una fem y una corriente oscilatorias. Para cargar el condensador, la corriente alterna debe *rectificarse* en una corriente directa y no cambiar de dirección. Un esquema de este tipo de linternas se presenta en la figura 1b. Aquí, un circuito rectificador de estado sólido (símbolo triangular) actúa como una “válvula de corriente en un sentido”. En este diagrama, sólo la corriente directa que tiene el sentido de las manecillas del reloj llega al condensador para cargarlo. Después de aproximada-



a)



b)

FIGURA 1 Una linterna sin baterías **a)** Una fotografía de un tipo relativamente nuevo de linterna, que emite luz utilizando la energía eléctrica que se genera al agitarla (inducción). **b)** Un esquema de la linterna mostrada en el inciso **a)**. Cuando se agita la linterna, su imán permanente interno pasa a través de una bobina, induciendo una corriente. Esta última cambia su dirección (¿por qué?) y, por lo tanto, necesita convertirse (o “rectificarse”) en cd antes de que pueda cargar un condensador. Una vez que el condensador está cargado por completo, es capaz de generar una corriente a través de un diodo emisor de luz (LED), que, a la vez, emite luz durante varios minutos.

mente un minuto, el condensador se carga por completo. Cuando el interruptor S se enciende, el condensador se descarga a través de un eficiente *diodo emisor de luz* (LED, por sus siglas en inglés). El haz de luz resultante dura varios minutos antes de que la linterna deba volverse a agitar. Este dispositivo podría, por lo menos, desempeñar un papel importante como respaldo de las linternas tradicionales que necesitan baterías.

En los sistemas de seguridad de los aeropuertos, la inducción se utiliza para evitar que alguien introduzca en las aeronaves objetos metálicos peligrosos (como cuchillos y armas). Cuando un pasajero camina por debajo del arco de un detector de metales en un aeropuerto (véase la figura 2), una serie de largas corrientes “punzantes” llega con cierta periodicidad a una bobina (solenoides) en uno de los lados no magnetizados. En el sistema más común, llamado IP (*inducción pulsada*), estas corrientes se registran cientos de veces por segundo. Cuando la corriente se eleva y decae, se crea un campo magnético variable en el pasajero. Si este último no lleva consigo objetos metálicos, no habrá corriente inducida significativa, ni tampoco campo magnético inducido. Sin embargo, si el pasajero porta algún objeto metálico, se inducirá una corriente en ese objeto, lo que, a la vez, producirá su propio campo magnético (inducido) que podrá ser registrado por la bobina de emisión, esto es, se producirá un “eco magnético”. Dispositivos electrónicos complejos miden el eco de la fem inducida y activan una luz de advertencia para indicar que es necesaria una inspección más minuciosa del pasajero.



FIGURA 2 Inspección en los aeropuertos Cuando los pasajeros caminan por debajo del arco, se someten a una serie de pulsos de campo magnético. Si llevan consigo algún objeto metálico, las corrientes inducidas en ese objeto crean su propio “eco” de campo magnético que, al ser detectado, da aviso a los inspectores de que es necesaria una revisión más minuciosa del pasajero.

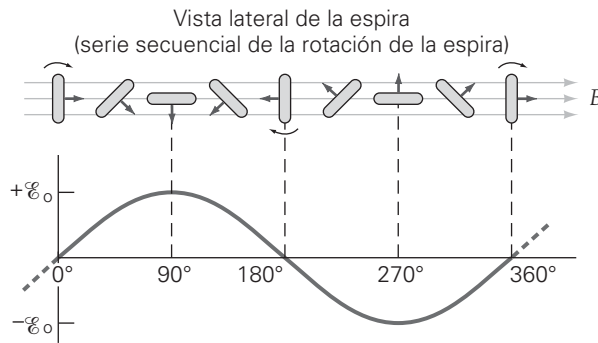
En esta ecuación se han separado B y A de la variación con el tiempo, porque son constantes. Aplicando métodos que están más allá de los objetivos de este libro, es posible demostrar que la fem inducida se expresa como sigue:

$$\mathcal{E} = (NBA\omega) \text{ sen } \omega t$$

Observe que el producto de los términos $NBA\omega$ representa la magnitud de la fem máxima, que se presenta siempre que $\text{sen } \omega t = \pm 1$. Si se sustituye $NBA\omega$ por \mathcal{E}_0 , el valor máximo de la fem, entonces la ecuación anterior se puede replantear de una forma más compacta

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \text{ sen } \omega t \quad (6.4)$$

Como el valor de la función seno varía entre ± 1 , la polaridad de la fem cambia al paso del tiempo (► figura 6.13). Observe que la fem tiene su valor máximo \mathcal{E}_0 cuando $\theta = 90^\circ$ o cuando $\theta = 270^\circ$. Esto es, en los instantes en que el plano de la espira es paralelo al campo y el flujo magnético es cero, la fem alcanzará su valor máximo (en mag-



◀ **FIGURA 6.13** La salida de un generador de ca. Gráfica de la salida senoidal de un generador, junto con una vista lateral de las orientaciones correspondientes de la espira durante un ciclo; se ve la variación del flujo en el tiempo. La fem es máxima cuando el flujo cambia con más rapidez, conforme pasa por cero y cambia de signo.

nitud). El *cambio* de flujo es máximo en esos ángulos, porque aunque el flujo sea cero momentáneamente, cambia con rapidez ante un cambio de *signo*. Cerca de los ángulos que producen el valor máximo del flujo ($\theta = 0^\circ$ o $\theta = 180^\circ$), ese flujo permanece aproximadamente constante y, por consiguiente, la fem inducida es cero en esos ángulos.

La dirección de la corriente producida por esta fem alterna inducida también cambia de forma periódica. En las aplicaciones cotidianas es común referirse a la frecuencia (f) de la armadura [en hertz (Hz) o rotaciones por segundo] y no la frecuencia angular (ω). Como se relacionan mediante la ecuación $\omega = 2\pi f$, la ecuación 6.4 se reformula como

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \text{sen}(2\pi ft) \quad \text{fem del alternador} \quad (6.5)$$

La frecuencia de la ca en Estados Unidos y en la mayor parte del hemisferio occidental es de 60 Hz. En Europa y en otros lugares lo común son 50 Hz.

Tome en cuenta que las ecuaciones 6.4 y 6.5 definen el valor instantáneo de la fem, y que \mathcal{E} varía entre $+\mathcal{E}_0$ y $-\mathcal{E}_0$ durante la mitad de un periodo rotacional de la armadura (en Estados Unidos, 1/120 de segundo). En la práctica, para los circuitos eléctricos, son más importantes los valores promedio de voltaje y corriente de la ca, respecto al tiempo. Para ver cómo influyen los diversos factores sobre la salida de un generador, examinaremos con detalle el siguiente ejemplo. Además, véase la sección A fondo 6.2 de la p. 164, para conocer cómo es que la inducción electromagnética participa en un pasatiempo interesante y cómo contribuye a generar la energía eléctrica que necesitan los automóviles híbridos para brindar un sistema de transporte más eficiente desde el punto de vista del consumo de combustible.

Ejemplo 6.5 ■ Un generador de ca: energía eléctrica renovable

Un agricultor decide usar una caída de agua para construir una pequeña planta hidroeléctrica. Fabrica una bobina de alambre con 1500 vueltas, cada una de 20 cm de radio, que giran sobre la armadura del generador, a 60 Hz, dentro de un campo magnético. Para obtener un voltaje efectivo (rms) de 120 V, debe generar una fem máxima de 170 V. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el generador que se necesita para que esto ocurra?

Razonamiento. Se puede calcular el campo magnético con la ecuación de \mathcal{E}_0 .

Solución.

Dado: $\mathcal{E}_0 = 170 \text{ V}$ **Encuentre:** la magnitud del campo magnético (B)
 $N = 1500$ vueltas
 $r = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$
 $f = 60 \text{ Hz}$

La fem máxima (o pico) del generador se determina con $\mathcal{E}_0 = NBA\omega$. Como $\omega = 2\pi f$ y, para un círculo, $A = \pi r^2$, esta ecuación se transforma en

$$\mathcal{E}_0 = NB(\pi r^2)(2\pi f) = 2\pi^2 NBr^2 f$$

De aquí se despeja B y se obtiene

$$B = \frac{\mathcal{E}_0}{2\pi^2 N r^2 f} = \frac{170 \text{ V}}{2\pi^2 (1500)(0.20 \text{ m})^2 (60 \text{ Hz})} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, suponga que el agricultor desea generar una fem con un valor rms de 240 V, para lo cual se requiere una fem máxima de 340 V. Si lo hiciera cambiando el tamaño de las espiras, ¿cuál tendría que ser el nuevo radio?

A FONDO

6.2 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN ACCIÓN: PASATIEMPOS Y TRANSPORTACIÓN



FIGURA 1 Un detector de metales de dos bobinas En esta fotografía se distinguen las dos bobinas: la transmisora (exterior, de mayor tamaño) y la receptora (interna y más pequeña).

La inducción electromagnética desempeña un papel importante en nuestras actividades de ocio y en la transportación. Algunas personas emplean detectores de metales para encontrar “tesoros enterrados” de metal. Un diseño común consiste en dos bobinas

de alambre en el extremo de un eje que se utiliza para hacer un barrido justo por encima del suelo (véase la figura 1). En el extremo por el que se sostiene el aparato, existen piezas electrónicas que permiten desplegar la información acerca de los artículos encontrados. La bobina externa, o *transmisora*, contiene una corriente oscilatoria de varios miles de hertz, que crea un campo magnético en constante cambio en el terreno que hay debajo. (Por lo general, es capaz de penetrar una distancia de un pie por debajo de la superficie, dependiendo del tipo de suelo y de sus condiciones.) Si no hay objetos metálicos dentro de su campo oscilatorio, no se inducirán corrientes significativas. Por consiguiente, la bobina interna, o *receptora*, no detectará el “eco” de un campo magnético inducido. Sin embargo, si se encuentra un objeto metálico, la corriente inducida en él generará un eco (campo) magnético que la bobina receptora detectará como una fem y una corriente inducidas. Por medio de un avanzado software de computadora para evaluar la intensidad de la señal inducida, podrá estimarse la profundidad y composición química del objeto.

Por otra parte, el precio a la alza de la gasolina ha hecho que muchos conductores opten por los automóviles híbridos, que funcionan con *gasolina y electricidad*, y cuyo motor es mucho más pequeño que el de los auto convencionales. Además, para ayudar al impulso, por lo menos parte del trabajo del motor híbrido consiste en suministrar energía eléctrica (a través de la induc-

ción en un generador) a las baterías y a un motor eléctrico, el cual, por su parte, suministrará potencia a las ruedas. Así, es posible obtener más trabajo a partir de un galón de gasolina.

Un esquema de un automóvil híbrido típico se presenta en la figura 2a. En la actualidad, existen dos tipos de diseño de automóviles híbridos: en paralelo y en serie. En la configuración *híbrida en paralelo* (figura 2b), el motor de gasolina está conectado a las ruedas por medio de una transmisión estándar. Sin embargo, también se convierte en un generador que, a través de la inducción, crea y suministra energía eléctrica para cargar las baterías y/o para operar el motor eléctrico. El motor eléctrico está conectado a las ruedas a través de su propio sistema de transmisión, de ahí el nombre de *híbrido en paralelo*, pues el motor de gasolina y el eléctrico trabajan juntos, es decir, en paralelo. Los modelos *híbridos por completo* son capaces de mover el automóvil ya sea con uno de los dos motores por sí solo (para un ahorro máximo de combustible, por ejemplo, mientras se transita por una autopista con rapidez constante) o con ambos al mismo tiempo (cuando se requiere de mayor potencia, por ejemplo, al acelerar en una autopista).

De manera alternativa, los motores pueden conectarse en serie; se trata entonces de automóviles *híbridos en serie*. En este caso, el motor eléctrico es lo que en realidad da potencia a las ruedas (figura 2c). El trabajo del motor de gasolina consiste en suministrar energía eléctrica (a través de la inducción en su generador) a las baterías y al motor eléctrico. Si las baterías están cargadas por completo y el motor funciona adecuadamente, el motor de gasolina podrá reducir su actividad o incluso apagarse. Con aceleraciones frecuentes, cuando se requiere una salida de elevada potencia por parte del motor eléctrico, las baterías se agotarán rápidamente. En estas condiciones, el sistema electrónico de potencia hace que el motor de gasolina comience a generar energía eléctrica para recargar las baterías.

Los automóviles híbridos, a diferencia de los vehículos eléctricos por completo, nunca tienen que “enchufarse”, pues obtienen toda su energía de la combustión de gasolina. Sin embargo, son mucho más eficientes y, por consiguiente, mucho menos contaminantes que los automóviles convencionales. Algunos modelos recientes emplean motores híbridos que son capaces de dar mayor potencia que sus contrapartes que funcionan sólo con gasolina. Por estas razones, es probable que los motores híbridos sean la elección de muchos conductores en el futuro cercano.

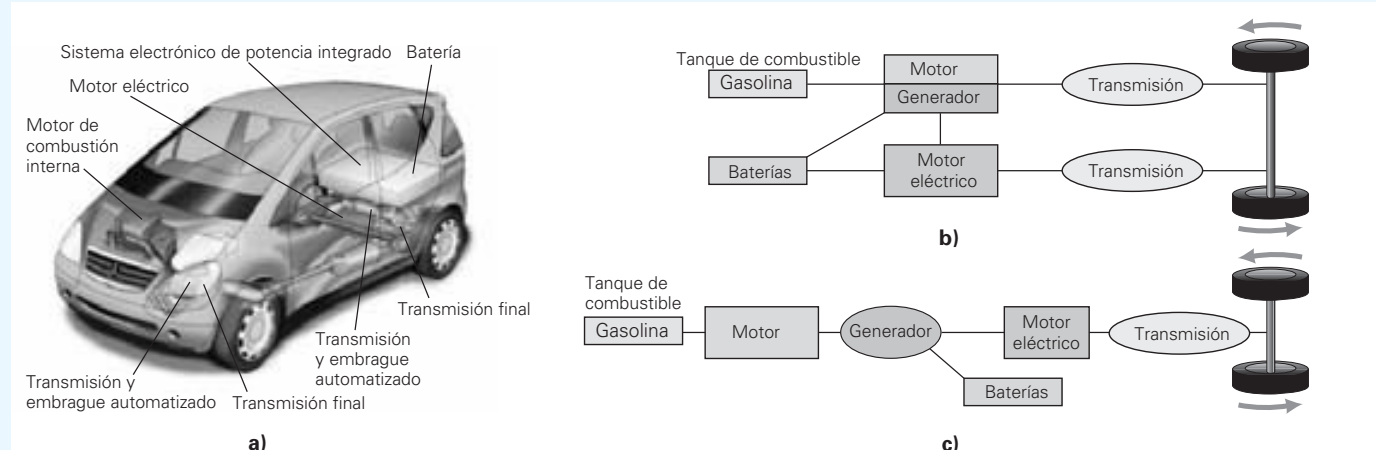
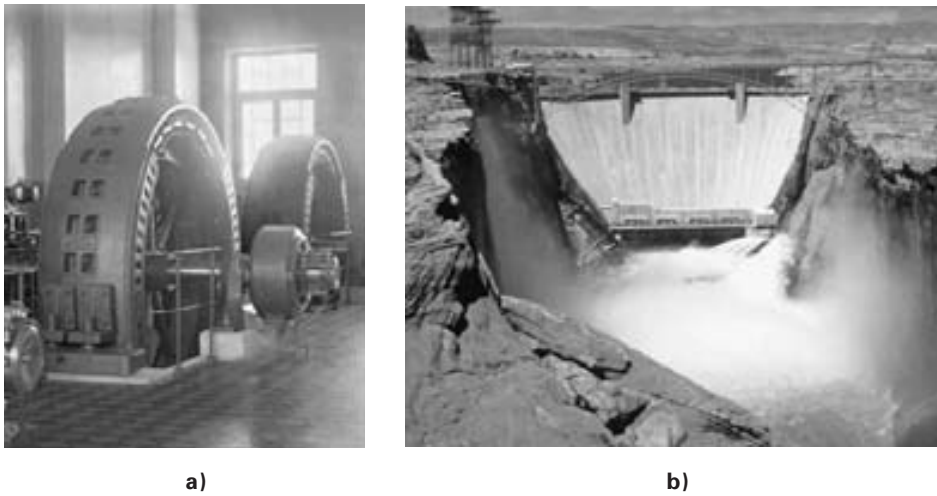


FIGURA 2 Automóviles híbridos a) Corte esquemático de un vehículo híbrido moderno. b) Diagrama de los sistemas principales de un híbrido en paralelo. c) Diagrama de los sistemas principales de un híbrido en serie.



◀ **FIGURA 6.14** Generación eléctrica *a)* Turbinas como las que se ven aquí generan energía eléctrica en cantidades mucho mayores que la planta hidroeléctrica de la fotografía inicial de este capítulo *b)* La energía potencial gravitacional del agua, almacenada detrás de la cortina de la presa Glen Canyon en el Río Colorado, en Arizona, se convierte en energía eléctrica.

En la mayor parte de los generadores de ca en gran escala (las plantas o centrales eléctricas), en realidad la armadura es estacionaria y los imanes giran en torno a ella. El campo magnético giratorio produce un flujo, variable en el tiempo, a través de las bobinas de la armadura, y por consiguiente producen ca. Una turbina suministra la energía mecánica necesaria para hacer girar los imanes en el generador (▲figura 6.14a). Por lo general, las turbinas se mueven con el vapor que se produce a partir de la combustión de combustibles fósiles, o con el calor generado en procesos de fisión nuclear; aunque existen otras que son impulsadas por caídas de agua (*hidroelectricidad*), como se ve en la figura 6.14b. Así, la diferencia básica entre los diversos tipos de centrales eléctricas es la fuente de la energía que hace girar a las turbinas.

Contra fem

Aunque su tarea principal es convertir la energía eléctrica en energía mecánica, los motores también generan fem de forma simultánea. Al igual que un generador, un motor tiene una armadura giratoria dentro de un campo magnético. En este caso, la fem inducida se llama **fuerza contraelectromotriz** (o *contra fem*) \mathcal{E}_b , porque su dirección es opuesta a la del voltaje en la línea, y tiende a reducir la corriente en las bobinas de la armadura.

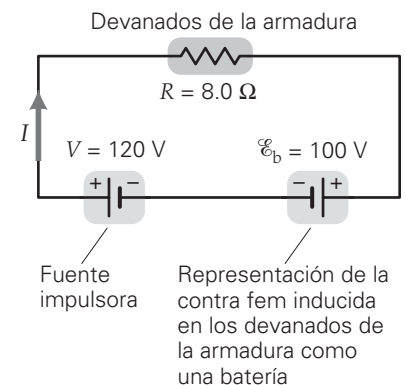
Si V es el voltaje en la línea, entonces el voltaje neto que impulsa al motor es menor que V (porque el voltaje en la línea y la fuerza contraelectromotriz tienen polaridad opuesta). El voltaje neto es entonces $V_{\text{neto}} = V - \mathcal{E}_b$. Si la armadura de un motor tiene una resistencia interna de R , la corriente que extrae el motor mientras está en operación es $I = V_{\text{neto}}/R = (V - \mathcal{E}_b)/R$ o, despejando para la contra fem,

$$\mathcal{E}_b = V - IR \quad (\text{contra fem en un motor}) \quad (6.6)$$

donde V es el voltaje en la línea.

La contra fem en un motor depende de la rapidez de rotación de su armadura, y se incrementa desde cero hasta algún valor máximo conforme la armadura pasa del reposo hasta su rapidez normal de funcionamiento. En el arranque, la contra fem es cero (¿por qué?), de manera que la corriente de arranque es máxima (ecuación 6.6, donde $\mathcal{E}_b = 0$). Por lo regular, un motor hace mover algo; esto es, tiene una carga mecánica. Sin carga, la rapidez de la armadura aumenta hasta que la contra fem casi es igual al voltaje de la línea. El resultado es que pasa una corriente pequeña en las bobinas, justo la suficiente para vencer la fricción y las pérdidas por calentamiento de joule. En las condiciones normales con carga, la contra fem es menor que el voltaje en la línea. Cuanto mayor sea la carga, más despacio girará el motor y menor será la contra fem. Si un motor está sobrecargado y gira muy despacio, la contra fem se reduce tanto que la corriente se hace muy grande (porque V_{neto} aumenta conforme \mathcal{E}_b disminuye) y puede quemar las bobinas. Así, la contra fem desempeña un papel vital en la regulación del funcionamiento del motor, limitando la corriente que pasa por él.

De forma esquemática, una contra fem en un circuito de motor de cd se representa como una “batería inducida” cuya polaridad es opuesta a la del voltaje impulsor (►figura 6.15). Para ver cómo es que la contra fem determina la corriente que pasa por un motor, veamos el siguiente ejemplo.



▲ **FIGURA 6.15** Contra fem La contra fem en la armadura de un motor de cd se puede representar como una batería de polaridad opuesta a la de la fuente impulsora.

Un transformador sencillo consiste en dos bobinas de alambre aislado devanadas en el mismo núcleo de hierro (►figura 6.16a). Cuando se aplica un voltaje de ca a la bobina de entrada, o *bobina primaria* (también llamada *devanado primario* o simplemente *primario*), la corriente alterna produce un flujo magnético alterno que se concentra en el núcleo de hierro, sin que haya fugas significativas. Así, en esas condiciones, el mismo flujo cambiante pasa también por la bobina de salida, o *bobina secundaria* (también llamada *devanado secundario* o simplemente *secundario*), induciendo en ésta un voltaje y una corriente alternos. (Note que en el diseño de transformadores se acostumbra llamar “voltajes” a las fem, como se hizo en el capítulo 4. También aquí usaremos este lenguaje.)

La razón entre el voltaje inducido en la bobina secundaria y el voltaje en la bobina primaria depende de la relación entre las cantidades de vueltas en una y otra. Según la ley de Faraday, el voltaje inducido en la bobina secundaria es

$$V_s = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

donde N_s es la cantidad de vueltas en la bobina secundaria. El flujo variable en la bobina primaria produce una contra fem de

$$V_p = -N_p \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

donde N_p es la cantidad de vueltas en la bobina primaria. Si no se tiene en cuenta la resistencia de esta última, la contra fem tiene una magnitud igual a la del voltaje externo aplicado a la bobina primaria (¿por qué?). Entonces, si se determina la razón entre el voltaje de salida (secundario) y el voltaje de entrada (primario) se obtiene

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{-N_s(\Delta\Phi/\Delta t)}{-N_p(\Delta\Phi/\Delta t)}$$

o

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (\text{razón de voltaje en un transformador}) \quad (6.7)$$

Si se supone que el transformador tiene un 100% de eficiencia, es decir, que no se pierde energía en él, entonces la potencia que entra es igual a la potencia que sale. Como $P = IV$, entonces

$$I_p V_p = I_s V_s \quad (6.8)$$

Aunque siempre se pierde algo de energía, esta ecuación es una buena aproximación, ya que un transformador bien diseñado puede tener una eficiencia mayor del 95%. (Más adelante describiremos las causas de las pérdidas de energía.) En este caso ideal y de acuerdo con la ecuación 6.8, las corrientes y los voltajes en el transformador son función de la relación de vueltas, lo que se expresa como

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (6.9)$$

Para resumir la acción del transformador en función de las salidas de voltaje y de corriente, tenemos que

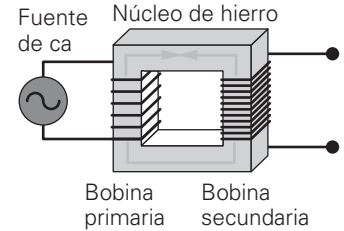
$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p \quad (6.10a)$$

e

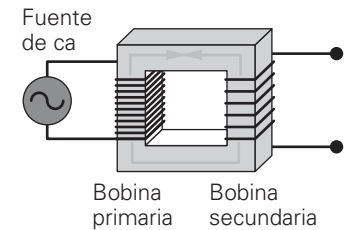
$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p \quad (6.10b)$$

Si el devanado secundario tiene más vueltas que el primario (es decir, si $N_s/N_p > 1$), como en la figura 6.16a, el voltaje “sube”, ya que $V_s > V_p$. Este diseño se llama *transformador de subida*. Advierta que a causa de esto, hay *menos* corriente en el devanado secundario que en el primario ($N_p/N_s < 1$ e $I_s < I_p$).

Si el devanado secundario tiene menos vueltas que el primario, se tiene un *transformador de bajada* (figura 6.16b). En el lenguaje de los transformadores, esto significa que el voltaje “baja” y, por consiguiente, la corriente aumenta. Dependiendo de los detalles del diseño, se puede usar un transformador de subida como transformador de bajada si se invierten las conexiones de entrada y de salida.



a) Transformador de subida: salida de alto voltaje (baja corriente)



b) Transformador de bajada: salida de bajo voltaje (alta corriente)

▲ **FIGURA 6.16 Transformadores**
a) Un transformador de subida tiene más vueltas en la bobina secundaria que en la primaria. **b)** Un transformador de bajada tiene más vueltas en la bobina primaria que en la secundaria.

Ejemplo 6.7 ■ Orientación de un transformador: ¿configuración de subida o de bajada?

Un transformador ideal de 600 W tiene 50 vueltas en su devanado primario y 100 vueltas en el secundario. *a)* ¿Este transformador es un arreglo 1) de subida o 2) de bajada? *b)* Si se conecta una fuente de 120 V al devanado primario, ¿cuáles son el voltaje y la corriente de salida de este transformador?

a) Razonamiento conceptual. Los términos de subida o de bajada se refieren a lo que le sucede al voltaje, no a la corriente. Como el voltaje es proporcional al número de vueltas, en este caso, el voltaje secundario es mayor que el voltaje primario. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 1, un transformador de subida.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. El voltaje de salida se determina con la ecuación 6.10a, una vez que se ha establecido la relación de vueltas. A partir de la potencia, es posible determinar la corriente.

Dado: $N_p = 50$ **Encuentre:** V_s e I_s (voltaje y corriente secundarios)
 $N_s = 100$
 $V_p = 120$ V

Para calcular el voltaje secundario, se emplea la ecuación 6.10a con la relación de vueltas igual a 2, ya que $N_s = 2N_p$:

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)V_p = (2)(120 \text{ V}) = 240 \text{ V}$$

Si el transformador es ideal, entonces la potencia de entrada es igual a la potencia de salida. En el lado primario, la potencia de entrada es $P_p = I_p V_p = 600$ W, de manera que la corriente de entrada debe ser

$$I_p = \frac{600 \text{ W}}{V_p} = \frac{600 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 5.00 \text{ A}$$

Como el voltaje aumenta por un factor de 2, la corriente de salida debería disminuir por un factor de 2. A partir de la ecuación 20.10b,

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)I_p = \left(\frac{1}{2}\right)(5.00 \text{ A}) = 2.50 \text{ A}$$

Ejercicio de refuerzo. *a)* Cuando una turista europea visita Estados Unidos (los voltajes promedio de ca son de 240 V en Europa), ¿qué clase de transformador le permitiría usar su secadora de cabello adecuadamente? Explique su respuesta. *b)* Para un secadora de cabello de 1500 W (se supone que es óhmica), ¿cuál debería ser la corriente de entrada del transformador en Estados Unidos, suponiendo que sea ideal?

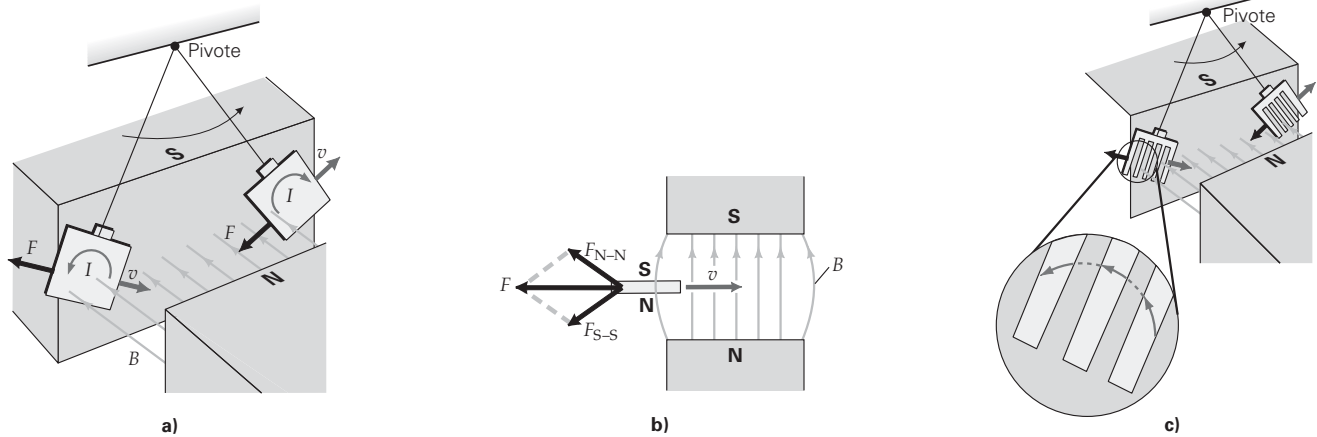
Las relaciones anteriores se aplican en forma estricta sólo a transformadores ideales (o "sin pérdidas"); en realidad los transformadores tienen pérdidas de energía. Aunque los transformadores bien diseñados suelen tener pérdidas internas de energía menores del 5%, no existe un transformador ideal. Hay muchos factores que determinan qué tanto se acerca el funcionamiento de un transformador real al de uno ideal.

Primero: hay pérdidas de flujo; esto es, no todo el flujo pasa a través de la bobina secundaria. En algunos diseños de transformador, una de las bobinas aisladas se devana directamente sobre la otra, en vez de tener dos bobinas separadas. Esa configuración contribuye a reducir al mínimo la pérdida de flujo reduce el tamaño del transformador.

Segundo: la corriente alterna en la bobina primaria significa que hay un flujo magnético variable que atraviesa las espiras. Esto origina una fem inducida en la bobina primaria. Según la ley de Lenz, la fem autoinducida se opone al cambio de la corriente y limita la corriente primaria (éste es un efecto similar al de una contra fem en un motor).

Tercero: los transformadores distan de ser ideales porque tienen calentamiento de joule (pérdidas I^2R) por la resistencia de los alambres. Esta pérdida es pequeña, pues los alambres tienen poca resistencia.

Por último, considere el efecto de la inducción en el material del núcleo. Para incrementar el flujo magnético, el núcleo se fabrica con un material altamente permeable (como el hierro), pero este tipo de materiales también se caracterizan por ser buenos conductores. El flujo magnético variable en el núcleo induce fuerzas electromotrices, que, a la vez, crean *corrientes parásitas* o *corrientes de Foucault* en el material del núcleo. Después, esas corrientes parásitas podrían causar pérdida de energía entre la bobina primaria y secundaria al calentar al núcleo (de nuevo, pérdidas I^2R).



Para reducir la pérdida de energía a causa de las corrientes parásitas, los núcleos de los transformadores se fabrican con láminas delgadas de material (por lo general hierro), con un pegamento aislante entre ellas. Las capas aislantes entre las láminas interrumpen las corrientes parásitas, o las confinan a las láminas, lo que reduce considerablemente la pérdida de energía.

Se pueden demostrar los efectos de las corrientes parásitas dejando oscilar una placa de material conductor, pero no magnético, como el aluminio, dentro de un campo magnético (▲ figura 6.17a). Conforme la placa entra o sale del campo, se desarrollan corrientes parásitas inducidas porque el flujo magnético a través de esta área cambia. De acuerdo con la ley de Lenz, las corrientes parásitas se inducen en una dirección tal que se opone al cambio de flujo.

Cuando la placa entra al campo (la posición izquierda de la placa en la figura 6.17a), se induce una corriente en sentido contrario al de las manecillas del reloj. (Aplique la ley de Lenz para corroborar este efecto.) La corriente inducida produce su propio campo magnético, lo que significa que, en efecto, la placa tiene un polo norte magnético cerca del polo norte del imán permanente, y un polo sur magnético cerca del polo sur del imán permanente (figura 6.17b). El efecto de la fuerza neta es desacelerar la placa al entrar al campo. Las corrientes parásitas de la placa invierten su dirección conforme ésta sale del campo, produciendo fuerzas netas magnéticas de atracción, por lo que hay una tendencia a frenar la salida de la placa. En ambos casos, las fuerzas electromotrices inducidas tratan de desacelerar el movimiento de la placa.

La reducción de las corrientes parásitas (parecida a lo que sucede en los transformadores con placas laminadas) se puede demostrar con una placa con rendijas (figura 6.17c). Cuando esa placa oscila entre los polos del imán, lo hace con relativa libertad, porque las corrientes parásitas tienden a reducirse mucho a causa de los huecos (las rendijas). Así, también se reduce la fuerza magnética sobre la placa.

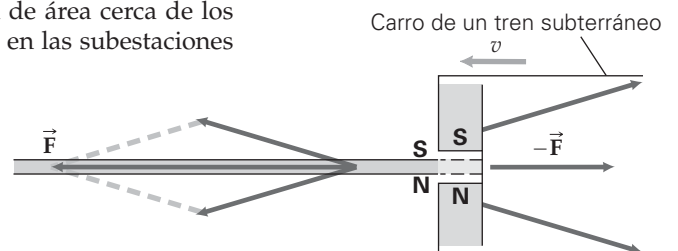
Se ha aplicado el efecto amortiguador de las corrientes parásitas en sistemas de frenado de tranvías rápidos. Cuando un electroimán (que está en el carro) se pone a funcionar, aplica un campo magnético a un riel. La fuerza de repulsión que producen las corrientes parásitas inducidas en el riel actúa como fuerza de frenado (▼ figura 6.18). Conforme el carro frena, las corrientes parásitas en el riel disminuyen y permiten que la acción del frenado sea gradual.

Transmisión de electricidad y transformadores

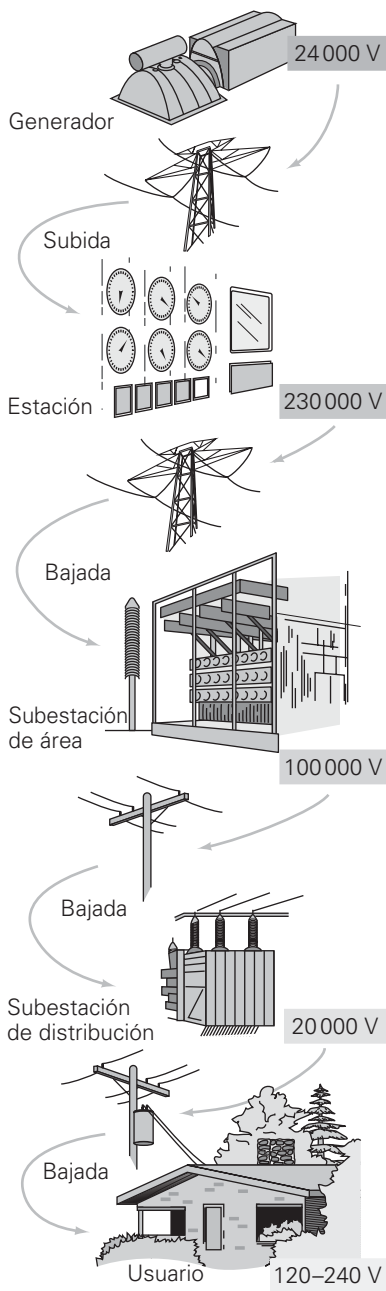
Para transmitir electricidad a grandes distancias, los transformadores ofrecen un medio de aumentar el voltaje y disminuir la corriente de un generador eléctrico, para así reducir las pérdidas por calentamiento de joule (I^2R) en los cables que llevan la corriente. En la ▼ figura 6.19 se ve un esquema de un sistema de distribución eléctrica. La energía se transmite a grandes distancias hasta una subestación de área cerca de los consumidores. Ahí se baja el voltaje. Hay más bajadas de voltaje en las subestaciones

▼ FIGURA 6.18 Frenado electromagnético y transporte masivo

Para frenar, un tren energiza un electroimán que lleva a bordo. Este electroimán va montado sobre un riel metálico largo. Las corrientes inducidas en el riel producen una fuerza de repulsión mutua entre el riel y el tren, desacelerando así este último.



▲ FIGURA 6.17 Corrientes parásitas **a)** Las corrientes parásitas se inducen en una placa conductora no magnética que se mueve en un campo magnético. Las corrientes inducidas se oponen al cambio de flujo, y se desarrolla una fuerza de retardo que se opone al movimiento, primero dentro del campo y luego fuera. Para constatar esto, note que las corrientes invierten su dirección conforme la placa sale del campo. **b)** Una vista superior cuando la placa se acerca oscilando al campo desde la izquierda. La fuerza de retardo \vec{F} (para frenar la entrada al campo) es el resultado de las dos fuerzas de repulsión (\vec{F}_{N-N} y \vec{F}_{S-S}), que actúan como polos magnéticos. El lado de la placa más cercano al polo norte del imán permanente funciona como polo norte, y el otro lado como polo sur. **c)** Si la placa tiene ranuras, se reducen de forma drástica las corrientes parásitas y, por consiguiente, las fuerzas magnéticas, de manera que la placa oscilará con mayor libertad.



▲ FIGURA 6.19 Transmisión de electricidad Diagrama de un sistema típico de distribución eléctrica.

de distribución y los postes eléctricos antes de que la electricidad llegue a los hogares y las empresas con el voltaje y la corriente adecuados.

En el siguiente ejemplo se ilustran las ventajas de poder aumentar el voltaje (y disminuir la corriente) en la transmisión de energía eléctrica.

Ejemplo 6.8 ■ Disminución de las pérdidas: transmisión de energía eléctrica a alto voltaje

Una pequeña central hidroeléctrica produce energía en forma de una corriente de 10 A y un voltaje de 440 V. El voltaje se sube a 4400 V (con un transformador ideal) para llevar la energía en 40 km de línea eléctrica, cuya resistencia total es 20 Ω . a) ¿Qué porcentaje de la energía original se perdería si no se aumentara el voltaje? b) ¿Qué porcentaje de la energía original se pierde en realidad al aumentar el voltaje?

Razonamiento. a) La salida de potencia se calcula con $P = IV$, y se compara con la que se pierde en el conductor, $P = I^2R$. b) Las ecuaciones 6.10a y 6.10b deben usarse para determinar el voltaje aumentado y la corriente disminuida, respectivamente. A continuación se repite el cálculo y se comparan los resultados con los del inciso a).

Solución.

Dado: $I_p = 10 \text{ A}$ **Encuentre:** a) Porcentaje de pérdida de energía sin aumentar el voltaje
 $V_p = 440 \text{ V}$ b) Porcentaje de pérdida de energía aumentando el voltaje
 $V_s = 4400 \text{ V}$
 $R = 20 \Omega$

a) La potencia producida por el generador es

$$P = I_p V_p = (10 \text{ A})(440 \text{ V}) = 4400 \text{ W}$$

La rapidez de pérdida de energía (joules por segundo, o watts) al transmitir una corriente de 10 A es muy alta, porque

$$P_{\text{pérdida}} = I^2 R = (10 \text{ A})^2 (20 \Omega) = 2000 \text{ W}$$

Así, el porcentaje de la energía producida que se pierde en forma de calentamiento de joule en los conductores es cercano al 50%, ya que

$$\% \text{ de pérdida} = \frac{P_{\text{pérdida}}}{P} \times 100\% = \frac{2000 \text{ W}}{4400 \text{ W}} \times 100\% = 45\%$$

b) Al aumentar el voltaje a 4400 V, esto permite transmitir una corriente que se reduce por un factor de 10 con respecto a su valor en el inciso a). Entonces, se tiene

$$I_s = \left(\frac{V_p}{V_s} \right) I_p = \left(\frac{440 \text{ V}}{4400 \text{ V}} \right) (10 \text{ A}) = 1.0 \text{ A}$$

La potencia se reduce, entonces, por un factor de 100, ya que varía en forma proporcional al cuadrado de la corriente:

$$P_{\text{pérdida}} = I^2 R = (1.0 \text{ A})^2 (20 \Omega) = 20 \text{ W}$$

Por consiguiente, la potencia perdida también se reduce por un factor de 100, a un nivel mucho más aceptable:

$$\% \text{ de pérdida} = \frac{P_{\text{pérdida}}}{P} \times 100\% = \frac{20 \text{ W}}{4400 \text{ W}} \times 100\% = 0.45\%$$

Ejercicio de refuerzo. Algunos electrodomésticos de uso rudo, como las bombas de agua, se pueden conectar a 240 o a 120 V. Su potencia nominal es la misma, independientemente del voltaje con que trabajen. a) Explique la ventaja que se obtiene en eficiencia cuando esos electrodomésticos funcionan al voltaje mayor. b) Para una bomba de 1.00 hp (746 W), estime la razón entre la potencia perdida en los conductores a 240 V y la que se pierde a 120 V (suponiendo que todas las resistencias son óhmicas y que los cables de conexión son los mismos).

6.4 Ondas electromagnéticas

OBJETIVOS: a) Explicar la naturaleza física, el origen y la forma de propagación de las ondas electromagnéticas y b) describir algunas de las propiedades y usos de diversas clases de ondas electromagnéticas.

En la sección 9.4 de *Física 11* se consideró que las **ondas electromagnéticas** (o la *radiación electromagnética*) constituyen un medio de transmisión de calor. Ahora ya se está en condiciones de comprender la producción y las características de la radiación electromagnética, pues esas ondas se pueden describir en términos de campos eléctricos y magnéticos.

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) fue el primero en *unificar* los fenómenos eléctricos y magnéticos. Utilizando matemáticas complejas, tomó las ecuaciones que rigen cada uno de estos campos y predijo la existencia de ondas electromagnéticas. De hecho, fue aún más lejos y calculó su rapidez en el vacío, y sus predicciones concordaron con los experimentos. Como un reconocimiento a estas contribuciones, al conjunto de ecuaciones se le llama *ecuaciones de Maxwell*, aunque en su mayor parte esas ecuaciones las dedujeron otros científicos (por ejemplo, la ley de Faraday de la inducción).

En esencia, en las ecuaciones de Maxwell se combinan el campo eléctrico y el campo magnético para formar un solo campo electromagnético. Los campos que aparentemente están separados se relacionan de forma simétrica de tal manera que cualquiera de ellos puede crear al otro, en las condiciones adecuadas. Esta simetría es evidente en las ecuaciones (que no se muestra en este libro). Por ahora, basta con una descripción cualitativa:

Un campo magnético variable en el tiempo produce un campo eléctrico variable en el tiempo.

Un campo eléctrico variable en el tiempo produce un campo magnético variable en el tiempo.

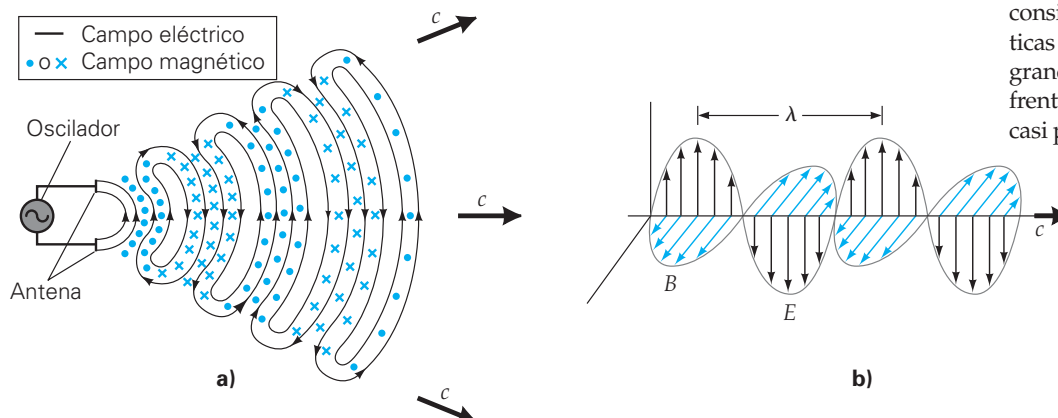
El primer enunciado resume nuestras observaciones en la sección 6.1: un flujo magnético que cambia origina una fem inducida, que, a la vez, produce una corriente. La segunda afirmación (que no estudiaremos en detalle) es básica para comprender las características de autopropagación de las ondas electromagnéticas. Juntos, los dos fenómenos permiten que esas ondas se propaguen por el vacío, mientras que todas las demás ondas requieren un medio que las soporte.

Según la teoría de Maxwell, al *acelerar* las cargas eléctricas —como un electrón en oscilación—, se producen ondas electromagnéticas. El electrón en cuestión podría, por ejemplo, ser uno de los muchos electrones de la antena metálica de un radiotransmisor, impulsados por un oscilador (voltaje) eléctrico a una frecuencia de 10^6 Hz (1 MHz). Al oscilar cada electrón, se acelera y desacelera de forma continua, por lo que irradia una onda electromagnética (▼ figura 6.20a). Las oscilaciones continuas de muchos electrones producen campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, en la cercanía inmediata de la antena. El campo eléctrico que se ve en la figura 6.20a está en el plano de la página y cambia continuamente de dirección, al igual que el campo magnético (que se ve en gris claro, y que entra y sale de la página).

Los campos eléctrico y magnético transportan energía y se propagan alejándose con la rapidez de la luz. Esta rapidez se representa con la letra c y, con tres cifras significativas, es $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Los resultados de Maxwell demuestran que a grandes distancias de la fuente, esas ondas se vuelven planas. (La figura 6.20b muestra una onda en un momento determinado en el tiempo.) En este caso, el campo eléctrico (\vec{E}) es perpendicular al campo magnético (\vec{B}), y ambos varían en forma sinusoidal con respecto al tiempo. Tanto \vec{E} como \vec{B} son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Por consiguiente, las ondas electromagnéticas son ondas *transversales*, en las que los *campos* oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación. De acuerdo con la teoría de Maxwell, cuando cambia un campo crea al otro. Este proceso se repite una y otra vez, y origina la onda electromagnética viajera a la que llamamos luz. Un resultado importante de todo esto es el siguiente:

En el vacío, todas las ondas electromagnéticas, independientemente de su frecuencia o de su longitud de onda, viajan con la misma rapidez, $c = 3.00 \times 10^8$ m/s.

▼ **FIGURA 6.20** Origen de las ondas electromagnéticas Las ondas electromagnéticas se producen, fundamentalmente, al acelerar cargas eléctricas. **a)** Aquí, las cargas (electrones) en una antena metálica se mueven mediante una fuente de voltaje oscilante. Conforme la polaridad de la antena y la dirección de la corriente cambian de forma periódica, los campos eléctrico y magnético alternos se propagan alejándose. Estos campos son perpendiculares a la dirección de la propagación de la onda. Por consiguiente, las ondas electromagnéticas son ondas transversales. **b)** A grandes distancias de la fuente, los frentes de onda curvos se vuelven casi planos.



Como las distancias en la vida diaria son muy cortas, normalmente se ignora el retraso del tiempo que se debe al recorrido de la luz. Sin embargo, en los viajes interplanetarios, este retraso ocasiona problemas. Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6.9 ■ Control a larga distancia: la rapidez de las ondas electromagnéticas en el vacío

Las sondas espaciales *Viking* llegaron a Marte en 1976 y enviaron a la Tierra señales de radio y televisión (ambas ondas electromagnéticas). ¿Qué tanto más tardó una señal en llegar a su destino cuando Marte estaba más alejado de la Tierra, que cuando estaba más cerca? Las distancias promedio de Marte y la Tierra con respecto al Sol son de 229 millones de km (d_M) y 150 millones de km (d_E), respectivamente. Suponga que ambos planetas tienen órbitas circulares y considere las distancias promedio como radios de círculos.

Razonamiento. Este caso requiere un cálculo de distancia en función del tiempo. Los planetas están más alejados cuando están en los lados opuestos del Sol y, en consecuencia, están separados por una distancia $d_M + d_E$. (En este caso las señales deberían atravesar el Sol, lo cual naturalmente no es posible. Sin embargo, sirve para determinar el límite superior de los tiempos de transmisión.) Los planetas están más cerca cuando están alineados en el mismo lado del Sol; en este caso, su separación es igual a $d_M - d_E$. (Dibuje un diagrama que lo ayude a visualizar esta configuración.) Como se conoce la rapidez de las ondas electromagnéticas en el vacío, es posible calcular los tiempos con la fórmula $t = d/c$.

Solución. Se listan los datos y se hace la conversión de las distancias a metros,

Dado: $d_M = 229 \times 10^6 \text{ km} = 2.29 \times 10^{11} \text{ m}$ **Encuentre:** Δt (la diferencia de tiempos que tarda la luz en recorrer las distancias más larga y más corta)

$d_E = 150 \times 10^6 \text{ km} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$

Las ondas de radio y televisión viajan con la rapidez c . Así, el tiempo de recorrido más largo t_L es

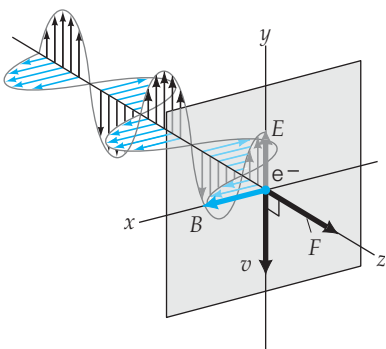
$$t_L = \frac{d_M + d_E}{c} = \frac{3.79 \times 10^{11} \text{ m}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.26 \times 10^3 \text{ s} \quad (\text{o } 21.1 \text{ min})$$

Para la distancia más corta, el tiempo de recorrido t_s es

$$t_s = \frac{d_M - d_E}{c} = \frac{7.90 \times 10^{10} \text{ m}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.63 \times 10^2 \text{ s} \quad (\text{o } 4.39 \text{ min})$$

Entonces, la diferencia de tiempos es $\Delta t = t_L - t_s = 1.00 \times 10^3 \text{ s}$ (o 16.7 min).

Ejercicio de refuerzo. Suponga que un vehículo explorador en Marte se dirige hacia una roca a 2.0 m delante de él. Cuando está a esa distancia, envía una foto de la roca a los controladores en la Tierra. Si Marte está en su punto más cercano a la Tierra, ¿cuál es la rapidez máxima que puede tener el vehículo de exploración para evitar el choque contra la roca? Suponga que la señal de video del vehículo explorador llega a la Tierra, y que de inmediato se le manda una señal para que se detenga.



▲ **FIGURA 6.21** La presión de radiación El campo eléctrico de una onda electromagnética que choca con una superficie actúa sobre un electrón y le comunica una velocidad. El campo magnético ejerce entonces una fuerza sobre la carga en movimiento, en la dirección de propagación de la luz incidente. (Verifique esta dirección usando la regla de la mano derecha para fuerzas magnéticas.)

Presión de la radiación

Una onda electromagnética porta energía. En consecuencia, puede efectuar trabajo y ejercer una fuerza sobre algún material con el que choque. Imaginemos la luz que cae sobre un electrón en reposo sobre una superficie (◀figura 6.21). El campo eléctrico de la onda electromagnética ejerce una fuerza sobre el electrón, comunicándole una velocidad (\vec{v}) hacia abajo, como se indica en la figura. Como una partícula cargada que se mueve en un campo magnético está sometida a una fuerza, sobre el electrón hay una fuerza magnética que se debe al componente del campo magnético de la onda luminosa. De acuerdo con la regla de la mano derecha, esta fuerza tiene la dirección de propagación de la onda (figura 6.21a). Como la onda electromagnética produce la misma fuerza sobre muchos electrones, ejerce una fuerza sobre la superficie como un todo, en la dirección en la que se propaga.

La fuerza de radiación que se ejerce sobre una superficie se llama **presión de radiación**. Esta presión es insignificante en la mayor parte de las situaciones cotidianas, pero es importante en los fenómenos atmosféricos y astronómicos, al igual que en la fí-

sica atómica y nuclear, donde las masas son pequeñas y no hay fricción. Por ejemplo, la presión de radiación desempeña un papel clave en la determinación de la dirección en la que apuntan las colas de los cometas. La luz solar entrega energía a la “cabeza” del cometa, formada por hielo y polvo. Parte de este material se evapora cuando el cometa se acerca al Sol, y la presión de radiación empuja los gases evaporados haciendo que se alejen del Sol. Así, la cola en general apunta alejándose del Sol, sin importar si el cometa se acerca o se aleja de este astro.

Otro uso potencial de la presión de la radiación solar es la propulsión de satélites “veleros” interplanetarios, que se alejan del Sol en una órbita en espiral que se amplía lentamente, hasta llegar a los planetas exteriores (►figura 6.22a). Para generar la fuerza suficiente y usar la presión extremadamente baja de la luz solar, las velas deberían tener una superficie muy grande, y el satélite debería tener tan poca masa como fuera posible. La recompensa es que no se necesitaría combustible (a excepción de cantidades pequeñas para corregir el curso), una vez lanzado el satélite. Examine el siguiente Ejemplo conceptual, acerca de la presión de radiación y los viajes espaciales.

Ejemplo conceptual 6.10 ■ Velero en el espacio: la presión de radiación en acción

Considere el diseño de un vehículo espacial relativamente ligero, con una “vela” gigantesca, que serviría como sonda interplanetaria. Con poca o nada de energía propia, usaría la presión de la luz solar para impulsarse y llegar a los planetas exteriores. Para obtener la máxima fuerza de propulsión, ¿qué clase de superficie debería tener la vela? a) Brillante y reflectora, b) oscura y absorbente o c) no importarían las características de la superficie.

Razonamiento y respuesta. A primera vista, se podría pensar que la respuesta correcta es c. Sin embargo, como hemos visto, la radiación es capaz de ejercer fuerzas y transfiere cantidad de movimiento a todo aquel objeto con el que choca. Así, la interacción entre la radiación y la vela se describe en términos de la conservación de la cantidad de movimiento, como se ve en la figura 6.22b. (Véase la sección 4.3 de *Física 11*.) Si se absorbe la radiación, la situación es análoga a la de un choque totalmente inelástico (como cuando choca una bola de plastilina contra una puerta), y la vela adquiriría toda la cantidad de movimiento (\vec{p}) que poseía originalmente la radiación.

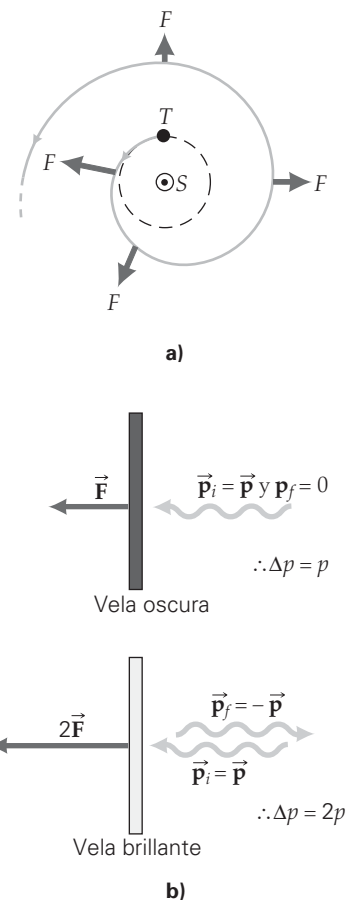
Sin embargo, si la radiación se *refleja*, el caso es análogo al de un choque totalmente elástico, como el de una bola que rebota en un muro (véase la sección 4.1 de *Física 11*). Como la cantidad de movimiento de la radiación después del choque sería igual en magnitud a su cantidad de movimiento inicial, pero con sentido contrario, esa cantidad de movimiento se invertiría (de \vec{p} a $-\vec{p}$). Para conservar la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento transferida a la vela brillante sería el doble ($2\vec{p}$) que con la vela oscura. Como la fuerza es igual a la rapidez de cambio de la cantidad de movimiento, las velas reflectoras tendrían, en promedio, el doble de fuerza que las absorbentes. Así que la respuesta correcta es a.

Ejercicio de refuerzo. a) En este ejemplo, ¿la vela daría más o menos aceleración conforme la nave se aleja del Sol? b) Explique cómo un cambio en el área de la vela podría contrarrestar este cambio.

Clases de ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se clasifican en regiones en un espectro de frecuencias o longitudes de onda. Recuerde que en el capítulo 11 de *Física 11* se explicó que la frecuencia y la longitud de onda tienen una relación inversa mediante la relación $\lambda = c/f$, en la que la rapidez general de la onda v se substituyó por la rapidez de la luz c . Cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda, y viceversa. El espectro electromagnético es continuo, por lo que los límites de las diversas regiones son aproximados (►figura 6.23). La tabla 6.1 (siguiente página) muestra estas regiones de frecuencia y longitud de onda para los tipos generales de ondas electromagnéticas.

Ondas de potencia Las ondas electromagnéticas de 60 Hz de frecuencia se producen por las corrientes alternas en los circuitos eléctricos. Estas ondas de potencia tienen una longitud de onda de $5.0 = 10^6$ m o 5000 km (más de 3000 mi). Las ondas de frecuencias tan bajas tienen pocos usos prácticos. A veces producen el llamado murmullo de 60 Hz en los equipos estereofónicos, o son los causantes de ruidos eléctricos no deseados en los instrumentos delicados. Preocupan más los posibles efectos de estas ondas sobre la salud. Algunos de los primeros estudios parecían indicar que los campos



▲ FIGURA 6.22 “Velero” en el sistema solar a) Una sonda espacial lanzada desde la Tierra (T), equipada con una gran vela, actuaría de acuerdo con la presión de la radiación solar (el Sol se denota por S). Esta fuerza gratuita haría que el satélite se alejara describiendo una espiral. Con la planeación adecuada, la nave podría llegar a los planetas exteriores con poco o nada de combustible adicional. Note la reducción en la fuerza con la distancia. b) ¿Es mejor que la vela sea oscura o brillante? Véase el Ejemplo conceptual 6.10 y la conservación de la cantidad de movimiento.

► **FIGURA 6.23** El espectro electromagnético El espectro de frecuencias o longitudes de onda se divide en regiones, o intervalos. Observe que la región de la luz visible es una parte muy pequeña del espectro electromagnético total. Para la luz visible, las longitudes de onda se expresan generalmente en nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). (Los tamaños relativos de las longitudes de onda que aparecen en la parte superior de la figura no están a escala.) (Véase el pliego a color al final del libro.)

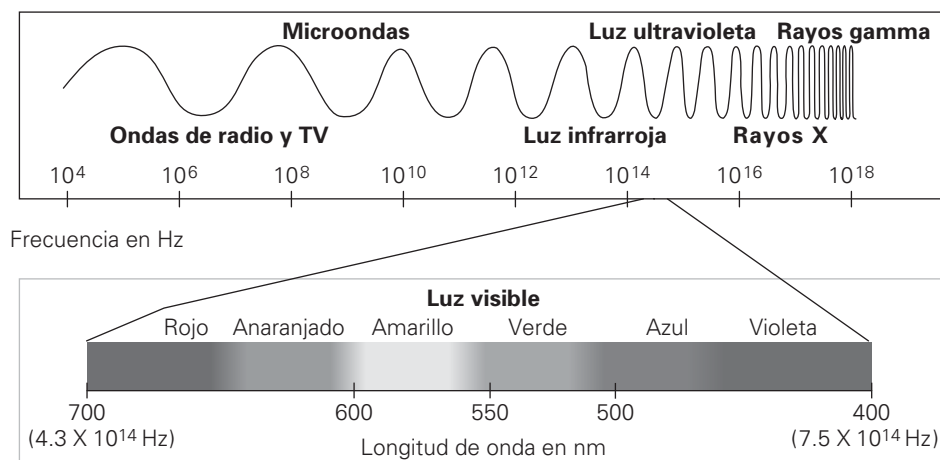


TABLA 6.1 Clasificación de las ondas electromagnéticas

| Tipo de onda | Intervalo aproximado de frecuencias (Hz) | Intervalo aproximado de longitudes de onda (m) | Algunas fuentes comunes |
|------------------------|---|--|--|
| Ondas de potencia | 60 | 5.0×10^6 | Corrientes eléctricas |
| Ondas de radio AM | $(0.53 \times 10^6) - (1.7 \times 10^6)$ | 570–186 | Circuitos eléctricos/antenas |
| Ondas de radio FM | $(88 \times 10^6) - (108 \times 10^6)$ | 3.4–2.8 | Circuitos eléctricos/antenas |
| TV | $(54 \times 10^6) - (890 \times 10^6)$ | 5.6–0.34 | Circuitos eléctricos/antenas |
| Microondas | $10^9 - 10^{11}$ | $10^{-1} - 10^{-3}$ | Tubos de vacío especiales |
| Radiación infrarroja | $10^{11} - 10^{14}$ | $10^{-3} - 10^{-7}$ | Cuerpos tibios y calientes, estrellas |
| Luz visible | $(4.0 \times 10^{14}) - (7.0 \times 10^{14})$ | 10^{-7} | El Sol y otras estrellas; lámparas |
| Radiación ultravioleta | $10^{14} - 10^{17}$ | $10^{-7} - 10^{-10}$ | Cuerpos muy calientes, estrellas y lámparas especiales |
| Rayos X | $10^{17} - 10^{19}$ | $10^{-10} - 10^{-12}$ | Choques de electrones a alta rapidez y procesos atómicos |
| Rayos gamma | Por arriba de 10^{19} | Por debajo de 10^{-12} | Reacciones nucleares y procesos de decaimiento nuclear |

con muy baja frecuencia tienen efectos biológicos potencialmente dañinos sobre células y tejidos. Sin embargo, investigaciones recientes indican que esto no es verdad.

Ondas de radio y televisión Estas ondas están, en general, en el intervalo comprendido entre 500 kHz y 1000 MHz. La banda de amplitud modulada (AM) va de 530 a 1710 kHz (1.71 MHz). Las frecuencias mayores, hasta 54 MHz, se utilizan en las bandas de “onda corta”. Las bandas de TV van de 54 a 890 MHz. La banda de radio de frecuencia modulada (FM) va de 88 a 108 MHz, que está en un hueco entre los canales 6 y 7 de la región de las bandas de televisión. Los teléfonos celulares emplean ondas de radio para transmitir comunicación de voz en la banda de frecuencia ultra-alta (UHF), cuyas frecuencias se parecen a las que se usan en los canales 13 o mayores de la televisión.

Las primeras comunicaciones internacionales usaban bandas de “onda corta”, igual que los operadores de radio aficionados de hoy. Pero, ¿cómo se transmiten las ondas de radio, que normalmente describen trayectorias rectas, rodeando la curvatura de la Tierra? Esta hazaña se logra con la reflexión en las capas iónicas de la atmósfera superior. Las partículas energéticas que proceden del Sol ionizan las moléculas de gas y originan varias capas de iones. Algunas de esas capas reflejan las ondas de radio. Así, al “hacer rebotar” las ondas de radio en esas capas, es posible transmitir señales más allá del horizonte, a cualquier lugar del mundo.

Esta reflexión de las ondas de radio requiere que las capas de iones tengan densidad uniforme. Cuando una perturbación solar produce un aguacero de partículas energéticas que perturba esta uniformidad, puede presentarse un “oscurecimiento” de las comunicaciones, cuando las ondas de radio se dispersan en muchas direcciones en lugar de reflejarse en líneas rectas. En el pasado, para evitar esas perturbaciones, las

comunicaciones internacionales tuvieron que basarse principalmente en cables transoceánicos. Ahora contamos con satélites de comunicaciones, que permiten transmitir señales por la línea de vista a cualquier punto del planeta.

Microondas Las microondas, con frecuencias del orden de los gigahertz (GHz), se generan en tubos especiales de vacío (llamados *klistrones* y *magnetrones*). Se usan con frecuencia en aplicaciones de comunicaciones y de radar. Además de sus funciones como guía en la navegación, el radar es la base de los medidores de rapidez que se usan para cronometrar eventos, como los lanzamientos en el béisbol, y para detectar a los conductores que infringen los límites de velocidad, todo esto gracias al efecto Doppler. Cuando las ondas de radar se reflejan en un objeto en movimiento, la magnitud y el signo del desplazamiento indican la velocidad del objeto.

Radiación infrarroja (IR) La región infrarroja del espectro electromagnético está al lado del extremo de baja frecuencia, o de larga longitud de onda, del espectro visible. Un cuerpo cálido emite radiación IR, que depende de su temperatura. Un cuerpo a la temperatura ambiente emite radiación en la región lejana del infrarrojo. (En este caso, el término “lejana” se utiliza en relación con la región visible.)

Recuerde que en la sección 9.4 de *Física 11* se explicó que la radiación infrarroja se llama a veces “rayos de calor”. Esto se debe a que las moléculas de agua, presentes en la mayor parte de los materiales, absorben con facilidad la radiación en la región de longitudes de onda infrarroja. Cuando lo hacen aumentan su movimiento térmico aleatorio; se “calientan” y también calientan su entorno. Las lámparas infrarrojas se usan en aplicaciones terapéuticas, como para aliviar el dolor de músculos tensos, y para mantener calientes los alimentos en los restaurantes. La radiación IR también se asocia con la conservación de la temperatura de la Tierra a través del *efecto invernadero*. En este efecto, la luz visible que llega (que pasa con relativa facilidad por la atmósfera) es absorbida por la superficie terrestre y se vuelve a irradiar en forma de radiación infrarroja, que queda atrapada por los gases de invernadero, como el dióxido de carbono y el vapor de agua, que son opacos a esta radiación. El nombre del efecto proviene de los invernaderos, en donde el vidrio (y no gases atmosféricos) atrapa la energía.

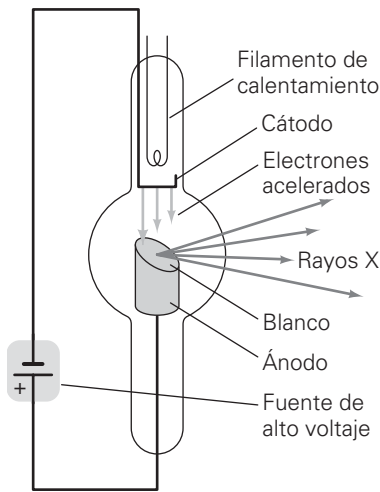
Luz visible La región de la luz visible ocupa sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Su frecuencia va desde aproximadamente 4×10^{14} Hz hasta casi 7×10^{14} Hz. En términos de longitudes de onda, esto equivale al intervalo comprendido entre 700 y 400 nm (figura 6.23). Recuerde que 1 nanómetro (nm) = 10^{-9} m. Sólo la radiación en esta región de frecuencias es la que activa los receptores del ojo humano. La luz visible emitida o reflejada de los objetos que nos rodean brinda información visual acerca de nuestro mundo. La luz visible y la óptica se estudiarán en los capítulos 7 al 10.

Es interesante notar que no todos los animales son sensibles al mismo intervalo de longitudes de onda. Por ejemplo, las serpientes pueden detectar la radiación infrarroja, y el espectro visible de muchos insectos se extiende hasta abarcar el intervalo ultravioleta. El intervalo de sensibilidad del ojo humano se apega bastante al espectro de longitudes de onda emitidas por el Sol. La máxima sensibilidad del ojo humano está en la misma región del amarillo-verde, donde las emisiones de energía del Sol son máximas (longitudes de onda de 550 nm).

Radiación ultravioleta (UV) Aunque el espectro del Sol está formado principalmente por luz visible, tiene un componente pequeño de luz ultravioleta (UV), cuyo intervalo de frecuencias está más allá del extremo violeta de la región visible. La radiación ultravioleta también se puede producir con lámparas especiales y con cuerpos muy calientes. Además de causar el bronceado de la piel, la radiación UV puede causar quemaduras y/o cáncer de la piel, si la exposición a ella es demasiado prolongada.

Al llegar a la Tierra, la mayor parte de la emisión ultravioleta solar se absorbe en la capa de ozono (O₃) de la atmósfera, a una altitud comprendida entre 30 y 50 km. Como la capa de ozono desempeña un papel esencial en la protección frente a los rayos ultravioleta, hay preocupación acerca de su agotamiento a causa de los gases de cloro-fluorocarbonos (como el freón, que alguna vez se usó en los refrigeradores), que se difunden hacia arriba y reaccionan con el ozono.

La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por el vidrio ordinario. En consecuencia, no se puede conseguir un buen bronceado a través de vidrieras. En las etiquetas de los anteojos para sol se indica con qué tipo de normas cumplen para proteger a los ojos de esta radiación potencialmente peligrosa. También hay ciertas clases de vidrio de alta tecnología (vidrio “fotogris”) que se oscurece al exponerse a la radiación UV. Estos materiales son la base de los anteojos solares “de transición”, que se oscurecen al exponerse a la luz solar. Naturalmente, esos anteojos no resultan muy útiles cuando alguien con-



▲ **FIGURA 6.24** El tubo de rayos X. Electrones acelerados por medio de un alto voltaje chocan con un electrodo, que sirve como blanco. Allí se desaceleran e interactúan con los electrones de los átomos del material con el que chocan. Durante el proceso de “frenado” (desaceleración) se emite energía en forma de rayos X.

► **FIGURA 6.25** Tomografía computarizada (TC). En una imagen ordinaria de rayos X, todo el espesor del cuerpo se proyecta en una película. Sin embargo, con frecuencia, sus estructuras internas se traslapan y es difícil distinguir los detalles. En la tomografía (del griego *tomo*, que significa “rebanada” y *grafos*, que significa “imagen”) computarizada, los haces de rayos X pueden obtener imágenes de una “rebanada” del organismo. **a)** La radiación transmitida se registra con una serie de detectores, y se procesa en una computadora. Con la información de varias rebanadas, la computadora forma una imagen tridimensional. También es posible mostrar una imagen única para hacer un estudio más minucioso, como se ve en el monitor. **b)** Una imagen de TC de un cerebro con un tumor benigno.

duce un automóvil (¿por qué?). Los soldadores usan gafas o caretas con vidrio especial para protegerse los ojos de las grandes cantidades de radiación UV producidas en los arcos de soldadura. Asimismo, es importante proteger los ojos de las lámparas solares y de las superficies cubiertas de nieve. El componente ultravioleta de la luz solar reflejada en las superficies nevadas produce ceguera de nieve en los ojos no protegidos.

Rayos X Más allá de la región ultravioleta del espectro electromagnético se encuentra la importante región de rayos X. Estamos familiarizados con los rayos X, principalmente por sus aplicaciones médicas. Fue el físico alemán, Wilhelm Roentgen (1845-1923), quien los descubrió en forma accidental, en 1895, al notar la fosforescencia de un trozo de papel fluorescente, causada por alguna radiación misteriosa proveniente de un tubo de rayos catódicos. Por su naturaleza misteriosa, a esta radiación se le llamó *radiación x*, o *rayos X*.

En la figura 6.24 se ven los elementos básicos de un tubo de rayos X. Un voltaje acelerador, normalmente de algunos miles de volts, se aplica entre los electrodos en un tubo sellado y al vacío. Los electrones que emite el electrodo negativo caliente (cátodo) se aceleran hacia el electrodo positivo (ánodo). Cuando chocan con el ánodo, parte de su energía térmica perdida se convierte en rayos X.

Un proceso similar se efectúa en los cinescopios de televisión a color, que utilizan altos voltajes y haces de electrones. Cuando los electrones, que llevan una gran rapidez, chocan con la pantalla, pueden emitir rayos X al ambiente. Por fortuna, todos los televisores modernos tienen el blindaje necesario para proteger a los espectadores contra esta radiación. En los primeros años de la televisión a color no siempre sucedía así, de ahí la frecuente recomendación: “No se siente muy cerca de la pantalla”.

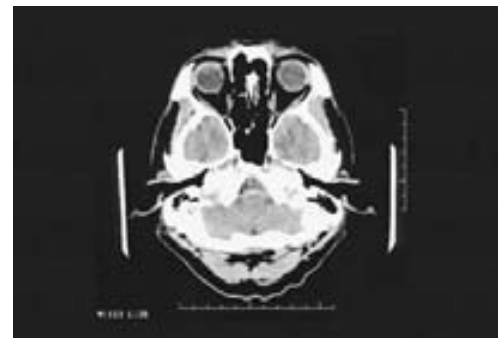
Como se sabe, la energía que transporta la radiación electromagnética depende de su frecuencia. Los rayos X de alta frecuencia tienen energías muy altas, y pueden causar cáncer, quemaduras de piel y otros efectos dañinos. Sin embargo, a bajas intensidades se pueden usar con relativa seguridad para ver la estructura interna del cuerpo humano y la de otros objetos opacos.* Los rayos X son capaces de atravesar materiales que son opacos a otras clases de radiación. Cuanto más denso es el material, mayor es la absorción de rayos X, y menos intensa es la radiación transmitida. Por ejemplo, cuando los rayos X atraviesan el cuerpo humano, se absorben o se dispersan mucho más en los huesos que en los demás tejidos. Si la radiación transmitida llega a una placa o película fotográfica, las áreas expuestas muestran variaciones de intensidad, lo que da por resultado una imagen de las estructuras internas.

La combinación de las computadoras con las modernas máquinas de rayos X permite formar imágenes tridimensionales mediante una técnica llamada *tomografía computarizada* o TC (ver figura 6.25).

Rayos gamma Las ondas electromagnéticas de la zona de frecuencias superiores del espectro electromagnético conocido se llaman *rayos gamma* (rayos γ). Esta radiación de alta frecuencia se produce en las reacciones nucleares, en los aceleradores de partículas y también como resultado de algunos tipos de decaimiento o desintegración nuclear (radiactividad).



a)



b)

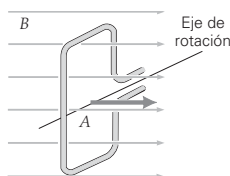
*La mayor parte de los científicos de la salud creen que no hay un “umbral” seguro para los rayos X u otras radiaciones de energía; esto es, no hay nivel de exposición que esté totalmente a salvo de riesgos. Por otra parte, creen que algunos de los efectos dañinos son acumulativos durante toda la vida. En consecuencia, las personas deben evitar radiografías innecesarias u otras exposiciones a la radiación “dura”. Sin embargo, cuando se emplean adecuadamente, los rayos X constituyen una herramienta de diagnóstico extremadamente útil, capaz de salvar vidas.

Repaso del capítulo

- El **flujo magnético** (Φ) es una medida de la cantidad de líneas magnéticas que atraviesan una área. Para una sola espira de alambre de área A , se define como

$$\Phi = BA \cos \theta \quad (6.1)$$

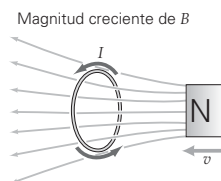
en donde B es la intensidad del campo magnético (se supone constante en el área), A es el área y θ es el ángulo que forma la dirección del campo magnético con la normal al plano del área.



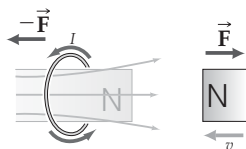
- La **ley de Faraday de la inducción** relaciona la fem inducida en una espira (o bobina compuesta de N espiras en serie) con la rapidez de cambio del flujo magnético a través de esa espira (o bobina).

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (6.2)$$

donde $\Delta \Phi$ el cambio de flujo a través de una espira o vuelta, en tanto que hay N vueltas.



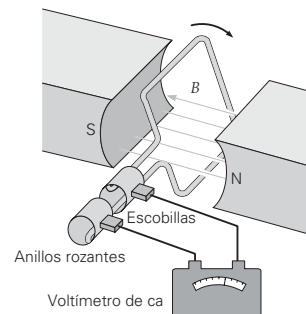
- La **ley de Lenz** establece que cuando un cambio en el flujo magnético induce una fem en una bobina, espira o circuito, la dirección de la corriente resultante, o inducida, es tal que crea su propio campo magnético, que se opone al cambio del flujo.



- Un **generador de ca** convierte la energía mecánica en energía eléctrica. La fem del generador en función del tiempo es

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (6.4)$$

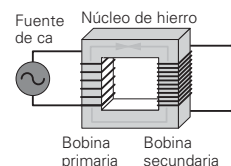
donde \mathcal{E}_0 es la fem máxima.



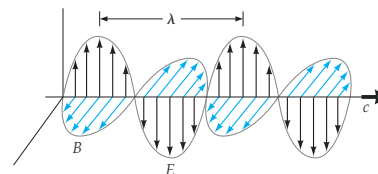
- Un **transformador** es un dispositivo que cambia el voltaje que le llega mediante la inducción. El voltaje aplicado al lado de la entrada o primario (p) del transformador cambia al voltaje de salida o secundario (s), según la ecuación

$$V_s = \left(\frac{N_s}{N_p} \right) V_p \quad (6.10a)$$

$$I_s = \left(\frac{N_p}{N_s} \right) I_p \quad (6.10b)$$



- Una **onda electromagnética** (luz) consiste en campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo, que se propagan con una rapidez constante en el vacío ($c = 3.00 \times 10^8$ m/s). Los diversos tipos de radiación (como los rayos UV, las ondas de radio y la luz visible) difieren en frecuencia y longitud de onda.



- La radiación electromagnética transporta energía y cantidad de movimiento, y puede ejercer una fuerza llamada **presión de radiación**.

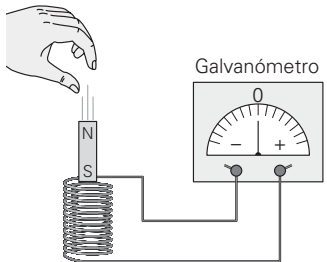
Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

6.1 Fem inducida: ley de Faraday y ley de Lenz

1. **OM** Una unidad de flujo magnético es a) Wb, b) T · m², c) T · m/A o d) tanto a como b.

2. **OM** El flujo magnético que atraviesa una espira puede alterarse como resultado de un cambio de a) el área de la bobina, b) la intensidad del campo magnético, c) la orientación de la espira o d) todos los anteriores.

- OM** Para que aparezca una corriente inducida en una espira de alambre, *a*) debe haber un flujo magnético en ella, *b*) el plano de la espira debe ser paralelo al campo magnético, *c*) el plano de la espira debe ser perpendicular al campo magnético o *d*) el flujo magnético que pasa por ella debe variar en el tiempo.
- OM** Espiras individuales e idénticas A y B están orientadas de manera que inicialmente tienen la cantidad máxima de flujo en un campo magnético. Entonces, la espira A se hace girar rápidamente de forma que su normal sea perpendicular al campo magnético, y, al mismo tiempo, la espira B se hace girar de forma que su normal forme un ángulo de 45° con el campo. ¿Cómo se comparan sus fuerzas electromotrices inducidas? *a*) Son iguales, *b*) la de A es mayor que la de B, *c*) la de B es mayor que la de A o *d*) no es posible conocer las magnitudes relativas de las fuerzas electromotrices a partir de los datos.
- OM** Espiras individuales idénticas A y B están orientadas de manera que tienen la cantidad máxima de flujo cuando se colocan en un campo magnético. Ambas espiras mantienen su orientación relativa al campo, pero, en la misma cantidad de tiempo, A se mueve a una región donde el campo es más intenso, mientras que B se mueve a una región donde el campo es más débil. ¿Cómo se comparan sus fuerzas electromotrices inducidas? *a*) Son iguales, *b*) la de A es mayor que la de B, *c*) la de B es mayor que la de A o *d*) no es posible conocer las magnitudes relativas de las fuerzas electromotrices a partir de los datos.
- PC** Un imán recto se deja caer a través de una bobina de alambre como se ve en la  figura 6.26. *a*) Describa lo que se observa en el galvanómetro, trazando una gráfica de fem inducida en función de *t*. *b*) ¿El imán cae libremente? Explique por qué.

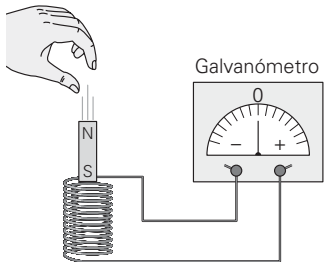


FIGURA 6.26 Campo magnético variable en el tiempo ¿Qué medirá el galvanómetro? Véase el ejercicio 6.


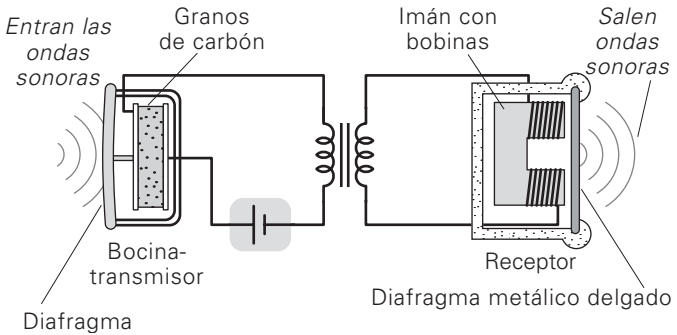
- PC** En la figura 6.1b, ¿cuál sería la dirección de la corriente inducida en la espira si, en lugar del polo norte, se acercara el polo sur del imán?
- PC** En la figura 6.7a, ¿cómo movería usted la bobina para evitar la inducción de cualquier corriente en ella? Explique su respuesta.
- PC** La fem inducida en una espira cerrada ¿depende del valor del campo magnético en la espira? Explique su respuesta.
- PC** Dos alumnos dejan caer dos poderosos imanes idénticos, al mismo tiempo, al interior de dos tubos verticales de iguales dimensiones ( figura 6.27). Un tubo es de co-



FIGURA 6.27 ¿Caída libre? Véase el ejercicio 10.

bre y el otro es de plástico. ¿De cuál tubo saldrá primero uno de los imanes? ¿Por qué?

- PC** Un teléfono básico consiste en una bocina transmisora y un receptor ( figura 6.28). Hasta la llegada de los teléfonos digitales en la década de 1990, el transmisor tenía un diafragma acoplado a una cámara de carbón (llamada *botón*), con granos de carbón sueltos en su interior. Al vibrar el diafragma por las ondas sonoras que le llegaban, variaba la presión en los granos haciendo que se colocaran más o menos estrechamente. El resultado era que cambiaba la resistencia del botón. El receptor convertía estos impulsos eléctricos en sonido. Aplique los principios de electricidad y magnetismo que ha aprendido para explicar el funcionamiento básico de esta clase de teléfono.

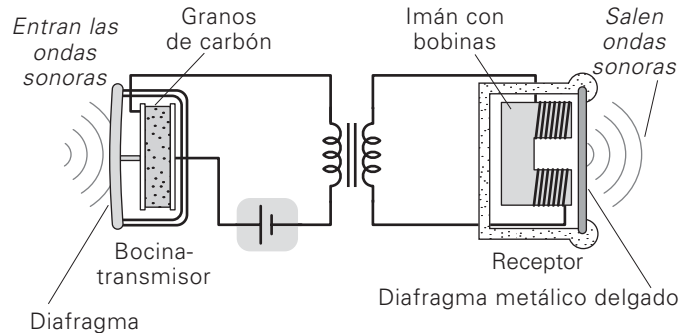
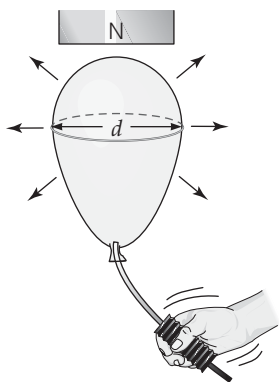


FIGURA 6.28 Funcionamiento del teléfono Véase el ejercicio 11.

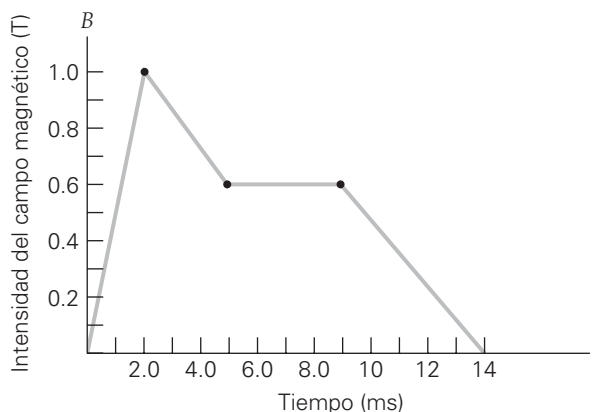
- Una espira circular con 0.015 m^2 de área está en un campo magnético uniforme de 0.30 T . ¿Cuál es el flujo a través del plano de la espira, si se encuentra *a*) paralela al campo, *b*) formando un ángulo de 37° con el campo y *c*) perpendicular al campo?
- Una espira circular (de 20 cm de radio) se coloca dentro de un campo magnético uniforme de 0.15 T . ¿Qué ángulo (o ángulos) entre la normal al plano de la espira y el campo dará por resultado un flujo con magnitud de $1.4 \times 10^{-2} \text{ T} \cdot \text{m}^2$?
- El plano de una espira conductora de 0.020 m^2 de área es perpendicular a un campo magnético uniforme de 0.30 T . Si el campo baja a cero en 0.0045 s , ¿cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira?
- Una espira en forma de triángulo rectángulo, con un cateto de 40.0 cm e hipotenusa de 50.0 cm , está en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme de 550 mT . ¿Cuál es el flujo que la atraviesa?
- Una bobina cuadrada de alambre con 10 vueltas está en un campo magnético de 0.25 T . El flujo total que pasa por ella es de $0.50 \text{ T} \cdot \text{m}^2$. Calcule el área de una vuelta si el campo *a*) es perpendicular al plano de la bobina y *b*) forma un ángulo de 60° con el plano de la bobina.
- Un solenoide ideal con una corriente de 1.5 A tiene 3.0 cm de radio, y su densidad de devanado es de 250 vueltas/m. ¿Cuál es el flujo magnético (que se debe a su propio campo) que pasa sólo por el centro de una de sus espiras?
- Un campo magnético forma ángulos rectos con el plano de una espira de alambre. Si el campo disminuye 0.20 T en $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$, y la magnitud de la fem promedio inducida en la espira es de 80 V , ¿cuál es el área de la espira?

19. ●● Una espira cuadrada de alambre tiene lados de 40 cm, y está en un campo magnético uniforme perpendicular a su área. Si la intensidad inicial del campo es de 100 mT y baja a cero en 0.010 s, ¿cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira?
20. ●● El flujo magnético que atraviesa una espira de alambre se reduce de 0.35 a 0.15 Wb en 0.20 s. La corriente inducida promedio en la bobina es de 10 A. Calcule la resistencia del alambre.
21. ●● Cuando el flujo magnético que atraviesa una sola espira de alambre aumenta en $30 \text{ T} \cdot \text{m}^2$, se produce una corriente promedio de 40 A en el conductor. Suponiendo que la resistencia del alambre es de 2.5Ω , ¿en cuánto tiempo aumentó el flujo?
22. ●● En 0.20 s, una bobina de alambre con 50 vueltas desarrolla una fem inducida promedio de 9.0 V, que se debe a un campo magnético variable perpendicular al plano de la bobina. El radio de la bobina mide 10 cm, y la intensidad inicial del campo magnético es de 1.5 T. Suponiendo que la intensidad del campo disminuye con el tiempo, ¿cuál es su intensidad final?
23. El ●● Un hilo de alambre de longitud ajustable se enreda alrededor de la circunferencia de un globo esférico. Hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira (▼ figura 6.29). a) Si el globo se infla, ¿qué dirección tiene la corriente inducida, viendo de arriba hacia abajo? 1) Sentido contrario a las manecillas del reloj, 2) el sentido de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. b) Si la magnitud del campo magnético es de 0.15 T y el diámetro de la espira aumenta de 20 a 40 cm en 0.040 s, ¿cuál es la magnitud del valor promedio de la fem inducida en la espira?



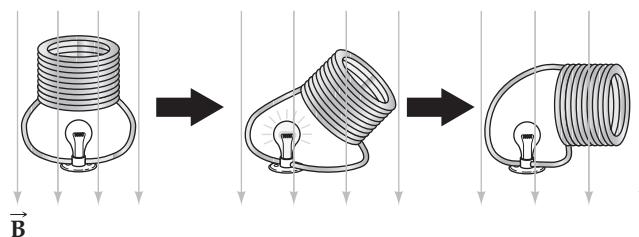
◀ FIGURA 6.29 Energía de bombeo Véase el ejercicio 23.

24. ●● El campo magnético perpendicular al plano de una espira de alambre de 0.10 m^2 de área cambia al paso del tiempo en la forma que se ve en la ► figura 6.30. ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la espira para cada segmento de la gráfica (por ejemplo, de 0 a 2.0 ms)?
25. El ●● Un niño va en línea recta hacia el norte con rapidez constante, cargando una varilla metálica. La varilla está orientada en dirección este-oeste, y es paralela al piso. a) No habrá fem inducida cuando la varilla está 1) en el ecuador terrestre, 2) cerca de los polos magnéticos de la Tierra o 3) entre el ecuador y los polos. ¿Por qué? b) Suponga que el campo magnético de la Tierra es $1.0 \times 10^{-4} \text{ T}$ cerca del Polo Norte y $1.0 \times 10^{-5} \text{ T}$ cerca del ecuador. Si el niño corre con una rapidez de 5.0 m/s en ese lugar, y la varilla mide 1.0 m de longitud, calcule la fem inducida en la varilla.



▲ FIGURA 6.30 Campo magnético en función del tiempo Véase el ejercicio 24.

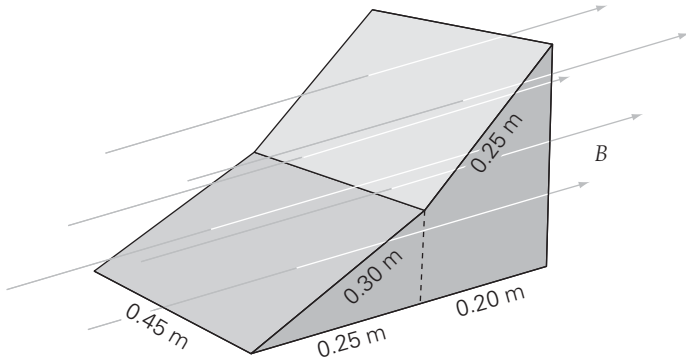
26. ●● Un avión metálico de 30 m de envergadura vuela en dirección horizontal con una rapidez constante de 320 km/h, en una región donde el componente vertical del campo magnético terrestre es $5.0 \times 10^{-5} \text{ T}$. ¿Cuál es la fem inducida por el movimiento, entre las puntas de las alas del avión?
27. ●● Suponga que la varilla metálica de la figura 6.11 mide 20 cm de longitud y que se mueve a 10 m/s en un campo magnético de 0.30 T, y que el marco metálico está cubierto por un material aislante. Calcule a) la magnitud de la fem inducida a través de la varilla y b) la corriente en la varilla.
28. ●●● El flujo que atraviesa una espira de alambre cambia de manera uniforme de $+40 \text{ Wb}$ a -20 Wb en 1.5 ms. a) ¿Cuál es el significado del flujo negativo? b) ¿Cuál es la fem promedio inducida en la espira? c) Si se quisiera duplicar la fem promedio inducida cambiando sólo el tiempo, ¿cuál sería el nuevo intervalo de tiempo? d) Si se quisiera duplicar la fem promedio inducida cambiando sólo el valor del flujo final, ¿cuál sería éste?
29. ●●● Una bobina de alambre de 10 vueltas y 0.055 m^2 de área se coloca en un campo magnético de 1.8 T, y se orienta de tal forma que su área es perpendicular al campo. A continuación, la bobina se gira 90° en 0.25 s, y termina con su área paralela al campo (▼ figura 6.31). ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina?



▲ FIGURA 6.31 Inclinación de la bobina Véanse los ejercicios 27 y 28.

30. El ●●● En la figura 6.31, la bobina se gira 180° en el mismo intervalo de tiempo que el del ejercicio 29. a) ¿Cómo se compara la magnitud de la fem promedio con la del ejercicio 29, donde la bobina se inclinó sólo 90° ? 1) Es mayor, 2) es igual o 3) es menor. ¿Por qué? b) ¿Cuál es la magnitud de la fem promedio en este caso?

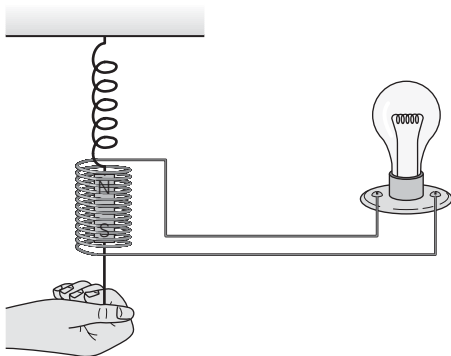
31. ●●● Un campo magnético uniforme de 0.50 T penetra en un bloque con doble pendiente, como el que se ilustra en la ▼ figura 6.32. *a)* Determine el flujo magnético que atraviesa cada superficie inclinada del bloque. *b)* Determine el flujo a través de la superficie trasera vertical del bloque. *c)* Determine el flujo a través de la superficie plana horizontal del bloque. *d)* ¿Cuál es el flujo total a través de todas las superficies exteriores? Explique el significado de su respuesta.



▲ FIGURA 6.32 Flujo magnético Véase el ejercicio 31. (El dibujo no está a escala.)

6.2 Generadores eléctricos y contra fem

32. OM Si no se hace nada más que aumentar el área de la bobina en un generador de ca, como resultado *a)* aumentará en la frecuencia de rotación, *b)* disminuirá la fem máxima inducida o *c)* aumentará la fem máxima inducida.
33. OM La contra fem de un motor depende de *a)* el voltaje de alimentación, *b)* la corriente de alimentación, *c)* la rapidez de giro de la armadura o *d)* ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
34. PC ¿Cuál es la orientación de la espira de armadura en un generador simple de ca cuando el valor de *a)* la fem es máximo y *b)* el flujo magnético es máximo? Explique por qué la fem máxima no ocurre cuando el flujo es máximo.
35. PC Un alumno tiene una brillante idea para fabricar un generador. Para la configuración que se ve en la ▼ figura 6.33, el imán se jala hacia abajo y se suelta. Con un resorte muy elástico, el alumno cree que debe haber una producción de electricidad relativamente continua. ¿Cuál es el error de esta idea?



▲ FIGURA 6.33 ¿Genio inventor? Véase el ejercicio 35.

36. PC En un motor de cd, si la armadura se traba, o si gira con mucha lentitud cuando la carga es muy grande, las bobinas se quemarán con mucha facilidad. ¿Por qué?

37. PC Si se desea fabricar un generador de ca más compacto reduciendo el área de las bobinas, ¿cómo tendrían que compensarse los demás factores para mantener la misma salida que antes?
38. ● Un generador de ca, que se utiliza en una sala de emergencia de un hospital, funciona a una frecuencia de giro de 60 Hz. Si el voltaje de salida es máximo (en magnitud) cuando $t = 0$, ¿cuándo estará en su siguiente *a)* valor máximo (en magnitud), *b)* valor cero y *c)* valor inicial?
39. ● Un alumno fabrica un generador sencillo con una sola espira cuadrada de 10 cm por lado. A continuación la hace girar a 60 Hz de frecuencia, en un campo magnético de 0.015 T. *a)* ¿Cuál es la fem máxima producida? *b)* ¿Cuál sería la fem máxima producida si utilizara 10 de esas espiras?
40. ●● Un generador sencillo de ca consiste en una bobina de 10 vueltas (cada vuelta tiene 50 cm^2 de área). La bobina gira en un campo magnético uniforme de 350 mT, con 60 Hz de frecuencia. *a)* Escriba una expresión, con la forma de la ecuación 6.5, para determinar la variación de la fem del generador en función del tiempo. *b)* Calcule la fem máxima.
41. EI ●● Una fuente de ca de 60 Hz tiene 120 V de voltaje máximo. Un alumno quiere determinar el voltaje a $1/180$ de segundo después de que su valor es cero. *a)* ¿Cuántos voltajes posibles son así? 1) Uno, 2) dos o 3) tres. ¿Por qué? *b)* Calcule todos los voltajes posibles.
42. ●● Se debe construir un generador de ca con fem máxima de 400 V con espiras de alambre de 0.15 m de radio. Funcionará a una frecuencia de 60 Hz, y usará un campo magnético de 200 mT. ¿Cuántas espiras se necesitan?
43. ●● Un generador de ca funciona a una frecuencia de giro de 60 Hz, y su fem máxima es de 100 V. Suponga que tiene cero fem al arranque. ¿Cuál es la fem instantánea *a)* $1/240 \text{ s}$ después del arranque y *b)* $1/120 \text{ s}$ después de pasar por cero, cuando comienza a invertir su polaridad?
44. ●● La armadura de un generador simple de ca tiene 20 espiras circulares de alambre, cada una de 10 cm de radio. Gira con 60 Hz de frecuencia, en un campo magnético uniforme de 800 mT. ¿Cuál es la fem máxima inducida en las espiras, y con qué frecuencia se llega a este valor?
45. ●● La armadura de un generador de ca tiene 100 vueltas, cada una de las cuales es una espira rectangular de 8.0 por 12 cm. El generador tiene una salida senoidal con 24 V de amplitud. Si el campo magnético del generador es de 250 mT, ¿con qué frecuencia gira la armadura?
46. EI ●● *a)* Para aumentar la salida de un generador de ca, un alumno tiene la opción de duplicar el campo magnético del generador, o bien, su frecuencia. Para maximizar el aumento de la fem de salida, 1) debería duplicar el campo magnético, 2) debería duplicar la frecuencia o 3) no importa cuál de ellos se duplique. Explique por qué. *b)* Dos alumnos muestran sus generadores de ca en una feria científica. El generador que fabricó el alumno A tiene 100 cm^2 de área de espiras, y gira en un campo magnético de 20 mT a 60 Hz. El que fabricó el alumno B tiene 75 cm^2 de área de espira, y gira en un campo magnético de 200 mT a 120 Hz. ¿Cuál de los dos genera la mayor fem máxima? Justifique matemáticamente la respuesta.

47. **El ●●** Un motor tiene 2.50Ω de resistencia y se conecta a una línea de 110 V. *a)* La corriente de funcionamiento del motor es 1) mayor que 44 A, 2) 44 A o 3) menor que 44 A. ¿Por qué? *b)* Si la contra fem del motor es de 100 V a su rapidez de operación, ¿cuál es su corriente de funcionamiento?
48. **●●●** El motor de arranque de un automóvil tiene 0.40Ω de resistencia en los devanados de la armadura. Trabaja con 12 V y tiene 10 V de contra fem, a su rapidez normal de funcionamiento. ¿Cuánta corriente extrae el motor *a)* cuando gira a su rapidez de funcionamiento, *b)* cuando gira a la mitad de su rapidez final de rotación y *c)* cuando arranca?
49. **●●●** Un motor de cd de 240 V tiene una armadura con 1.50Ω de resistencia. Al trabajar a su rapidez de funcionamiento toma 16.0 A de corriente. *a)* ¿Cuál es la contra fem del motor cuando funciona en condiciones normales? *b)* ¿Cuál es la corriente en el arranque? (Suponga que no hay resistencias adicionales en el circuito.) *c)* ¿Qué resistencia en serie se necesitaría para limitar a 25 A la corriente de arranque?

6.3 Transformadores y transmisión de energía

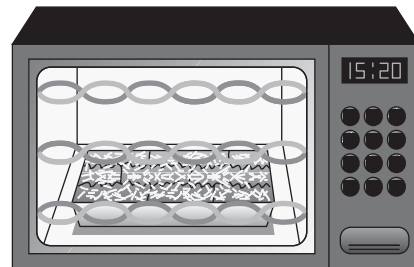
50. **OM** Un transformador en el sistema de distribución de energía eléctrica localizado justo antes de la casa de usted tiene *a)* más devanados en la bobina primaria, *b)* más devanados en la bobina secundaria o *c)* la misma cantidad de devanados en la bobina primaria que en la secundaria.
51. **OM** La potencia que entrega un transformador real de bajada es *a)* mayor que la potencia de entrada, *b)* menor que la potencia de entrada o *c)* igual que la potencia de entrada.
52. **PC** Explique por qué los sistemas de distribución de energía eléctrica operan a tan altos voltajes si éstos son peligrosos.
53. **PC** En su taller de reparaciones automotrices de emergencia, usted necesita un transformador de bajada, pero sólo hay transformadores de subida. ¿Es posible utilizar un transformador de subida como transformador de bajada? Si es así, explique cómo tendría que conectarse.
54. **El ●** La bobina secundaria de un transformador ideal tiene 450 vueltas, y la primaria tiene 75 vueltas. *a)* Este transformador es 1) de subida o 2) de bajada. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la razón entre la corriente en la bobina primaria y la corriente en la bobina secundaria? *c)* ¿Cuál es la razón entre el voltaje a través de la bobina primaria y el voltaje en la bobina secundaria?
55. **●** Un transformador ideal aumenta de 8.0 a 2000 V, y la bobina secundaria de 4000 vueltas conduce 2.0 A. *a)* Calcule el número de vueltas en la bobina primaria. *b)* Calcule la corriente en la bobina primaria.
56. **●** La bobina primaria de un transformador ideal tiene 720 vueltas, mientras que la secundaria, 180 vueltas. Si la bobina primaria conduce 15 A a un voltaje de 120 V, ¿cuáles son *a)* el voltaje y *b)* la corriente de salida de la bobina secundaria?
57. **●** El transformador de la fuente de poder para una unidad Zip de 250 MB de computadora cambia una entrada de 120 V a una salida de 5.0 V. Calcule la razón entre el número de vueltas en la bobina primaria y el número de vueltas en la bobina secundaria.
58. **●** La bobina primaria de un transformador ideal se conecta con una fuente de 120 V y toma 10 A. La bobina secundaria tiene 800 vueltas, y por ella pasa una corriente de 4.0 A. *a)* ¿Cuál es el voltaje a través de la bobina secundaria? *b)* ¿Cuántas vueltas hay en la bobina primaria?
59. **●** Un transformador ideal tiene 840 vueltas en el devanado primario y 120 vueltas en el secundario. Si el primario toma 2.50 A a 110 V, ¿cuáles son *a)* la corriente y *b)* el voltaje de salida de la bobina secundaria?
60. **●●** La eficiencia e de un transformador se define como la relación de la potencia que sale entre la potencia que entra:
- $$e = \frac{P_s}{P_p} = \frac{I_s V_s}{I_p V_p}.$$
- a)* Demuestre que, en función de las relaciones entre corrientes y voltajes de la ecuación 6.10 para un transformador ideal, se obtiene una eficiencia del 100%. *b)* Suponga que un transformador de subida aumenta el voltaje de línea de 120 A a 240 V, mientras que la corriente de salida se reduce de 12.0 A a 5.0 A. ¿Cuál es la eficiencia del transformador? ¿Éste es ideal?
61. **El ●●** Las especificaciones de un transformador en un electrodoméstico pequeño dicen lo siguiente: Alimentación 120 V, 6.0 W; Salida 9.0 V, 300 mA. *a)* Este transformador es 1) ideal o 2) no ideal. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es su eficiencia? (Véase el ejercicio 60.)
62. **●●** Un componente de un circuito trabaja a 20 V y 0.50 A. Para convertir el voltaje doméstico normal de 120 V al voltaje adecuado, se utiliza un transformador con 300 vueltas en su devanado primario. *a)* ¿Cuántas vueltas debe tener en su devanado secundario? *b)* ¿Cuánta corriente pasa por el devanado primario?
63. **●●** Un transformador del timbre de una puerta baja el voltaje de 120 a 6.0 V, y suministra una corriente de 0.5 A al mecanismo de la campanilla. *a)* ¿Cuál es la relación de vueltas de ese transformador? *b)* ¿Cuál es la corriente que entra al transformador?
64. **●●** Un generador de ca suministra 20 A a 440 V, a una línea eléctrica de 10 000 V. Si el transformador de subida tiene 150 vueltas en su devanado primario, ¿cuántas vueltas tiene el secundario?
65. **●●** La electricidad generada en el ejercicio 64 se transmite por una línea de 80.0 km de longitud, cuya resistencia es de $0.80 \Omega/\text{km}$. *a)* ¿Cuántos kilowatts-hora se ahorran en 5.00 h al elevar el voltaje? *b)* A $\$0.10/\text{kWh}$, ¿cuánto ahorra (con aproximación de $\$10$) el consumidor en un mes de 30 días, suponiendo que se le suministra la energía de forma continua?
66. **●●** En una subestación de área, el voltaje baja de 100 000 a 20 000 V. Si el circuito de 20 000 V maneja 10 MW de potencia, ¿cuáles son las corrientes en el devanado primario y en el secundario del transformador?
67. **●●** Un voltaje de 200 000 V en una línea de transmisión se reduce en una subestación de área a 100 000 V, después a 7200 V en una subestación de distribución y, por último, a 240 V en un poste de servicio doméstico. *a)* ¿Qué relación de vueltas N_s/N_p se requiere en cada paso de reducción? *b)* ¿Por qué factor aumenta la corriente en cada bajada de voltaje? *c)* ¿Cuál es el factor general de subida de la corriente, desde la línea de transmisión hasta el poste de servicio?

68. ●● Una central produce 50 A y 20 kV de energía eléctrica. Esta energía se transmite a 25 km de distancia por cables cuya resistencia es de $1.2 \Omega/\text{km}$. a) ¿Cuál es la pérdida de potencia en las líneas, si se transmitiera la energía a 20 kV? b) ¿Cuál debería ser el voltaje de salida del generador, para disminuir la pérdida de potencia por un factor de 15?
69. ●● Se transmite electricidad por una línea de transmisión de 175 km de longitud, con $1.2 \Omega/\text{km}$ de resistencia. La salida del generador es de 50 A, y su voltaje de operación es de 440 V. Este voltaje tiene una sola subida y se transmite a 44 kV. a) ¿Cuánta potencia se pierde en forma de calor de joule en la transmisión? b) ¿Cuál debe ser la relación de vueltas de un transformador en el punto de entrega para que el voltaje de salida sea de 220 V? (Ignore la caída de voltaje en la línea.)

6.4 Ondas electromagnéticas

70. **OM** En relación con el extremo azul del espectro visible, las regiones del amarillo y del verde tienen a) mayores frecuencias, b) mayores longitudes de onda, c) menores longitudes de onda o d) tanto a como c.
71. **OM** ¿Cuál de las siguientes ondas electromagnéticas tiene menor la frecuencia? a) las UV, b) las IR, c) los rayos X o d) las microondas.
72. **OM** ¿Cuál de las siguientes ondas electromagnéticas viaja más rápido en el vacío? a) La luz verde, b) la luz infrarroja, c) los rayos gamma, d) las ondas de radio o e) todas viajan con la misma rapidez.
73. **OM** Si se duplica la frecuencia de una fuente de luz azul, ¿qué tipo de luz emitiría? a) Roja, b) azul, c) violeta, d) UV o e) rayos X.
74. **PC** Una antena se conecta a una batería de automóvil. ¿La antena emitirá ondas electromagnéticas? ¿Por qué? Explique su respuesta.
75. **PC** En un día nublado de verano, usted trabaja a la intemperie y siente frío. Sin embargo, por la noche se da cuenta de que tiene quemaduras de sol. Explique cómo es posible esto.
76. **PC** La radiación ejerce presión sobre las superficies (*presión de radiación*) en las que incide. ¿La presión será mayor sobre una superficie brillante que sobre una superficie oscura? ¿Será mayor si se utiliza una fuente brillante o una del mismo color pero con tono más pálido? Explique sus dos respuestas.
77. **PC** El radar funciona a longitudes de onda de algunos centímetros, mientras que el radio de FM funciona con longitudes de onda del orden de varios metros. ¿Cómo son las frecuencias del radar en comparación con las de la banda de FM de un radio? ¿Cómo se compara la rapidez de unas y otras en el vacío?
78. ● Calcule las frecuencias de las ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda son a) 3.0 cm, b) 650 nm o c) 1.2 fm. d) Clasifique el tipo de luz en cada caso.
79. ● En un pequeño poblado sólo hay dos estaciones AM de radio, una de 920 kHz y la otra de 1280 kHz. ¿Cuáles son las longitudes de onda de las ondas de radio que transmite cada estación?

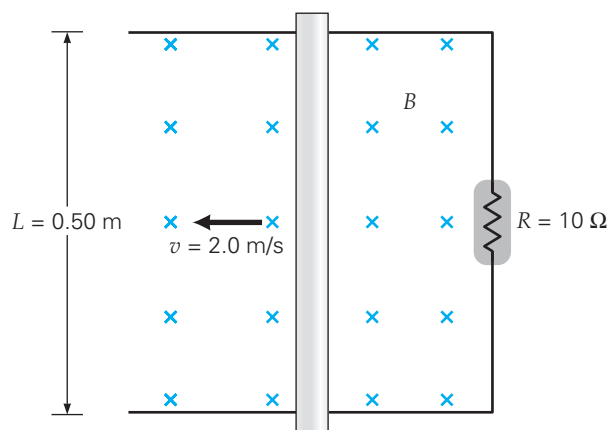
80. ● Un meteorólogo de una estación de TV usa el radar para determinar la distancia a una nube. Observa que transcurren 0.24 ms de tiempo entre el envío y el regreso de un impulso de radar. ¿A qué distancia está la nube?
81. ● ¿Cuánto tiempo tarda un rayo láser en ir de la Tierra a un espejo en la Luna, y regresar? Suponga que la distancia entre la Tierra y la Luna es de 2.4×10^5 millas. (Este experimento se realizó cuando, en las expediciones de las naves *Apollo* a principios de los 70, se dejaron reflectores de láser en la superficie lunar.)
82. ●● La luz anaranjada tiene 600 nm de longitud de onda, y la verde, 510 nm. a) ¿Cuál es la diferencia de frecuencias entre las dos clases de luz? b) Si se duplica la longitud de onda en ambos casos, ¿qué tipo de luz se tendría entonces?
83. ●● Cierta clase de antena de radio se llama *antena de cuarto de onda*, porque su longitud es igual a un cuarto de la onda que se va a recibir. Si usted fuera a fabricar esas antenas para las bandas de radio de AM y de FM, usando en cada banda sus frecuencias medias, ¿qué longitudes de cable utilizaría?
84. **EI** ●●● Los hornos de microondas tienen puntos fríos y calientes, a causa de las ondas electromagnéticas estacionarias, de forma similar a los nodos y antinodos que existen en las ondas estacionarias en las cuerdas (▼ figura 6.34). a) Cuanto mayor sea la distancia entre los puntos fríos, 1) la frecuencia es mayor, 2) la frecuencia es menor o 3) la frecuencia es independiente de esa distancia. ¿Por qué? b) Su horno de microondas tiene puntos fríos (nodos) aproximadamente cada 5.0 cm, y el de su vecino los tiene cada 6.0 cm. ¿Cuál de los dos hornos opera a mayor frecuencia y por cuánto?



▲ FIGURA 6.34 ¿Lugares fríos? Véase el ejercicio 84.

Ejercicios adicionales

85. **EI** En la ► figura 6.35, una barra metálica de longitud L se mueve en una región de campo magnético constante. Ese campo se dirige hacia la página. a) La dirección de la corriente inducida y que pasa por el resistor es 1) hacia arriba, 2) hacia abajo o 3) no hay corriente. ¿Por qué? b) Si la magnitud del campo magnético es de 250 mT, ¿cuál es la corriente?
86. Suponga que una moderna planta eléctrica tiene un salida de potencia de 1.00 GW a 500 V. El voltaje de transmisión se sube a 750 kV en una serie de cinco transformadores idénticos. a) ¿Cuál es la corriente de salida de la planta? b) ¿Cuál es la relación de vueltas en cada uno de los transformadores? c) ¿Cuál es la corriente en las líneas de distribución de alto voltaje?



▲ FIGURA 6.35 Fem de movimiento Véase el ejercicio 85.

87. Una turista europea utiliza un transformador durante su estancia en Estados Unidos, principalmente para hacer funcionar su secadora de cabello de 1200 watts que llevó consigo. Entonces, cuando la conecta al tomacorriente de su cuarto de hotel en Los Ángeles, nota que funciona *exactamente* como lo hace en su casa. El voltaje y la corriente de entrada son 120 V y 11.0 A, respectivamente. *a)* ¿Se trata de un transformador ideal? Explique cómo llegó a su conclusión. *b)* Si no es un transformador ideal, ¿cuál es su eficiencia?
88. Un solenoide de 20.0 cm de longitud tiene 5000 espiras circulares. Por él pasa una corriente de 10.0 A. Cerca de su centro se coloca una bobina plana y pequeña de 100 espiras circulares, cada una con un radio de 3.00 mm. Esta pequeña bobina está orientada de forma que su área recibe el flujo magnético máximo. Un interruptor se abre en el circuito del solenoide y su corriente cae a cero en 15.0 ms. *a)* ¿Cuál era el flujo magnético inicial a través de la bobina interior? *b)* Determine la fem promedio inducida en la pequeña bobina durante los 15.0 ms. *c)* Si usted observa a lo largo del eje de mayor longitud del solenoide de forma que la corriente inicial de 10.0 A tenga el sentido de las manecillas del reloj, determine la dirección de la corriente inducida en la pequeña bobina interior durante el tiempo en que la corriente disminuye a cero.
89. **EI** Una bobina plana de alambre de cobre consta de 100 espiras y tiene una resistencia total de 0.500 Ω. La bobina tiene un diámetro de 4.00 cm y se encuentra en un campo magnético uniforme que apunta alejándose de usted (es decir, hacia la página). Además, está orientada en el plano de la página. Luego se tira de ella hacia la derecha y se saca por completo del campo. *a)* ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en la bobina? 1) En el sentido de las manecillas del reloj, 2) en sentido contrario al de las manecillas del reloj o 3) no hay corriente inducida. *b)* Durante el tiempo en que la bobina abandona el campo, se mide una corriente promedio inducida de 10.0 mA. ¿Cuál es la fem promedio inducida en la bobina? *c)* Si la intensidad del campo es de 3.50 mT, ¿cuánto tiempo se requirió para sacar de éste la bobina?
90. El transformador de un poste de cables de servicio baja el voltaje de 20 000 a 220 V, y abastece a un departamento de ciencias de una universidad. Durante el día, el transformador entrega energía eléctrica a una tasa de 6.6 kW. *a)* Suponiendo que el transformador es ideal, durante ese tiempo, ¿cuáles son las corrientes primaria y secundaria en el transformador? *b)* Si el transformador tiene sólo un 95% de eficiencia (pero aún así entrega energía a una tasa de 6.60 kW a 220 V), ¿cómo se compara esta corriente de entrada con el caso ideal? *c)* ¿Cuál es la tasa de pérdida de calor en el transformador no ideal?
91. Supongamos que usted desea fabricar un generador eléctrico utilizando el campo magnético de la Tierra, que tiene una intensidad de 0.040 mT en su localidad. Su diseño de generador requiere de una bobina de 1000 devanados, que giran exactamente a 60 Hz. La bobina está orientada de forma que la normal al área se alinea con el campo de la Tierra al final de cada ciclo. ¿Cuál debe ser el diámetro de la bobina para generar un voltaje máximo de 170 V (que se requiere para obtener un promedio de 120 V)? ¿Es ésta una forma práctica de generar energía eléctrica?
92. Se envía una señal de radio a una sonda espacial que viaja en el plano del Sistema Solar. Después de 3.5 días, se recibe la respuesta en la Tierra. Suponiendo que las computadoras de la sonda tardaron 4.5 h en procesar las instrucciones de la señal y en enviar el mensaje de retorno, ¿la sonda está dentro del Sistema Solar? (Suponga que el radio del Sistema Solar es 40 veces la distancia entre la Tierra y el Sol.)
93. Una bobina de 100 espiras de alambre tiene un diámetro de 2.50 cm y está orientada en un campo magnético constante de 0.250 T, de manera que inicialmente no tiene flujo magnético. En 0.115 s, la bobina se voltea de forma que su normal forma un ángulo de 45° con la dirección del campo. Si en la bobina se induce una corriente promedio de 4.75 mA durante su rotación, ¿cuál es la resistencia de la bobina?

PARTE **2**

Óptica e instrumentos ópticos

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.1 | Frentes de onda y rayos | 188 |
| 7.2 | Reflexión | 189 |
| 7.3 | Refracción | 190 |
| 7.4 | Reflexión interna total y fibras ópticas | 199 |
| 7.5 | Dispersión | 203 |

HECHOS DE FÍSICA

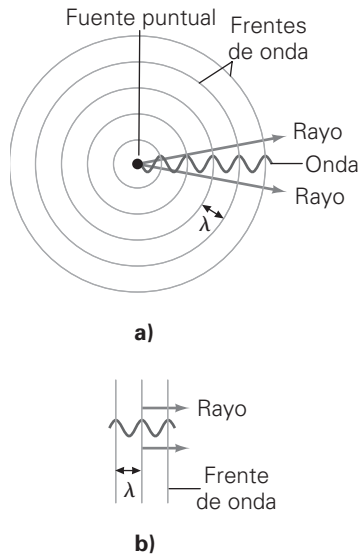
- A causa de la reflexión total interna, las fibras ópticas permiten que las señales viajen por largas distancias sin necesidad de repetidores (amplificadores), para compensar las reducciones en la intensidad de la señal. Los repetidores de fibras ópticas, por lo general, están separados unos 100 km (62 mi), en comparación con una distancia de 1.5 km (aproximadamente 1 mi) que separa a los repetidores en los sistemas eléctricos (basados en cables).
- Cada día se instalan nuevos cables de fibras ópticas para redes de computadoras que equivalen a darle tres vueltas a la Tierra. Las fibras ópticas tienen diámetros mucho menores que los cables de cobre. Las fibras son tan pequeñas que miden 10 micrones de diámetro. En comparación, el cabello humano, en promedio, mide 25 micrones de diámetro.
- La mayoría de las lentes de cámara están cubiertas con una fina película para reducir la pérdida de luz a causa de la reflexión. Para una lente común de cámara constituida por siete elementos, alrededor del 50% de la luz se perdería por la reflexión si las lentes no estuvieran cubiertas con estas finas películas.
- En 1998, científicos del MIT fabricaron un espejo perfecto, es decir, con 100% de reflexión. Un tubo alineado con este tipo de espejo transmitiría luz a grandes distancias mejor que las fibras ópticas.



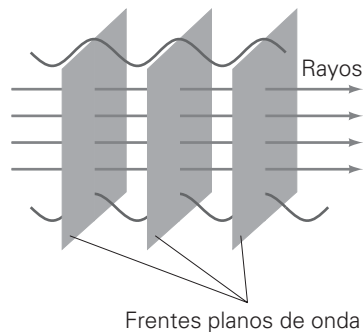
Vivimos en un mundo visual, rodeados por atractivas imágenes, como la que se ve en la foto. La manera como se forman esas imágenes es algo que consideramos obvio, hasta que vemos algo que no resulta fácil de explicar. La *óptica* es el estudio de la luz y la visión. La visión humana requiere de la *luz visible*, cuya longitud de onda va de 400 a 700 nm (véase la figura 6.23). Todas las ondas electromagnéticas comparten propiedades ópticas, como la reflexión y la refracción. La luz se comporta como una onda en su propagación (capítulo 9) y como una partícula (fotón) cuando interactúa con la materia.

En este capítulo investigaremos los fenómenos ópticos básicos de reflexión, refracción, reflexión total interna y dispersión. Los principios que rigen la reflexión explican el comportamiento de los espejos, mientras que los que rigen la refracción explican las propiedades de las lentes. Estos y otros principios nos permiten comprender muchos fenómenos ópticos de la vida diaria: por qué un prisma de vidrio descompone la luz en un espectro de colores, qué provoca los espejismos, cómo se forman los arco iris y por qué parecen acortarse las piernas de una persona que está de pie dentro de un lago o una piscina. También explicaremos algunos asuntos menos familiares, como el campo fascinante de las fibras ópticas.

Para investigar muchos aspectos de las propiedades de la luz, en especial la forma en que se propaga, se puede utilizar un método geométrico sencillo a base de líneas rectas y ángulos. Para estos fines no es necesario ocuparse de la naturaleza física (ondulatoria) de las ondas electromagnéticas, que se describió en el capítulo 6. Los principios de la óptica geométrica se presentarán aquí y se aplicarán con más detalle en el capítulo 8, al estudiar los espejos y las lentes.



▲ FIGURA 7.1 Frentes de onda y rayos. Un frente de onda se define por los puntos adyacentes de una onda que están en fase, como las crestas o los valles. Una línea perpendicular al frente de onda en la dirección de la propagación de esta última se llama rayo. **a)** Cerca de una fuente puntual, los frentes de onda son circulares en dos dimensiones y esféricos en tres dimensiones. **b)** Muy lejos de una fuente puntual, los frentes de onda son aproximadamente lineales o planos, mientras que los rayos son casi paralelos.



▲ FIGURA 7.2 Rayos de luz. Una onda plana viaja en una dirección perpendicular a sus frentes de onda. Un haz luminoso se puede representar con un grupo de rayos paralelos (o con un solo rayo).

7.1 Frentes de onda y rayos

OBJETIVO: Definir y explicar los conceptos de frente de onda y rayo.

Las ondas, ya sean electromagnéticas o de otro tipo, se describen en términos de los frentes de onda. Un **frente de onda** es la línea o superficie definida por las partes adyacentes de una onda que están en fase. Si se traza un arco que pase por una de las crestas de una onda circular en el agua, que se aleja de una fuente puntual, todas las partículas del arco estarán en fase (◀ figura 7.1a). Lo mismo sucedería con un arco a lo largo de una onda. Para una onda esférica tridimensional, como una de sonido o de luz, emitida de una fuente puntual, el frente de onda es una superficie esférica, no un círculo.

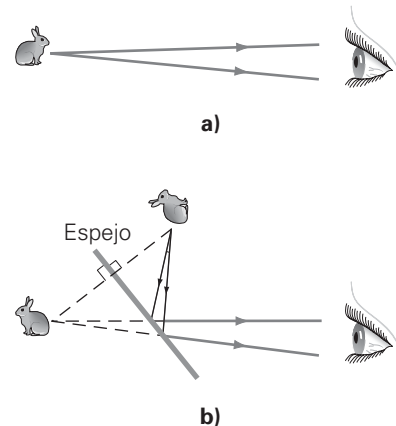
Muy lejos de la fuente, la curvatura de un segmento corto de una onda circular o esférica es extremadamente pequeña. Se puede considerar que ese segmento es un **frente de onda lineal** (en dos dimensiones) o un **frente de onda plano** (en tres dimensiones), de la misma forma que se supone que en un lugar determinado la superficie de la Tierra es plana (figura 7.1b). También es posible generar un frente de onda plano de forma directa, mediante una superficie luminosa plana. En un medio uniforme, los frentes de onda se propagan alejándose de la fuente, con una rapidez que es característica del medio. Esto se vio con las ondas sonoras, y lo mismo sucede con la luz, aunque su rapidez es mucho mayor. La rapidez de la luz es máxima en el vacío: $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Para fines prácticos, se considera que la rapidez de la luz en el aire es igual que en el vacío.

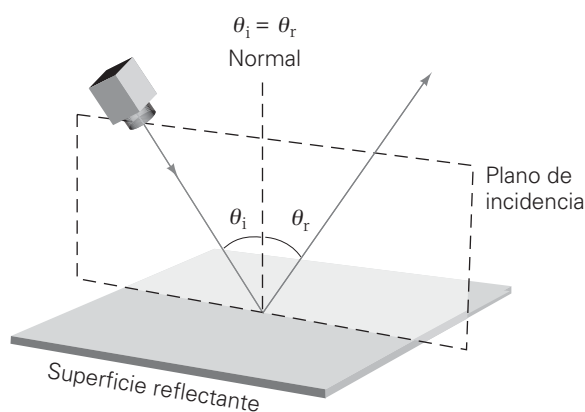
La descripción geométrica de una onda en términos de frentes de onda tiende a ignorar el hecho de que en realidad la onda está oscilando, al igual que las que se estudiaron en el capítulo 11 de *Física 11*. Esta simplificación va todavía más allá con el concepto de un rayo. Como se observa en la figura 7.1, una línea perpendicular a una serie de frentes de onda, y que apunta en la dirección de propagación, se llama **rayo**. Note que el rayo apunta en dirección del flujo de energía de la onda. Se supone que una onda plana viaja en línea recta en un medio, en la dirección de sus rayos, y perpendicular a sus frentes de onda. Un haz de luz se puede representar con un grupo de rayos, o con un solo rayo (◀ figura 7.2). La representación de la luz mediante rayos es adecuada para describir muchos fenómenos ópticos.

¿Cómo es que vemos los objetos que están a nuestro alrededor? Los vemos porque los rayos de esos objetos, o los rayos que parecen provenir de ellos, entran en nuestros ojos (▼ figura 7.3). Ahí, los rayos forman las imágenes correspondientes en la retina. En ocasiones, los rayos provienen directamente de los objetos —como en el caso de las fuentes de luz—, o bien, se reflejan o se refractan en ellos o en otros sistemas ópticos. En este proceso, nuestros ojos y cerebro trabajan juntos; sin embargo, no pueden decirnos si los rayos en realidad provienen de los objetos o sólo *aparentan* provenir de éstos. Por eso es que los magos consiguen engañar nuestra vista con ilusiones aparentemente imposibles.

El empleo de representaciones geométricas de frentes de onda y rayos para explicar fenómenos como la reflexión y la refracción de la luz se llama **óptica geométrica**. Sin embargo, hay algunos otros fenómenos, como la interferencia de la luz, que no se pueden analizar de esta forma, pues sólo se explican en términos de las características ondulatorias reales. Estos fenómenos se describirán en el capítulo 9.

► FIGURA 7.3 ¿Cómo es que vemos los objetos? Los vemos porque **a)** los rayos provenientes de ellos o **b)** los rayos que aparentan provenir de ellos entran en nuestros ojos.





◀ **FIGURA 7.4** La ley de la reflexión Según la ley de la reflexión, el ángulo de incidencia (θ_i) es igual al ángulo de reflexión (θ_r). Note que los ángulos se miden a partir de una normal (una línea perpendicular a la superficie reflectante). La normal y los rayos incidente y reflejado siempre están en el mismo plano.

7.2 Reflexión

OBJETIVOS: a) Explicar la ley de la reflexión y b) diferenciar entre reflexión regular (especular) e irregular (difusa).

La reflexión de la luz es un fenómeno óptico de enorme importancia: si la luz no se reflejara en los objetos que nos rodean hacia nuestros ojos, simplemente no los veríamos. La **reflexión** implica la absorción y la reemisión de la luz por medio de vibraciones electromagnéticas complejas en los átomos del medio reflectante. Sin embargo, este fenómeno se explica con facilidad mediante los rayos.

Un rayo de luz que incide sobre una superficie se describe con el **ángulo de incidencia** (θ_i). Se mide a partir de una *normal*: una línea perpendicular a la superficie reflectante o reflectora (▲ figura 7.4). Asimismo, el rayo reflejado se describe por su **ángulo de reflexión** (θ_r), que también se mide con respecto a la normal. La relación entre estos ángulos se expresa con la **ley de la reflexión**: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, es decir

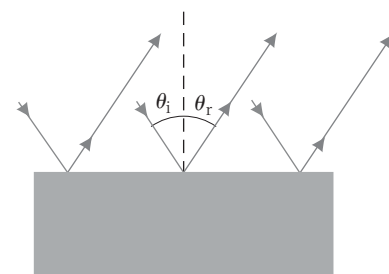
$$\theta_i = \theta_r \quad \text{ley de la reflexión} \quad (7.1)$$

Otros dos atributos de la reflexión son: 1) el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano, que a veces se llama plano de incidencia, y 2) los rayos incidente y reflejado están en lados opuestos de la normal.

Cuando la superficie reflectante es lisa, los rayos reflejados originados por rayos incidentes paralelos, también son paralelos (► figura 7.5a). Esta clase de reflexión se llama **reflexión regular** o **especular**. La reflexión en un espejo plano y bien pulido es especular o regular (figura 7.5b). Sin embargo, si la superficie reflectante es áspera, los rayos reflejados no son paralelos, por la naturaleza irregular de la superficie (► figura 7.6). A esta clase de reflexión se le llama **reflexión irregular** o **difusa**. La reflexión de la luz en esta página es un ejemplo de reflexión difusa porque el papel es áspero en el nivel microscópico. Las sección A fondo 7.1, en la p. 191, referente a una noche oscura y lluviosa, describe con mayor precisión la diferencia entre la reflexión especular y la difusa en un caso de la vida real.

Note que en las figuras 7.5a y 7.6 la ley de la reflexión se sigue aplicando de forma local, en las reflexiones especular y difusa. Sin embargo, la clase de reflexión de que se trate determina si se ven imágenes en una superficie reflectante. En la reflexión especular, los rayos reflejados, que son paralelos, producen una imagen al examinarlos con un sistema óptico, como el ojo o una cámara. La reflexión difusa no produce una imagen, porque la luz se refleja en varias direcciones.

Tanto la experiencia con la fricción como las investigaciones directas demuestran que todas las superficies son ásperas a escala microscópica. Entonces, ¿qué determina si la reflexión es especular o difusa? En general, si las dimensiones de las irregularidades superficiales son mayores que la longitud de onda de la luz, la reflexión es difusa. Así, para fabricar un buen espejo, se debe pulir vidrio (con un recubrimiento metálico) o algún metal cuando menos hasta que las irregularidades superficiales tengan más o menos el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz. Recuerde que, en el capítulo

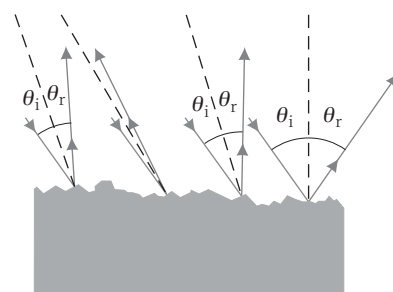


a) Diagrama de la reflexión regular o especular

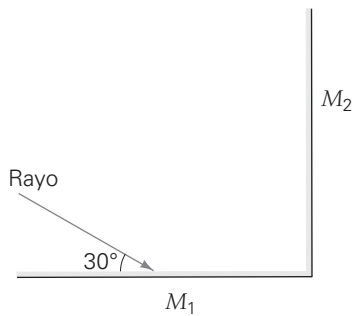


b) Fotografía de la reflexión regular o especular

▲ **FIGURA 7.5** Reflexión especular (regular) a) Cuando un haz de luz se refleja en una superficie lisa y los rayos reflejados son paralelos, se dice que la reflexión es regular o especular. b) Reflexión regular o especular en una superficie de agua tranquila produce una imagen de espejo, casi perfecta, de las montañas de sal en esta salina australiana. (Véase el pliego a color al final del libro.)



▲ **FIGURA 7.6** Reflexión difusa (irregular) Los rayos reflejados en una superficie relativamente áspera, como esta página, no son paralelos; se dice que la reflexión es irregular o difusa. (Note que se sigue aplicando la ley de la reflexión localmente en cada rayo individual.)

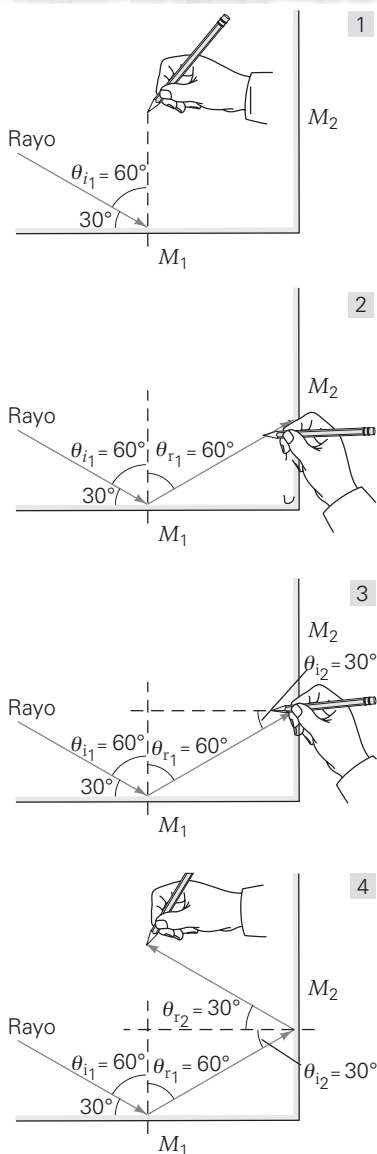


▲ FIGURA 7.7 Trazo de un rayo
Véase el ejemplo 7.1.

Nota: es extremadamente importante trazar diagramas como éstos en el estudio de la óptica geométrica.

APRENDER DIBUJANDO

Trazado de los rayos reflejados



lo 6, se dijo que la longitud de onda de la luz visible es del orden de 10^{-7} m. (Aprenderemos más acerca de la reflexión en un espejo en el ejemplo 7.1.)

La reflexión difusa nos permite ver objetos iluminados, como la Luna. Si la superficie esférica de la Luna fuera lisa, a los ojos de un observador en la Tierra sólo llegaría la luz solar procedente de una pequeña región, y sólo se vería esa pequeña área iluminada. También es posible ver el haz luminoso de un *flash* fotográfico o de una bombilla de luz gracias a la reflexión difusa en el polvo y las partículas en el aire.

Ejemplo 7.1 ■ Trazado de los rayos reflejados

Hay dos espejos, M_1 y M_2 , perpendiculares entre sí, y un rayo luminoso incide en uno de ellos, como se ve en la figura 7.7. a) Trace un diagrama de la trayectoria del rayo de luz. b) Determine la dirección del rayo después de reflejarse en M_2 .

Razonamiento. La ley de la reflexión nos permitirá determinar la dirección del rayo después de llegar a los dos espejos.

Solución.

Dado: $\theta = 30^\circ$ (ángulo en relación con M_1) **Encuentre:** a) Un diagrama con el rayo de luz
b) θ_{r_2} (ángulo de reflexión de M_2)

Se siguen los pasos 1 a 4 de la sección Aprender dibujando:

a) 1. Como los rayos incidentes y reflejados se miden desde la normal (una línea perpendicular a la superficie reflectante), se traza la normal al espejo M_1 en el punto donde el rayo incidente llega a él. Por la geometría, se observa que el ángulo de incidencia en M_1 es $\theta_{i_1} = 60^\circ$.

2. De acuerdo con la ley de reflexión, el ángulo de reflexión de M_1 también es $\theta_{r_1} = 60^\circ$. A continuación se traza este rayo reflejado, con 60° de ángulo de reflexión, y se prolonga hasta llegar a M_2 .

3. Se traza otra normal a M_2 , en el punto donde el rayo llega a él. Según la geometría (examine el triángulo del diagrama), el ángulo de incidencia en M_2 es $\theta_{i_2} = 30^\circ$. (¿Por qué?)

b) 4. El ángulo de reflexión de M_2 es $\theta_{r_2} = \theta_{i_2} = 30^\circ$. Éste es el rayo final reflejado después de llegar a los dos espejos.

¿Y si se invierten las direcciones de los rayos? En otras palabras, si primero incide un rayo en M_2 , en dirección contraria a la que se trazó en b, ¿se invertirán las direcciones de todos los rayos? Dibuje otro diagrama para demostrar que, en efecto, ése es el caso. Los rayos de luz son reversibles.

Ejercicio de refuerzo. En la parte trasera de algunos camiones de 18 ruedas se lee un letrero que dice: “Si no puede ver mi espejo, no lo puedo ver a usted”. ¿Qué significa esto? (Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.)

7.3 Refracción

OBJETIVOS: a) Explicar la refracción en términos de la ley de Snell y del índice de refracción y b) presentar ejemplos de los fenómenos de refracción.

Refracción es el cambio de dirección de una onda en la interfase donde pasa de un medio transparente a otro. En general, cuando una onda incide en la frontera interfase entre dos medios, parte de la energía de la onda se refleja y otra parte se transmite. Por ejemplo, cuando la luz que viaja por el aire incide sobre un material transparente, como el vidrio, se refleja parcialmente y se transmite también de forma parcial (figura 7.8). Pero la dirección de la luz transmitida es distinta de la de la luz incidente. Se dice entonces que la luz se ha refractado; en otras palabras, ha cambiado de dirección.

Este cambio de dirección se debe al hecho de que la luz viaja con distinta rapidez en medios diferentes. De forma intuitiva, cabe esperar que el paso de la luz sea más lento a través de un medio con más átomos por unidad de volumen y, de hecho, la rapidez de la

A FONDO 7.1 UNA NOCHE OSCURA Y LLUVIOSA

Cuando uno conduce en una noche sin lluvia, el asfalto y los letreros en las calles se distinguen con claridad. Sin embargo, en una noche oscura y lluviosa, aun cuando se lleven encendidos los faros, apenas se puede ver el camino por delante. Cuando se acerca un automóvil, la situación empeora. Se ven las luces reflejadas de los faros del coche que se acerca, en la superficie del asfalto, y parecen más brillantes de lo normal. Es común que uno quede deslumbrado, sin poder ver nada, excepto el reflejo de los faros que se acercan.

¿Cuál es la causa de estas condiciones? Cuando la superficie del asfalto está seca, la reflexión de la luz en la carretera es irregular o difusa, porque la superficie es áspera. La luz de los faros que llega al asfalto se refleja en todas direcciones, y parte de ella se regresa hacia el conductor, lo que le permite ver con claridad el asfalto (de la misma forma en que la página de este

libro se puede leer porque el papel es áspero a nivel microscópico). Sin embargo, cuando la superficie del asfalto está mojada, el agua llena las grietas y convierte al camino en una superficie reflectante relativamente lisa (figura 1a). La luz de los faros se refleja entonces hacia delante. La reflexión que normalmente es difusa ha desaparecido y, en su lugar, se genera una reflexión especular. Entonces se forman imágenes de los edificios iluminados y de las luces de las calles, volviendo borrosa la superficie del camino ante los ojos de los conductores; la reflexión especular de los faros de un vehículo que se acerca dificultará aún más que pueda distinguirse el asfalto (figura 1b).

Además de las superficies mojadas y resbalosas, la reflexión especular es una de las causas principales de accidentes en las noches con lluvia; así, en estas condiciones se aconseja tener más precaución.

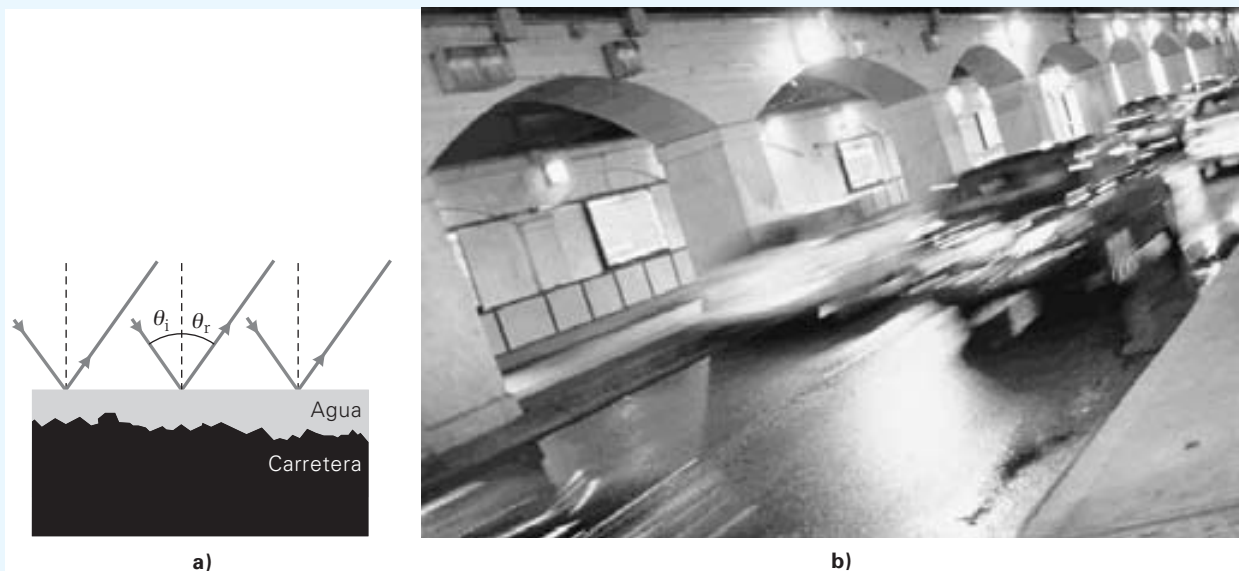


FIGURA 1 De difusa a especular a) El agua sobre la superficie del camino convierte la reflexión difusa, que había antes de la lluvia, en reflexión especular. b) Así, en lugar de ver el camino, el conductor sólo percibe las imágenes reflejadas de luces y edificios. (Véase el pliego a color al final del libro.)

luz por lo general es menor en los medios más densos. Por ejemplo, la rapidez de la luz en el agua es aproximadamente el 75% de la que tiene en el aire o en el vacío. La figura 7.9a muestra la refracción de la luz en una interfase aire-agua.

El cambio en la dirección de la propagación de la onda se describe con el **ángulo de refracción**. En la figura 7.9b, θ_1 es el ángulo de incidencia, y θ_2 es el ángulo de refracción. Utilizamos las notaciones de θ_1 y θ_2 para los ángulos de incidencia y refracción para evitar confusiones con θ_i y θ_r , que corresponden a los ángulos de incidencia y reflexión. El físico holandés Willebrord Snell (1580-1626) descubrió una relación entre los ángulos (θ) y la rapidez (v) de la luz en dos medios (figura 7.9b):

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{ley de Snell} \quad (7.2)$$

Esta ecuación se llama **ley de Snell**. Note que θ_1 y θ_2 siempre se miden con respecto a la normal.

Así, la luz se refracta cuando pasa de un medio a otro, porque su rapidez es distinta en los dos medios. La rapidez de la luz es máxima en el vacío; por eso, es convenient-

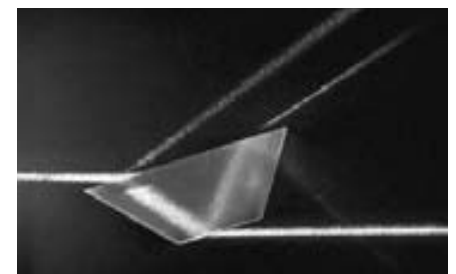
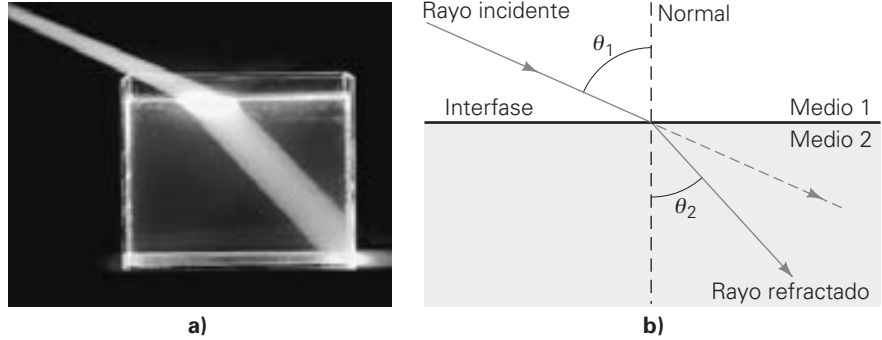


FIGURA 7.8 Reflexión y refracción

Un rayo de luz incide en un prisma trapezoidal desde la izquierda. Una parte del haz se refleja y otra se refracta. El rayo refractado se refleja y se refracta parcialmente en la superficie inferior entre vidrio y aire. (Véase el pliego a color al final del libro.)

► **FIGURA 7.9** La refracción *a)* La luz cambia de dirección al entrar en un medio diferente. (Véase el pliegue a color al final del libro.) *b)* El rayo reflejado se describe con el ángulo de refracción, θ_2 , medido a partir de la normal.



te comparar su rapidez en otros medios con este valor constante (c). Eso se hace definiendo un cociente llamado **índice de refracción (n)**:

$$n = \frac{c}{v} \left(\frac{\text{rapidez de la luz en el vacío}}{\text{rapidez de la luz en el medio}} \right) \quad (7.3)$$

Nota: cuando la luz se refracta:

- su rapidez y su longitud de onda cambian;
- su frecuencia permanece constante.

Como se trata de una razón entre valores de rapidez, el índice de refracción es una cantidad adimensional. En la tabla 7.1 se presentan los índices de refracción de varias sustancias. Hay que subrayar que esos valores son válidos para una longitud de onda específica de la luz. Se especifica la longitud de onda porque v y, en consecuencia n , difieren ligeramente para distintas longitudes de onda. (Ésta es la causa de la dispersión, que describiremos más adelante en este capítulo.) Los valores de n que presenta la tabla se usarán en ejemplos y ejercicios de este capítulo para todas las longitudes de onda de la luz en la región visible, a menos que se indique otra cosa. Observe que n siempre es mayor que 1, porque la rapidez de la luz en el vacío es mayor que la que tiene en cualquier material ($c > v$).

La frecuencia (f) de la luz no cambia cuando entra en otro medio, pero su longitud de onda en un material (λ_m) difiere de la que presenta en el vacío, como se demuestra con facilidad:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda f}{\lambda_m f} \quad (7.4)$$

Entonces, la longitud de onda de la luz en el medio es $\lambda_m = \lambda/n$. Como $n > 1$, entonces $\lambda_m < \lambda$.

TABLA 7.1

Índices de refracción
(a $\lambda = 590 \text{ nm}$)*

| Sustancia | n |
|-------------------------------------|-------------|
| Aire | 1.00029 |
| Agua | 1.33 |
| Hielo | 1.31 |
| Alcohol etílico | 1.36 |
| Cuarzo fundido | 1.46 |
| Ojo humano | 1.336–1.406 |
| Poliestireno | 1.49 |
| Aceite (valor típico) | 1.50 |
| Vidrio (según el tipo) [†] | 1.45–1.70 |
| Crown | 1.52 |
| Flint | 1.66 |
| Circón | 1.92 |
| Diamante | 2.42 |

*Un nanómetro (nm) equivale a 10^{-9} m.

[†]El vidrio crown es un vidrio de silicato de sosa y cal; el vidrio flint es de silicato de plomo y álcali. El vidrio flint es más dispersor que el vidrio crown (sección 7.5).

Ejemplo 7.2 ■ La rapidez de la luz en el agua: índice de refracción

La luz de un láser, con longitud de onda de 632.8 nm, pasa del aire al agua. ¿Cuáles son la rapidez y la longitud de onda de esta luz de láser en el agua?

Razonamiento. Si se conoce el índice de refracción (n) de un medio, la rapidez y la longitud de onda de la luz en ese medio se calculan con las ecuaciones 7.3 y 7.4.

Solución.

Dado: $n = 1.33$ (de la tabla 7.1) **Encuentre:** v y λ_m (la rapidez y la longitud de onda de la luz en el agua)

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$

$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ (rapidez de la luz en el aire)

Como $n = c/v$,

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.33} = 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Note que $1/n = v/c = 1/1.33 = 0.75$. Por consiguiente, v es el 75% de la rapidez de la luz en el vacío. Además, $n = \lambda/\lambda_m$, de manera que

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{n} = \frac{632.8 \text{ nm}}{1.33} = 475.8 \text{ nm}$$

Ejercicio de refuerzo. La rapidez de la luz con longitud de onda de 500 nm (en el aire) en un líquido determinado es $2.40 \times 10^8 \text{ m/s}$. ¿Cuál es el índice de refracción de ese líquido y la longitud de onda de la luz en él?

El índice de refracción, n , es una medida de la rapidez de la luz en un material transparente; técnicamente es una medida de la *densidad óptica* del material. Por ejemplo, la rapidez de la luz en el agua es menor que en el aire, por lo que se dice que el agua es ópticamente más densa que el aire. (En general, la densidad óptica se correlaciona con la densidad de masa. Sin embargo, en algunos casos, un material con mayor densidad óptica que otro tiene una menor densidad de masa.) Así, cuanto mayor es el índice de refracción de un material, mayor es su densidad óptica y menor es la rapidez de la luz en él.

Para fines prácticos, el índice de refracción se mide con respecto al aire, y no con respecto al vacío, ya que la rapidez de la luz en el aire es muy cercana a c , y

$$n_{\text{aire}} = \frac{c}{v_{\text{aire}}} \approx \frac{c}{c} = 1$$

(De acuerdo con la tabla 7.1, $n_{\text{aire}} = 1.00029$, por lo que supondremos que $n_{\text{aire}} = 1$.)

Una forma más práctica de la ley de Snell es la siguiente:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

o sea

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad \text{ley de Snell} \quad (7.5)$$

(otra forma)

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del primero y el segundo medios, respectivamente.

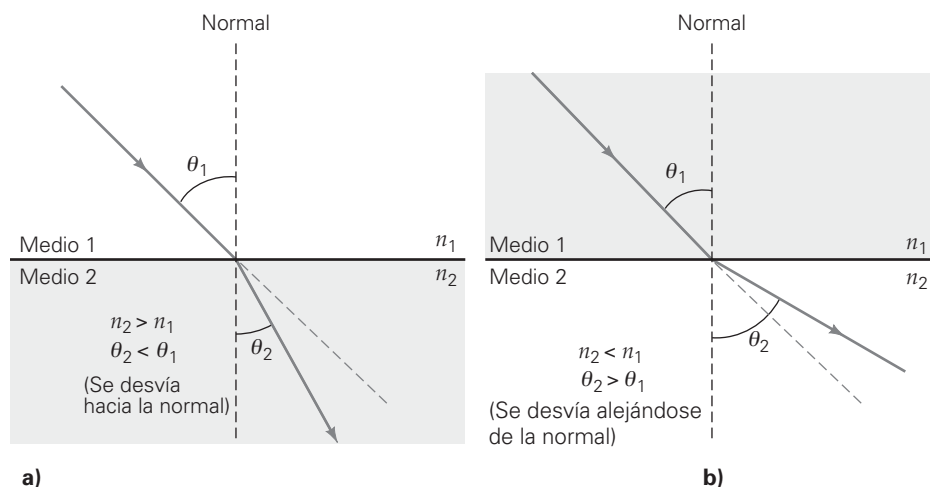
Es posible utilizar la ecuación 7.5 para medir el índice de refracción. Si el primer medio es el aire, entonces $n_1 \approx 1$ y $n_2 \approx \text{sen } \theta_1 / \text{sen } \theta_2$. Así, sólo se necesita medir los ángulos de incidencia y de refracción para determinar de forma experimental el índice de refracción de un material. Por otra parte, si se conoce el índice de refracción de un material, se aplica la ley de Snell para determinar el ángulo de refracción, para cualquier ángulo de incidencia.

También hay que hacer notar que el seno del ángulo de refracción es inversamente proporcional al índice de refracción: $\text{sen } \theta_2 \approx \text{sen } \theta_1 / n_2$. Por consiguiente, para determinado ángulo de incidencia, cuanto mayor es el índice de refracción, menor es $\text{sen } \theta_2$, y menor el ángulo de refracción θ_2 .

De forma más general, son válidas las siguientes relaciones:

- Si el segundo medio es ópticamente más denso que el primero ($n_2 > n_1$), el rayo se refracta *hacia* la normal ($\theta_2 < \theta_1$), como se ve en la [figura 7.10a](#).
- Si el segundo medio es ópticamente menos denso que el primero ($n_2 < n_1$), el rayo se refracta *alejándose* de la normal ($\theta_2 > \theta_1$), como se observa en la [figura 7.10b](#).

▼ FIGURA 7.10 Índice de refracción y desviación de los rayos *a*) Cuando el segundo medio es ópticamente más denso que el primero ($n_2 > n_1$), el rayo se refracta hacia la normal, como en el caso de la luz que pasa del aire al agua. *b*) Cuando el segundo medio es ópticamente menos denso que el primero ($n_2 < n_1$), el rayo se refracta alejándose de la normal. [Tal sería el caso del rayo del inciso *a* si se trazara en reversa, yendo del medio 2 al medio 1.]



Ejemplo integrado 7.3 ■ Ángulo de refracción: la ley de Snell

La luz en agua incide sobre una pieza de vidrio crown, a un ángulo de 37° (con respecto a la normal). a) El rayo resultante 1) se desviará hacia la normal, 2) se desviará alejándose de la normal o 3) no se desviará en lo absoluto. Elabore un diagrama para ilustrar la respuesta. b) ¿Cuál es el ángulo de refracción?

a) Razonamiento conceptual. Se dispone de la tabla 7.1 para consultar los índices de refracción del agua y del vidrio crown. Según la forma alternativa de la ley de Snell (ecuación 7.5), $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$, de manera que la respuesta correcta es la 1. Como $n_2 > n_1$, el ángulo de refracción debe ser menor que el ángulo de incidencia ($\theta_2 < \theta_1$). Ya que tanto θ_1 como θ_2 se miden con respecto a la normal, el rayo refractado se desviará hacia la normal. En este caso el diagrama de rayos es idéntico al de la figura 7.10a.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. De nuevo, lo más práctico en este caso es la forma alternativa de la ley de Snell (ecuación 7.5). (¿Por qué?) Se listan los datos:

Dado: $\theta_1 = 37^\circ$
 $n_1 = 1.33$ (agua, a partir de la tabla 7.1)
 $n_2 = 1.52$ (vidrio crown, de la tabla 7.1)

Encuentre: b) θ_2 (ángulo de refracción)

Para calcular el ángulo de refracción se emplea la ecuación 7.5,

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1 \text{ sen } \theta_1}{n_2} = \frac{(1.33)(\text{sen } 37^\circ)}{1.52} = 0.53$$

y

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.53) = 32^\circ$$

Ejercicio de refuerzo. De forma experimental, se determinó que un rayo de luz que llega desde el aire y entra en un líquido con un ángulo de incidencia de 37° tiene un ángulo de refracción de 29° . ¿Cuál es la rapidez de la luz en ese líquido?

Ejemplo 7.4 ■ Una cubierta de vidrio para mesa: más acerca de la refracción

Un rayo de luz va por el aire y llega a la cubierta de vidrio de una mesa de café, formando un ángulo de incidencia de 45° (▼ figura 7.11). El vidrio tiene un índice de refracción de 1.5. a) ¿Cuál es el ángulo de refracción de la luz que pasa al vidrio? b) Demuestre que el rayo que sale del vidrio es paralelo al rayo incidente, esto es, que $\theta_4 = \theta_1$. c) Si el vidrio tiene 2.0 cm de espesor, ¿cuál es el desplazamiento lateral entre el rayo que entra al vidrio y el que sale de él? (El desplazamiento lateral es la distancia perpendicular entre los dos rayos: d en la figura 7.10.)

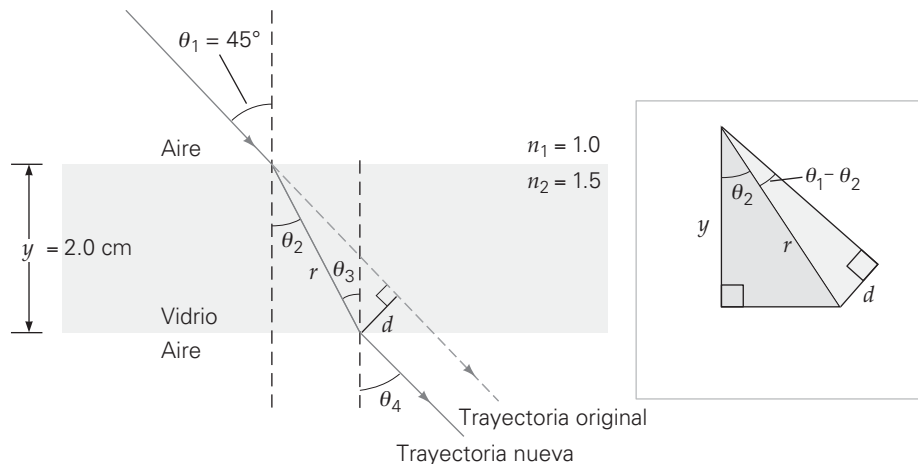
Razonamiento. Como hay dos refracciones que intervienen en este ejemplo, se aplicará la ley de Snell en *a* y de nuevo en *b*; en *c* utilizaremos algo de geometría y trigonometría.

Solución. Se listan los datos:

Dado: $\theta_1 = 45^\circ$
 $n_1 = 1.0$ (aire)
 $n_2 = 1.5$
 $y = 2.0 \text{ cm}$

Encuentre: a) θ_2 (el ángulo de refracción)
 b) Demuestre que $\theta_4 = \theta_1$
 c) d (desplazamiento lateral)

► **FIGURA 7.11** Dos refracciones
 En el vidrio, el rayo refractado se desplaza lateralmente una distancia d con respecto al rayo incidente, y el rayo que emerge es paralelo al rayo original. (Véase el ejemplo 7.4.)



a) Se usa la forma práctica de la ley de Snell, ecuación 7.5, con $n_1 = 1.0$ para el aire, y se obtiene

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1 \text{sen } \theta_1}{n_2} = \frac{(1.0) \text{sen } 45^\circ}{1.5} = \frac{0.707}{1.5} = 0.47$$

Por consiguiente,

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.47) = 28^\circ$$

Note que el rayo se refracta hacia la normal.

b) Si $\theta_1 = \theta_4$, el rayo emergente es paralelo al rayo incidente. Se aplica la ley de Snell al rayo en ambas superficies,

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_2 \text{sen } \theta_2$$

y

$$n_2 \text{sen } \theta_3 = n_1 \text{sen } \theta_4$$

En la figura se observa que $\theta_2 = \theta_3$. Por consiguiente,

$$n_1 \text{sen } \theta_1 = n_1 \text{sen } \theta_4$$

o

$$\theta_1 = \theta_4$$

Así, el rayo emergente es paralelo al rayo incidente, pero está desplazado lateral o perpendicularmente a la dirección incidente una distancia d .

c) En la figura 7.11 se observa que, para determinar d , primero se necesita calcular r a partir de la información conocida en el triángulo rectángulo más oscuro. Entonces,

$$\frac{y}{r} = \cos \theta_2 \quad \text{o} \quad r = \frac{y}{\cos \theta_2}$$

En el triángulo rectángulo claro se ve que $d = r \text{sen}(\theta_1 - \theta_2)$. Sustituyendo la r obtenida en el paso anterior se obtiene

$$d = \frac{y \text{sen}(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_2} = \frac{(2.0 \text{ cm}) \text{sen}(45^\circ - 28^\circ)}{\cos 28^\circ} = 0.66 \text{ cm}$$

Ejercicio de refuerzo. Si el vidrio de este ejemplo hubiera tenido $n = 1.6$, ¿el desplazamiento lateral hubiera sido igual, mayor o menor? Explique su respuesta de forma conceptual y después calcule el valor real para verificar su razonamiento.

Ejemplo 7.5 ■ El ojo humano: refracción y longitud de onda

Una representación simplificada del cristalino en un ojo humano lo muestra con una corteza (una capa externa) de $n_{\text{corteza}} = 1.386$, y un núcleo de $n_{\text{núcleo}} = 1.406$. (Véase la figura 10.1b.) Note que ambos índices de refracción están dentro del intervalo mencionado para el ojo humano, en la tabla 7.1. Si un rayo de luz monocromática (de una sola frecuencia o longitud de onda) de 590 nm de longitud de onda va por el aire y entra al cristalino pasando por la parte anterior del ojo, realice una comparación cualitativa y elabore una lista de la frecuencia, la rapidez y la longitud de onda de la luz en el aire, en la corteza y en el núcleo. Primero haga la comparación sin números, y luego calcule los valores reales para comprobar su razonamiento.

Razonamiento y respuesta. Primero se necesitan las magnitudes relativas de los índices de refracción, siendo $n_{\text{aire}} < n_{\text{corteza}} < n_{\text{núcleo}}$.

Como se vio antes en este apartado, la frecuencia (f) de la luz es igual en los tres medios: aire, corteza y núcleo. Así, la frecuencia se puede calcular a partir de la rapidez y la longitud de onda de la luz en cualquiera de esos materiales, pero es más fácil en el aire. (¿Por qué?) De la ecuación de onda $c = \lambda f$ (ecuación 11.17 de *Física 11*),

$$f = f_{\text{aire}} = f_{\text{corteza}} = f_{\text{núcleo}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{590 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5.08 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

La rapidez de la luz en un medio depende de su índice de refracción, porque $v = c/n$. Cuanto menor es el índice de refracción, mayor es la rapidez. En consecuencia, la rapidez de la luz es máxima en el aire ($n = 1.00$) y mínima en el núcleo ($n = 1.406$).

La rapidez de la luz en la corteza es

$$v_{\text{corteza}} = \frac{c}{n_{\text{corteza}}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.386} = 2.16 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(continúa en la siguiente página)

y la rapidez de la luz en el núcleo es

$$v_{\text{núcleo}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.406} = 2.13 \times 10^8 \text{ m/s}$$

También se sabe que la longitud de onda de la luz en un medio depende del índice de refracción de éste ($\lambda_m = \lambda/n$). Cuanto menor es el índice de refracción, mayor es la longitud de onda. Por consiguiente, la longitud de onda de la luz es máxima en el aire ($n = 1.00$ y $\lambda = 590 \text{ nm}$), y mínima en el núcleo ($n = 1.406$).

La longitud de onda en la corteza se calcula con la ecuación 7.4:

$$\lambda_{\text{corteza}} = \frac{\lambda}{n_{\text{corteza}}} = \frac{590 \text{ nm}}{1.386} = 426 \text{ nm}$$

y la longitud de onda en el núcleo es

$$\lambda_{\text{núcleo}} = \frac{590 \text{ nm}}{1.406} = 420 \text{ nm}$$

Por último, se puede formar una tabla para comparar con más facilidad los valores de frecuencia, rapidez y longitud de onda en los tres medios:

| | Índice de refracción | Frecuencia (Hz) | Rapidez (m/s) | Longitud de onda (nm) |
|----------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Aire | 1.00 | 5.08×10^{14} | 3.00×10^8 | 590 |
| Corteza | 1.386 | 5.08×10^{14} | 2.16×10^8 | 426 |
| Núcleo | 1.406 | 5.08×10^{14} | 2.13×10^8 | 420 |

Ejercicio de refuerzo. Una fuente de luz de una sola frecuencia está sumergida en agua en una pecera especial. La luz viaja por el agua, atraviesa placas de vidrio doble al lado de la pecera (cada placa de vidrio tiene n distinta) y sale al aire. En general, ¿qué sucede con *a*) la frecuencia y *b*) la longitud de onda de la luz cuando sale al aire que hay en el exterior?

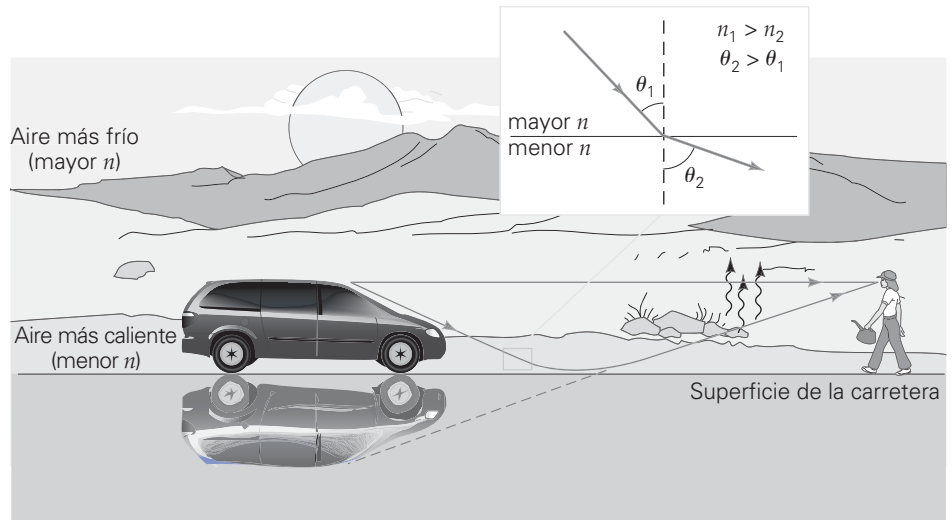
▼ **FIGURA 7.12** La refracción en acción *a*) Imagen invertida de un automóvil sobre una carretera “mojada”; es un espejismo. (Véase el pliego a color al final del libro.) *b*) El espejismo se forma cuando la luz que procede del objeto se refracta en las capas de aire a distintas temperaturas, cerca de la superficie de la carretera.



a)

La refracción es común en la vida diaria y explica muchas de los fenómenos que se observan. Veamos la refracción en acción.

Espejismo: es común presenciar este fenómeno en la carretera, en días calurosos de verano. Las capas de aire que están a distintas temperaturas provocan la refracción de la luz (la capa más cercana a la carretera está a mayor temperatura, tiene menor densidad y su índice de refracción es menor). La variación en los índices de refracción origina el punto “mojado” y una imagen invertida de un objeto, que bien podría ser un automóvil (▼figura 7.12a). Comúnmente, el término *espejismo* trae a la imaginación a una per-



b)

A FONDO 7.2 LAS LENTES “PERFECTAS” Y EL ÍNDICE NEGATIVO DE REFRACCIÓN

En 1968, los físicos predijeron la existencia de un material con un índice negativo de refracción. Esperaban que, en presencia de tales materiales con índice negativo, casi todos los fenómenos ópticos y de propagación de ondas se alterarían de forma sustancial. Para entonces, no se sabía de la existencia de alguno de estos materiales con índice negativo.

A principios del siglo XXI, se creó una nueva clase de materiales estructurados artificialmente, que presentaban índices negativos de refracción. Además, un material ferroelástico natural, que contenía itrio, vanadio y oxígeno, también demostró ser un metamaterial al presentar un índice negativo de refracción (figura 1).

La figura 2 ilustra la diferencia entre materiales con índices positivos y negativos. En la figura 2a, la luz que incide sobre un material con índice positivo se refracta al otro lado de la normal de la interfase. Sin embargo, si el material tiene un índice negativo de refracción, la misma luz incidente se refracta al mismo lado de la normal de la interfase (figura 2b). A causa de esta refracción “anormal”, placas de materiales con índice negativo y superficies planas pueden incluso enfocar la luz como se mues-

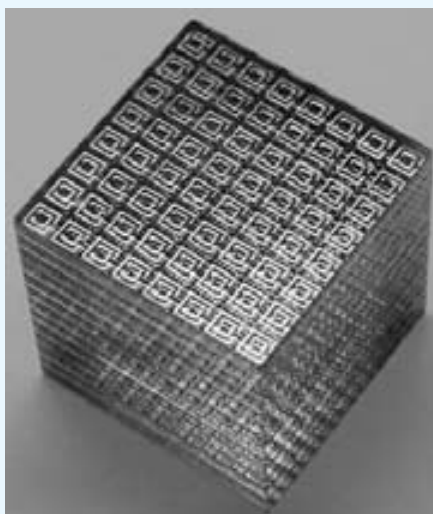


FIGURA 1 Material con un índice negativo de refracción. Este material artificial hecho a base de un enrejado de anillos y alambres tiene un índice negativo de refracción.

tra en la figura 2c, para dar por resultado una nueva clase de lentes (éstas se estudiarán en el capítulo 8). Si se coloca una fuente de luz en un lado de la placa con un índice de refracción $n = -1$, los rayos de luz se refractan de tal forma que producen un punto focal dentro del material y luego otro justo fuera de él. La “longitud focal” de una lente así dependerá tanto de la distancia al objeto como del grosor de la placa.

Las características indeseables de las lentes hechas de materiales con un índice positivo de refracción son la pérdida de energía que se debe a la reflexión, las aberraciones y la baja resolución provocada por el límite de difracción (se verá más acerca de esto en el capítulo 9). Los experimentos más recientes ofrecen fuerte evidencia de que los materiales con índice negativo tienen un futuro promisorio en el campo de la óptica, ya que las lentes de índice negativo ofrecen un nuevo grado de flexibilidad que podría llevar a fabricar lentes más compactas con menor aberración. El límite de difracción —que es la principal limitante para la resolución de imagen— podría sortearse con los materiales de índice negativo. Más aún, se ha observado la refracción negativa total —esto es, la ausencia de reflexión— en materiales con un índice negativo de refracción. Lentes así podrían ser verdaderamente las “lentes perfectas”.

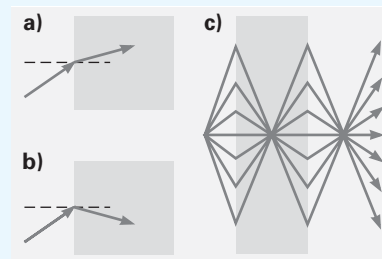
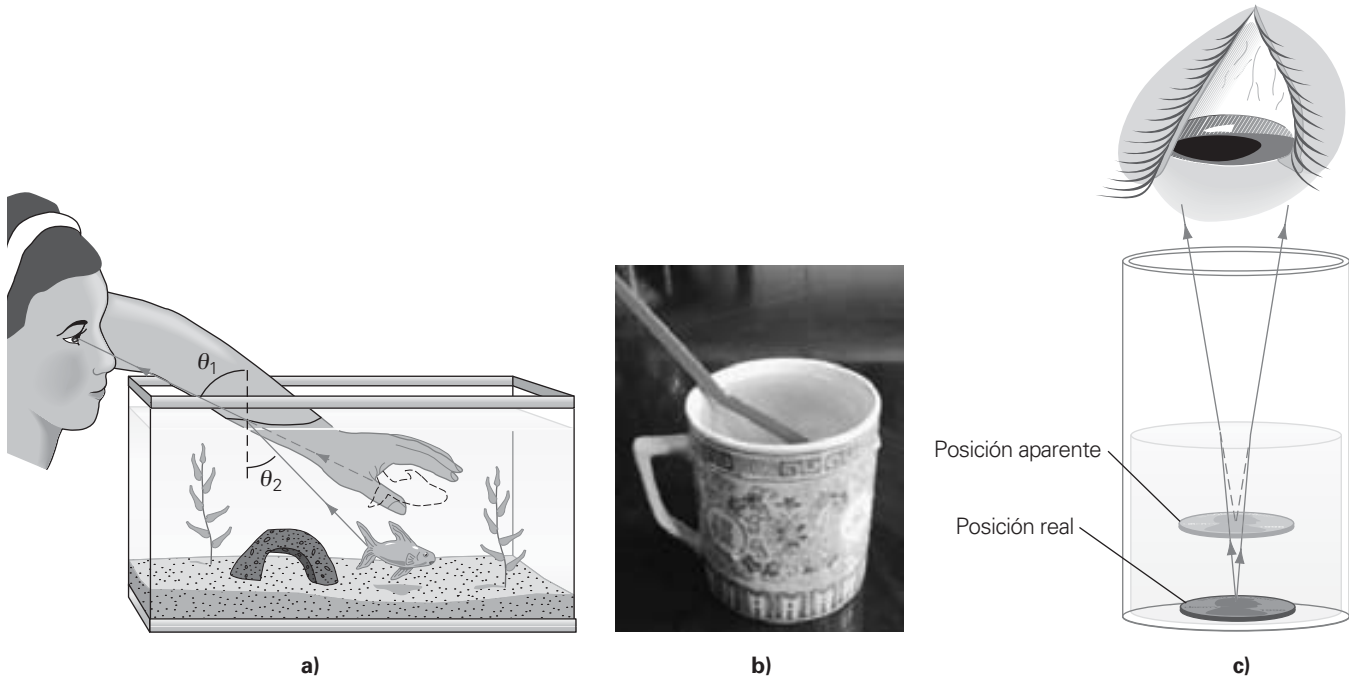


FIGURA 2 Reflexión en materiales con índice positivo en comparación con la que producen materiales con índice negativo. *a)* La luz incidente en la interfase entre el aire y un material con índice positivo se inclina hacia el otro lado de la normal, *b)* mientras que en un material con índice negativo, la luz se inclina hacia el mismo lado de la normal. *c)* Si la fuente de luz se coloca en un lado de una placa con un índice de refracción de $n = -1$, las ondas se refractan de tal forma que producen un foco dentro del material y luego otro justo fuera de éste.

sona sedienta en el desierto, que “ve” un estanque de agua que en realidad no existe. Esta ilusión óptica juega con la mente, porque la imagen se ve como si el objeto estuviera en un charco de agua y, de forma inconsciente, nuestra experiencia pasada nos induce a concluir que hay agua en la carretera.

En la figura 7.12b hay dos formas de ver el automóvil. En la primera, los rayos horizontales provienen directamente del vehículo y llegan a los ojos, de manera que vemos el automóvil sobre el piso. También, los rayos que salen del carro viajan hacia la superficie de la carretera y se refractan gradualmente en las capas de aire. Después de llegar a la superficie se refractan de nuevo y viajan hacia nuestros ojos. El aire más frío tiene mayor densidad y, por consiguiente, mayor índice de refracción. Un rayo que va hacia la superficie de la carretera se refracta de forma gradual, con mayor ángulo de refracción, hasta que llega a la superficie. Entonces se refractará de nuevo con menor ángulo de refracción y va hacia los ojos. La consecuencia es que también se ve una imagen invertida del automóvil debajo de la superficie de la carretera. En otras palabras, esta superficie actúa casi como un espejo. El “estanque de agua” en realidad es la luz del cielo que se refracta, es decir, se trata de una imagen del cielo. Esta serie de capas de aire a



▲ **FIGURA 7.13 Efectos de la refracción** *a)* La luz se refracta, y como tendemos a imaginar que la luz viaja en línea recta, el pez en realidad está más abajo de lo que creemos. *b)* La pajilla parece doblada en la frontera entre el aire y el agua. Si la taza fuera transparente se vería otro tipo de refracción. (Véase el ejercicio 21.) *c)* A causa de la refracción, la moneda parece estar más cerca de lo que en realidad está.

diferentes temperaturas, y con distintos índices de refracción, hace que “veamos” el aire caliente que se eleva, como resultado de la refracción que cambia continuamente.

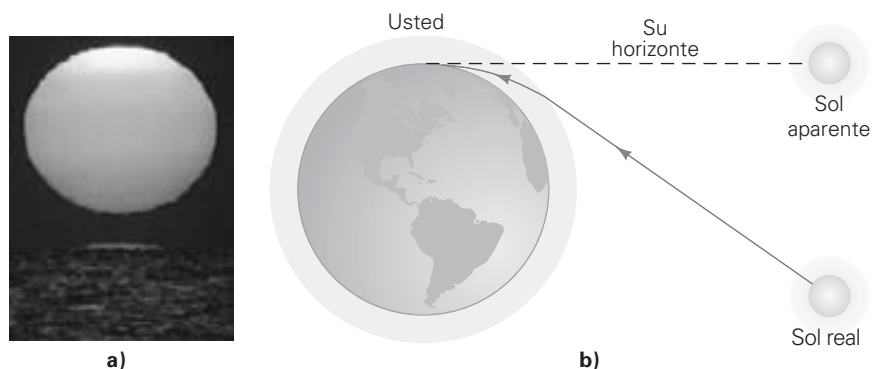
El fenómeno contrario a esto es el espejismo en el mar. El aire que se encuentra por encima del mar está más caliente que el que hay abajo. Esto provoca que la luz se refracte de manera contraria que en la figura 7.12b, haciendo que los objetos se vean en el aire por encima de la superficie marina.

No está donde debería: seguramente usted habrá experimentado un efecto de refracción al tratar de alcanzar un objeto bajo el agua, como el pez de la ▲figura 7.13a. Estamos acostumbrados a que la luz se propague en línea recta, de los objetos hacia los ojos, pero la que llega a nosotros procedente de un objeto experimenta un cambio de dirección en la interfase aire-agua. (Observe en la figura que el rayo se refracta alejándose de la normal.) En consecuencia, el objeto parece estar más cerca de la superficie de lo que en realidad está, y por eso se falla al tratar de alcanzarlo. Por la misma razón, una pajilla dentro de una taza parece doblada (figura 7.13b), una moneda en un vaso de agua parecerá más cercana de lo que está en realidad (figura 7.13c), y las piernas de una persona que está de pie en el agua parecen más cortas que su longitud real. Es factible calcular la relación entre la profundidad real y la aparente. (Véase el ejercicio 37.)

Efectos atmosféricos: a veces, el Sol sobre el horizonte parece aplanado, con su dimensión horizontal mayor que su dimensión vertical (▼ figura 7.14a). Este efecto es el resultado de las variaciones de temperatura y densidad en el aire; este último se vuelve más denso a lo largo del horizonte. Estas variaciones se presentan sobre todo en la dirección vertical, por lo que la luz de la parte superior y la de la parte inferior del Sol se refractan de forma distinta, conforme los dos grupos de rayos pasan a través de densidades atmosféricas diferentes, con distintos índices de refracción.

La refracción atmosférica alarga el día, por así decirlo, al permitirnos ver el Sol (o la Luna en el caso de la noche) justo antes de que en realidad suba sobre el horizonte y

► **FIGURA 7.14 Efectos atmosféricos** *a)* El Sol aparece con una forma un tanto aplanada cerca del horizonte, a causa de la refracción atmosférica. *b)* Antes de salir y después de ocultarse, es posible ver el Sol por breve tiempo, gracias una vez más a la refracción atmosférica.



justo después de que en realidad se oculte bajo el horizonte (hasta con 20 minutos de diferencia en ambos casos). El aire más denso cerca de la Tierra refracta la luz que está sobre el horizonte hacia nosotros (figura 7.14b).

El centelleo de las estrellas se debe a la turbulencia atmosférica, que distorsiona la luz proveniente de ellas. Las turbulencias refractan la luz en direcciones aleatorias y hacen que las estrellas aparenten “centellear”. Las estrellas en el horizonte parecen titilar más que las que están directamente sobre nuestra cabeza, porque la luz tiene que pasar a través de un mayor espacio atmosférico de la Tierra. Sin embargo, los planetas no “centellean” tanto. Esto es porque las estrellas están mucho más lejos que los planetas, de manera que aparecen como fuentes puntuales. Fuera de la atmósfera terrestre, las estrellas no titilan.

7.4 Reflexión interna total y fibras ópticas

OBJETIVOS: a) Describir la refracción interna total y b) comprender las aplicaciones de las fibras ópticas.

Un fenómeno interesante se presenta cuando la luz pasa de un medio ópticamente más denso a otro menos denso, como cuando la luz pasa desde el agua hacia el aire. Como sabemos, en ese caso un rayo se refractará alejándose de la normal. (El ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia.) Además, la ley de Snell establece que cuanto mayor sea el ángulo de incidencia, mayor será el ángulo de refracción. Esto es, conforme aumenta el ángulo de incidencia, el rayo refractado se aparta cada vez más de la normal.

Sin embargo, existe un límite. Para cierto ángulo de incidencia, llamado **ángulo crítico** (θ_c), el ángulo de refracción es 90° y el rayo refractado se dirige a lo largo de la interfase entre los medios. Pero, ¿qué pasa si el ángulo de incidencia es todavía mayor? Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico ($\theta_1 > \theta_c$), la luz ya no se refracta, sino se refleja internamente (▼ figura 7.15). A esta condición se le llama **reflexión interna total**. Este proceso de reflexión tiene una eficiencia muy cercana al 100%. (Si sigue habiendo cierta absorción de la luz en los materiales.) Gracias a la reflexión interna total, es posible usar prismas como espejos (► figura 7.16). En resumen, donde $n_1 > n_2$, la reflexión y la refracción suceden en todos los ángulos en que $\theta_1 \leq \theta_c$, pero el rayo refractado o transmitido desaparece cuando $\theta_1 > \theta_c$.

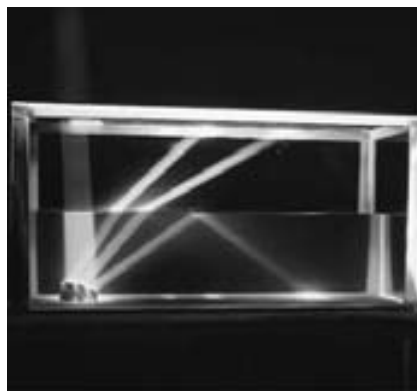
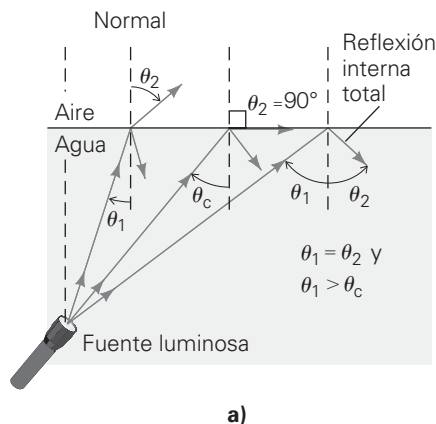
A partir de la ley de Snell se puede deducir una ecuación para el ángulo crítico. Si $\theta_1 = \theta_c$ en el medio ópticamente más denso, $\theta_2 = 90^\circ$, y, en consecuencia,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{o} \quad n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

Como $\sin 90^\circ = 1$,

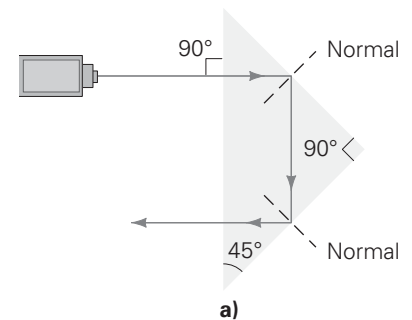
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{donde } n_1 > n_2 \quad (7.6)$$

▼ **FIGURA 7.15 Reflexión interna** a) Cuando la luz entra a un medio ópticamente menos denso, se refracta alejándose de la normal. En cierto ángulo crítico (θ_c), la luz se refracta siguiendo la interfase (la frontera común) de los dos medios. En un ángulo mayor que el crítico ($\theta_1 > \theta_c$), se presenta la reflexión interna total. b) ¿Podría estimar el ángulo crítico en la fotografía?

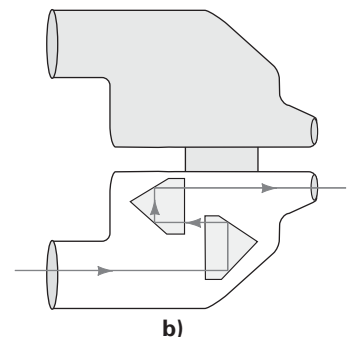


a)

b)



a)



b)

▲ **FIGURA 7.16 Reflexión interna en un prisma** a) Como el ángulo crítico del vidrio es menor de 45° , es factible utilizar prismas con ángulos de 45° y 90° para reflejar la luz 180° . b) La reflexión interna de la luz en los prismas de los binoculares hace que este instrumento sea mucho más corto que un telescopio porque los prismas se encargan de “doblar” los rayos.

Si el segundo medio es aire, $n_2 \approx 1$, y el ángulo crítico en la frontera entre un medio y el aire se calcula con $\text{sen } \theta_c = 1/n$, donde n es el índice de refracción del medio. Éste es otro método que se tiene disponible para medir el índice de refracción en los laboratorios.

Ejemplo 7.6 ■ Una vista desde la alberca: el ángulo crítico

a) ¿Cuál es el ángulo crítico cuando la luz que va por el agua incide en la frontera interfase agua-aire? b) Si un clavadista sumergido en una alberca viera hacia arriba a la superficie del agua en un ángulo $\theta < \theta_c$, ¿qué vería? (Ignore los efectos térmicos o de movimiento.)

Razonamiento. a) El ángulo crítico se obtiene con la ecuación 7.6. b) Como se observa en la figura 7.15a, θ_c forma un cono de visión, cuando se ve desde abajo del agua.

Solución.

Dado: $n_1 = 1.33$ (para el agua, tabla 7.1) $n_2 \approx 1$ (¿por qué?) **Encuentre:** a) θ_c (el ángulo crítico) b) vista para $\theta < \theta_c$

a) El ángulo crítico es

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{1.33}\right) = 48.8^\circ$$

b) A partir de la figura 7.15a se trazan los rayos al revés, con la luz que llega de todos los ángulos fuera de la alberca. La luz que proviene del paisaje de 180° sobre el agua sólo se puede ver por un cono con medio ángulo de vértice de 48.8° . Como resultado, los objetos sobre la superficie también aparecen distorsionados. Una panorámica desde abajo del agua se ve en la figura 7.17. Ahora, ¿podría explicar por qué las aves zancudas, como las garzas, mantienen su cuerpo agachado cuando tratan de atrapar un pez?

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué vería el clavadista hacia arriba, hacia la superficie del agua, a un ángulo $\theta > \theta_c$?



▲ **FIGURA 7.17** Vista panorámica distorsionada Vista subacuática de la superficie de una alberca en Hawai. (Véase el ejemplo 7.6 y el pliego a color al final del libro.)

Las reflexiones internas aumentan la brillantez de los diamantes tallados. (La brillantez o brillo es una medida de la cantidad de luz que regresa al observador. La brillantez se reduce si la luz sale por la parte trasera de un diamante, es decir, si la reflexión $n\theta$ es total.) El ángulo crítico para una superficie de diamante-aire es

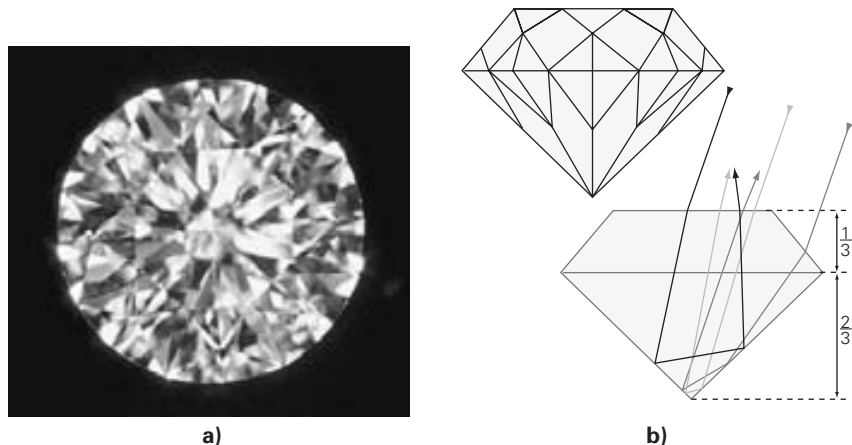
$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) = \text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{2.42}\right) = 24.4^\circ$$

El llamado diamante de corte brillante (o simplemente brillante) tiene muchas facetas o caras (58 en total: 33 en la cara superior y 25 en la inferior). La luz que llega a las facetas inferiores desde las superiores, formando un ángulo mayor que el crítico, se refleja internamente en el diamante. A continuación la luz sale por las facetas superiores, dando lugar al brillo del diamante (▼figura 7.18).

Fibras ópticas

Cuando se ilumina una fuente desde abajo, la luz se transmite a lo largo de sus corrientes curvas. El científico inglés John Tyndall (1820-1893) demostró este fenómeno por

► **FIGURA 7.18** Brillantez del diamante a) La reflexión interna causa el brillo de un diamante. (Véase el pliego a color al final del libro.) b) El “corte” (o las proporciones de altura de las facetas) es esencial. Si una piedra es demasiado plana o demasiado aguda, se perderá la luz, es decir, esta última se refractará y saldrá por las facetas inferiores.



primera vez en 1870, y demostró que la luz era “conducida” a lo largo de la trayectoria curva de una corriente de agua que sale de un agujero en un lado de un recipiente. Este fenómeno se observa porque la luz experimenta reflexión interna total a lo largo del chorro.

La reflexión total interna es la base de las **fibras ópticas**, una moderna tecnología fascinante que se centra en el uso de fibras transparentes para la transmisión de la luz. Las múltiples reflexiones internas totales hacen posible “entubar” la luz por una varilla transparente (igual que corrientes de agua) aun cuando la varilla sea curva (►figura 7.19). Observe en la figura que cuanto menor es el diámetro del tubo de luz, más reflexiones internas tiene. En una fibra pequeña puede haber hasta varios cientos de reflexiones internas totales por centímetro.

La reflexión interna total es un proceso excepcionalmente eficiente. Las fibras ópticas sirven para transmitir luz a distancias muy grandes, con pérdidas aproximadas de sólo 25% por kilómetro. Esas pérdidas se deben principalmente a impurezas en la fibra, que dispersan la luz. Los materiales transparentes tienen diversos grados de transmisión. Las fibras se fabrican con plásticos y vidrios especiales para alcanzar la eficiencia máxima de transmisión. Esta última se obtiene con radiación infrarroja, porque causa menos dispersión, como se explicará en la sección 9.5.

La mayor eficiencia de las reflexiones internas múltiples en comparación con las reflexiones múltiples en espejos se demuestra con un buen espejo plano, cuya reflectividad alcanza el 95%, en el mejor de los casos. Después de cada reflexión, la intensidad del haz es el 95% de la del rayo incidente que procede de la reflexión anterior ($I_1 = 0.95I_0$; $I_2 = 0.95 I_1 = 0.95^2 I_0$; ...). Por consiguiente, la intensidad I del rayo reflejado después de n reflexiones es

$$I = 0.95^n I_0$$

donde I_0 es la intensidad inicial del haz antes de la primera reflexión. Así, después de 14 reflexiones,

$$I = 0.95^{14} I_0 = 0.49 I_0$$

En otras palabras, después de 14 reflexiones, la intensidad se reduce al 49%, esto es, poco menos de la mitad. Para 100 reflexiones, $I = 0.006 I_0$, y la intensidad sólo es el 0.6% de la intensidad inicial! Comparemos esto con un 75% de la intensidad inicial, en fibras ópticas, en un kilómetro de longitud, con *miles* de reflexiones, para apreciar la ventaja de la reflexión interna total.

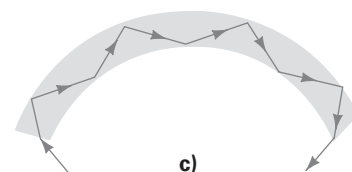
Las fibras cuyos diámetros aproximados son de unos $10 \mu\text{m}$ (10^{-5} m) se agrupan en haces flexibles de 4 a 10 mm de diámetro, y de varios metros de longitud, dependiendo de la aplicación (▼figura 7.20). Un haz de fibras con 1 cm^2 de área transversal pue-



a)



b)

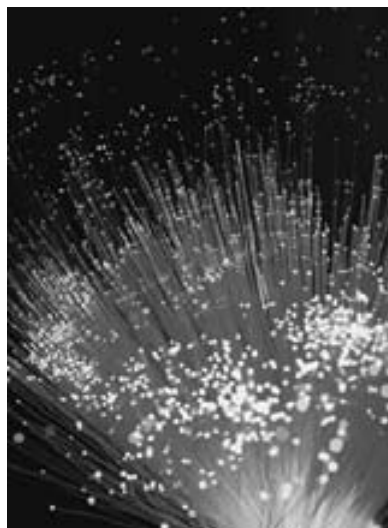


c)



d)

▲ **FIGURA 7.19 Tubos de luz** a) Reflexión interna total en una fibra óptica. (Véase el pliego a color al final del libro.) b) Cuando incide la luz en el extremo de un cilindro de material transparente de tal forma que el ángulo interno de incidencia es mayor que el ángulo crítico del material, la luz experimenta la reflexión interna total a todo lo largo del tubo de luz. c) La luz también se transmite a lo largo de tubos de luz curvos, por reflexión interna total. d) Al disminuir el diámetro de la varilla o fibra, aumenta la cantidad de reflexiones por unidad de longitud.



a)



b)

◀ **FIGURA 7.20 Haz de fibras ópticas** a) Cientos o hasta miles de fibras extremadamente delgadas se agrupan para formar un cable de fibra óptica, que aquí se ve con el color azul de un láser. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 7.3 APLICACIONES MÉDICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

Antes de que existieran las fibras ópticas, se utilizaban los *endoscopios* para ver el interior del cuerpo humano. Esos instrumentos estaban formados por sistemas de lentes acomodadas en tubos largos y estrechos. Algunos contenían una docena o más de lentes, y formaban imágenes relativamente deficientes. Además, como las lentes debían alinearse de ciertas formas, los tubos debían tener tramos rígidos, lo cual limitaba la maniobrabilidad del endoscopio. Uno de esos endoscopios podía insertarse por la garganta del paciente hasta el estómago, para observar el interior de este órgano. Sin embargo, quedaban puntos ciegos, a causa de la curvatura del estómago y de la inflexibilidad del instrumento.

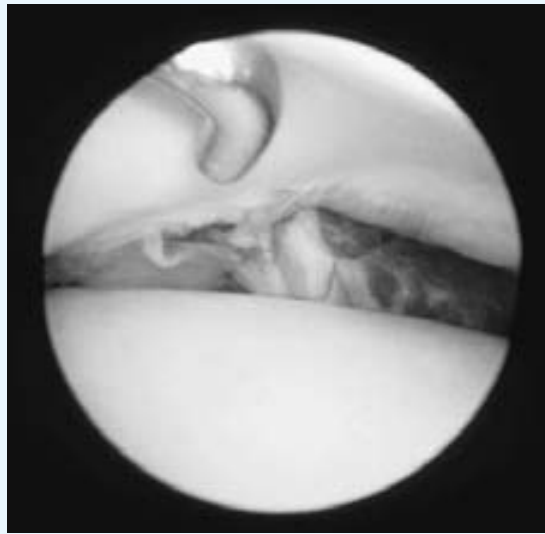
Con los haces de fibras ópticas se han eliminado esos problemas. Para enfocar la luz, se colocan lentes en el extremo del haz de fibras, y para cambiar la dirección de la luz y hacer que regrese, se utiliza un prisma. La luz incidente se transmite por una capa externa del haz y la imagen regresa por el núcleo central de fibras. Con uniones mecánicas se permite la maniobrabi-

lidad. El extremo de algunos endoscopios de fibra óptica tiene dispositivos para obtener muestras de los tejidos examinados y así hacer una biopsia (examen para diagnóstico), o incluso para realizar procedimientos quirúrgicos. Por ejemplo, la cirugía artroscópica se practica en articulaciones lesionadas (figura 1). El *artroscopio* que se usa actualmente de forma rutinaria para inspeccionar y también para reparar articulaciones dañadas no es más que un endoscopio de fibra óptica equipado con los instrumentos quirúrgicos adecuados.

Un *cardioscopio* de fibra óptica, que se utiliza para la observación directa de las válvulas del corazón, es un haz de fibras de unos 4 mm de diámetro y 30 cm de longitud. El cardioscopio pasa con facilidad hasta el corazón, por la vena yugular del cuello, cuyo diámetro es de 15 mm. Con el fin de desplazar la sangre y de tener un campo de visión claro para observar y fotografiar, se infla un globo transparente en la punta del cardioscopio con solución salina (es decir, sal diluida en agua).



a)

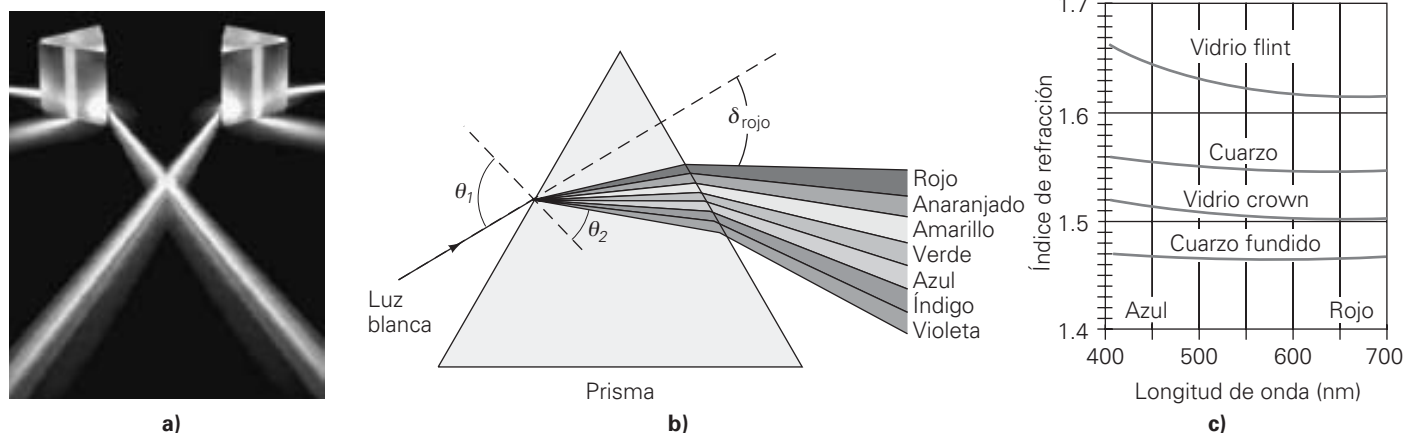


b)

FIGURA 1 Artroscopia a) Los cirujanos utilizan un artroscopio de fibra óptica para practicar una cirugía. b) Vista artroscópica de los meniscos de una rodilla.

de contener hasta 50 000 fibras individuales. (Se necesita un recubrimiento en cada fibra para evitar que se toquen).

Hay muchas aplicaciones importantes e interesantes de las fibras ópticas, que van desde las comunicaciones y conexiones de computadoras en red hasta la medicina. (Véase la sección A fondo, en esta página, sobre las aplicaciones médicas de las fibras ópticas.) Las señales luminosas, que proceden de señales eléctricas, se transmiten a través de líneas telefónicas ópticas y redes de computadora. En el otro extremo se vuelven a convertir en señales eléctricas. Las fibras ópticas tienen menos pérdidas de energía que los conductores eléctricos, en especial a frecuencias altas, y conducen mucho mayor cantidad de datos. Además, las fibras ópticas son más ligeras que los conductores metálicos, tienen mayor flexibilidad y no son afectadas por perturbaciones electromagnéticas (campos eléctricos y magnéticos), ya que están hechas de materiales aislantes eléctricos.



▲ **FIGURA 7.21** La dispersión *a*) La luz blanca se dispersa en los prismas de vidrio y forma un espectro de colores. *b*) En un medio dispersor, el índice de refracción varía un poco en función de la longitud de onda. La luz roja, cuya longitud de onda es la mayor, tiene el menor índice de refracción, y por eso se refracta menos. El ángulo entre el haz incidente y el haz emergente es el ángulo de desviación (δ) del rayo. (Aquí se exageran los ángulos, para obtener mayor claridad.) *c*) Variación del índice de refracción con la longitud de onda, para algunos de los medios transparentes más comunes. (Véase el pliego a color al final del libro.)

7.5 Dispersión

OBJETIVO: Explicar la dispersión y algunos de sus efectos.

La luz de una sola frecuencia y, por consiguiente, de una sola longitud de onda, se llama *luz monocromática* (del griego *mono*, “uno” y *chroma*, “color”). La luz visible que contiene todas las frecuencias que la componen, o colores, más o menos con las mismas intensidades (por ejemplo, la luz solar) se llama *luz blanca*. Cuando un rayo de luz blanca atraviesa un prisma de vidrio, como se ve en la ▲ figura 7.21a, se extiende, o dispersa, y forma un espectro de colores. Este fenómeno condujo a Newton a creer que la luz solar es una mezcla de colores. Cuando el haz entra al prisma, los colores que la forman —correspondientes a distintas longitudes de onda— se refractan en ángulos ligeramente diferentes y se reparten formando un espectro (figura 7.21b).

La salida de un espectro indica que el índice de refracción del vidrio es ligeramente diferente para las diversas longitudes de onda, y eso es válido para muchos medios transparentes (figura 7.21c). La razón tiene que ver con el hecho de que, en un medio dispersivo, la rapidez de la luz es ligeramente diferente para las distintas longitudes de onda. Como el índice de refracción n de un medio es una función de la rapidez de la luz en él ($n = c/v$), su valor será diferente para diversas longitudes de onda. De acuerdo con la ley de Snell, la luz de diferentes longitudes de onda se refracta en ángulos distintos.

Podemos resumir la explicación anterior diciendo que, en un material transparente con distintos índices de refracción para diversas longitudes de onda de la luz, la refracción causa una separación del haz lumínico de acuerdo con las longitudes de onda, y se dice que el material es *dispersor* o que presenta **dispersión**. La dispersión varía en los medios distintos (figura 7.21c). Además, como la diferencia en los índices de refracción para diversas longitudes de onda es mínima, es conveniente utilizar un valor representativo a cierta longitud de onda específica para fines generales (véase la tabla 7.1).

Un buen ejemplo de un material dispersor es el diamante, que tiene una capacidad de dispersión aproximadamente cinco veces mayor que la del vidrio. Además de producir brillo como resultado de las reflexiones internas en muchas facetas, un diamante cortado hace un despliegue de colores, o “fuego”, que no es más que la dispersión de la luz refractada.

La dispersión es una causa de la aberración cromática de las lentes, que se describirá en detalle en el capítulo 8. Los sistemas ópticos de las cámaras están formados, con frecuencia, por varias lentes para reducir este problema al mínimo (véase la sección 8.4).

Otro ejemplo representativo de la dispersión es la formación del arco iris, que se describe en la sección A fondo de la p. 204.

Nota: una forma fácil de recordar el orden de los colores del espectro visible (de mayor a menor longitud de onda) es con la palabra RAAVAIV, acrónimo de rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta.

A FONDO 7.4 EL ARCO IRIS

Todos alguna vez nos hemos sentido fascinados con el bello conjunto de colores del arco iris. Con los principios de la óptica que hemos aprendido en este capítulo, estamos en condiciones de comprender la formación de esta espectacular demostración de la naturaleza.

Un arco iris se forma por refracción, dispersión y reflexión interna de la luz en el interior de gotas de agua. Cuando la luz solar llega a millones de gotitas de agua que están en el aire durante y después de una lluvia, se ve un arco multicolor, cuyos colores van del violeta, en la región inferior del espectro (en orden de longitudes de onda) hasta el rojo, en la superior. A veces se ve más de un arco iris: el principal o primario va acompañado de uno más débil y más alto, que se llama secundario (figura 1), o hasta por un tercero. Estos arco iris de orden superior se deben a más de una reflexión interna total en las gotas de agua.



FIGURA 1 Arco iris Los colores del arco iris primario van verticalmente del rojo (exterior) al azul (interior). (Véase el pliego a color al final del libro.)

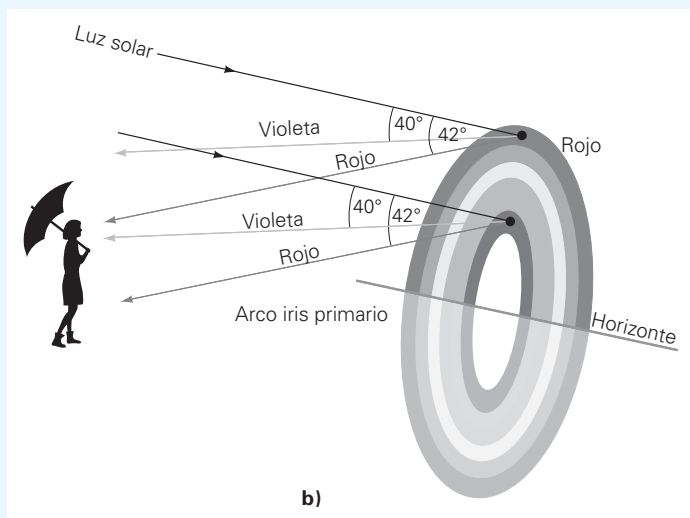
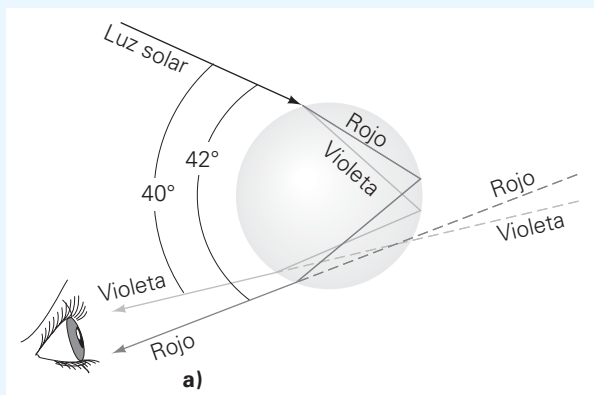


FIGURA 2 El arco iris Los arco iris se forman por refracción, dispersión y reflexión interna de la luz solar en las gotas de agua. **a)** La luz de distintos colores sale de la gota de agua en distintas direcciones. **b)** Un observador ve la luz roja en el exterior del arco y la violeta en el interior. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Ejemplo 7.7 ■ Formación de un espectro: dispersión

El índice de refracción de determinado material transparente es 1.4503 para el extremo rojo ($\lambda_r = 700 \text{ nm}$) del espectro visible, y 1.4698 para el extremo azul ($\lambda_b = 400 \text{ nm}$). Sobre un prisma de este material incide luz blanca, como en la figura 7.21b, a un ángulo θ_i de 45° . a) Dentro del prisma, el ángulo de refracción de la luz roja es 1) mayor que, 2) menor que o 3) igual que el ángulo de refracción de la luz azul. Explique por qué. b) ¿Cuál es la separación angular del espectro visible dentro del prisma?

a) Razonamiento conceptual. El ángulo de refracción se obtiene con la ley de Snell, $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$. Como la luz roja tiene un menor índice de refracción que la luz azul, el ángulo de refracción de la luz roja es mayor que el de la azul para el mismo ángulo de incidencia. En ocasiones, también se dice que la luz roja “se refracta menos” que la azul porque el mayor ángulo de refracción de la primera significa que se aproxima más a la dirección del haz incidente original. Así que la respuesta correcta es la a.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez más se utiliza la ley de Snell para calcular el ángulo de refracción para los extremos rojo y azul del espectro visible. La separación angular de los dos colores dentro del prisma es la diferencia entre esos ángulos de refracción.

Dado: (rojo) $n_r = 1.4503$, para $\lambda_r = 700 \text{ nm}$ **Encuentre:** $\Delta\theta_2$ (separación angular)
 (azul) $n_b = 1.4698$, para $\lambda_b = 400 \text{ nm}$
 $\theta_1 = 45^\circ$

Al aplicar la ecuación 7.5 con $n_1 = 1.00$ (aire), se obtiene

$$\text{sen } \theta_{2r} = \frac{\text{sen } \theta_1}{n_{2r}} = \frac{\text{sen } 45^\circ}{1.4503} = 0.48756 \quad \text{y} \quad \theta_{2r} = 29.180^\circ$$

Asimismo,

$$\text{sen } \theta_{2b} = \frac{\text{sen } \theta_1}{n_{2b}} = \frac{\text{sen } 45^\circ}{1.4698} = 0.48109 \quad \text{y} \quad \theta_{2b} = 28.757^\circ$$

Entonces,

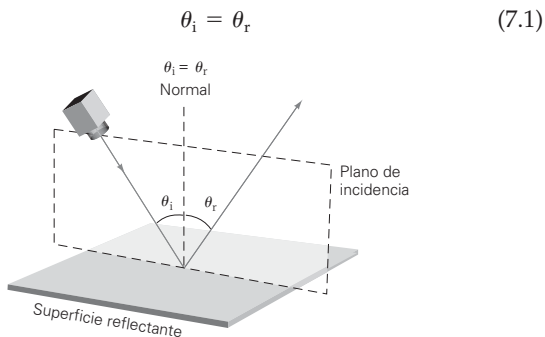
$$\Delta\theta_2 = \theta_{2r} - \theta_{2b} = 29.180^\circ - 28.757^\circ = 0.423^\circ$$

No es mucha la desviación, pero conforme la luz sigue su trayecto hacia el otro lado del prisma, se refracta y se dispersa de nuevo por la segunda frontera, por lo que los colores se dispersan aún más. Cuando la luz sale del prisma, la dispersión es evidente (figura 7.21a).

Ejercicio de refuerzo. Si en el prisma de este ejemplo, la luz verde tiene una separación angular de 0.156° con respecto a la luz roja, ¿cuál es el índice de refracción de la luz verde en el material? ¿La luz verde se refractará más o menos que la roja? Explique por qué.

Repaso del capítulo

- **Ley de la reflexión:** el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión (medidos desde la normal a la superficie reflectante):
- La refracción, para un rayo que pasa de un medio a otro, se define con la **ley de Snell**. Si el segundo medio es ópticamente más denso, el rayo se refracta acercándose a la normal; si el medio de refracción es menos denso, el rayo se refracta alejándose de la normal. La ley de Snell es

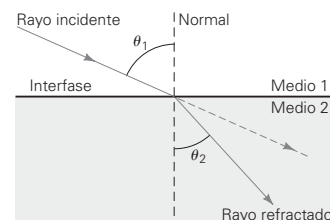


- El **índice de refracción (n)** de cualquier medio es la razón entre la rapidez de la luz en el vacío y su rapidez en ese medio:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda_m} \quad (7.3, 7.4)$$

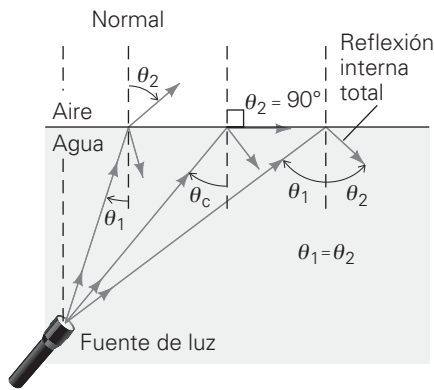
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.2)$$

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (7.5)$$

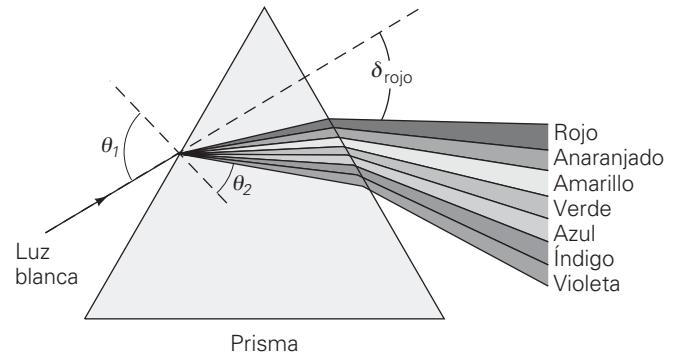


- La **reflexión total interna** sucede cuando el segundo medio es menos denso que el primero, y el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad (7.6)$$



- La **dispersión** de la luz se presenta en algunos medios porque las diversas longitudes de onda tienen índices de refracción ligeramente distintos y, por consiguiente, diferente rapidez.



Ejercicios*

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios “apareados”. Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

7.1 Frentes de onda y rayos y 7.2 Reflexión

1. **OM** Un rayo *a*) es perpendicular a la dirección del flujo de energía, *b*) siempre es paralelo a otros rayos, *c*) es perpendicular a una serie de frentes de onda o *d*) ilustra la naturaleza ondulatoria de la luz.
2. **OM** El ángulo de incidencia es el ángulo entre *a*) el rayo incidente y la superficie reflectante, *b*) el rayo incidente y la normal a la superficie, *c*) el rayo incidente y el rayo reflejado, *d*) el rayo reflejado y la normal a la superficie.
3. **OM** Tanto para la reflexión especular (regular) como para la difusa (irregular), *a*) el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, *b*) los rayos incidente y reflejado están uno a cada lado de la normal, *c*) el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal local están en el mismo plano o *d*) todo lo anterior.
4. **PC** ¿En qué circunstancias el ángulo de reflexión será menor que el ángulo de incidencia?
5. **PC** El libro que usted está leyendo no tiene fuente luminosa, por lo que debe estar reflejando la luz de otras fuentes. ¿Qué tipo de reflexión es ésta?

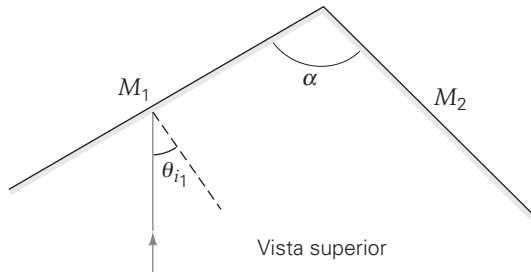
6. **PC** Al ver al Sol sobre un lago o sobre el océano, con frecuencia se observa una larga banda luminosa (▼ figura 7.22). ¿Qué provoca este efecto, que a veces se llama “camino radiante”?

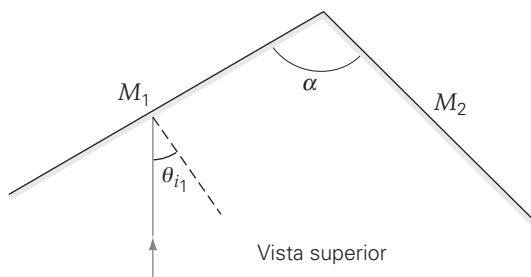


◀ **FIGURA 7.22**
Una senda luminosa
Véase el ejercicio 6.

7. ● El ángulo de incidencia de un rayo de luz en una superficie de espejo es de 35°. ¿Cuál es el ángulo que forman los rayos incidente y reflejado?
8. ● Un haz luminoso incide en un espejo plano, formando un ángulo de 32° con respecto a la normal. ¿Cuál es el ángulo entre los rayos reflejados y la superficie del espejo?
9. **EI** ● Un haz de luz incide en un espejo plano, formando un ángulo α con la superficie del espejo. *a*) El ángulo que forman el rayo reflejado y la normal será 1) α , 2) $90^\circ - \alpha$ o 3) 2α . *b*) Si $\alpha = 43^\circ$, ¿cuál es el ángulo entre el rayo reflejado y la normal?

*Suponga que los ángulos son exactos.

10. **EI ●●** Dos espejos planos verticales se tocan a lo largo de una orilla, donde sus planos forman un ángulo a . Se dirige un haz de luz a uno de ellos, con un ángulo de incidencia $\beta < \alpha$, y se refleja en el segundo espejo. *a)* El ángulo de reflexión del haz que sale del segundo espejo será 1) α , 2) β , 3) $\alpha + \beta$ o 4) $\alpha - \beta$? *b)* Si $\alpha = 60^\circ$ y $\beta = 40^\circ$, ¿cuál será el ángulo de reflexión del haz que sale del segundo espejo?
11. **EI ●●** Dos espejos planos idénticos, de ancho w , se colocan a una distancia de separación d , con sus superficies especulares paralelas y viéndose entre sí. *a)* Un rayo de luz incide en un extremo del espejo, de tal forma que la luz choca justo con el extremo alejado del segundo espejo, después de reflejarse. El ángulo de incidencia será 1) $\sin^{-1}(w/d)$, 2) $\cos^{-1}(w/d)$ o 3) $\tan^{-1}(w/d)$? *b)* Si $d = 50$ cm y $w = 25$ cm, ¿cuál es el ángulo de incidencia?
12. **●●** Dos personas están de pie a 3 m de un espejo plano grande, y separadas entre sí por una distancia de 5.0 m, en un cuarto oscuro. ¿A qué ángulo de incidencia debe encender uno de ellos una linterna, dirigiéndola al espejo, para que el haz reflejado llegue directamente a la otra persona?
13. **●●** Un rayo de luz incide sobre un espejo plano a un ángulo de 35° . Si el espejo se hace girar en un pequeño ángulo θ , ¿a través de qué ángulo girará el rayo reflejado?
14. **●●●** Dos espejos planos, M_1 y M_2 , se colocan juntos, como se ve en la  figura 7.23. *a)* Si el ángulo a que forman los espejos es de 70° , y el ángulo de incidencia θ_{i1} , de un rayo de luz incidente en M_1 es de 35° , ¿cuál es el ángulo de reflexión θ_{r2} , para M_2 ? *b)* Si $a = 115^\circ$ y $\theta_{i1} = 60^\circ$, ¿cuál es θ_{r2} ?




▲ FIGURA 7.23 Juego de espejos planos

Véanse los ejercicios 14 y 15.

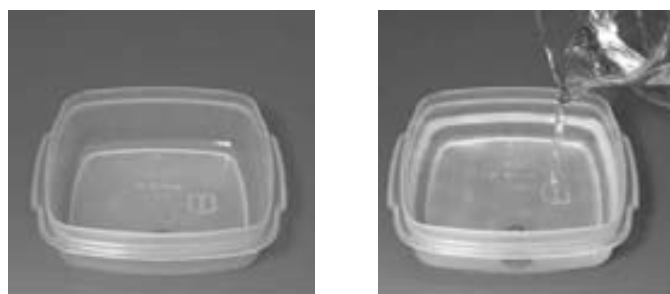
15. **●●●** Para los espejos planos de la figura 7.23, ¿qué ángulos α y θ_{i1} permitirían al rayo reflejarse en la dirección de donde provino, es decir, en dirección paralela al rayo incidente?

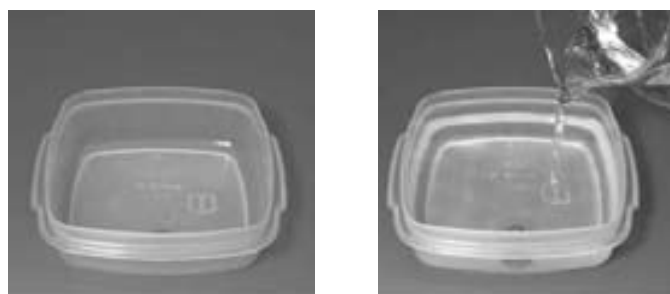
7.3 Refracción y 7.4 Reflexión interna total y fibras ópticas

16. **OM** La luz refractada en la interfase entre dos medios distintos *a)* se desvía hacia la normal cuando $n_1 > n_2$, *b)* se desvía alejándose de la normal cuando $n_1 > n_2$, *c)* se desvía alejándose de la normal cuando $n_1 < n_2$ o *d)* tiene el mismo ángulo de refracción que su ángulo de incidencia.
17. **OM** El índice de refracción *a)* siempre es mayor o igual que 1, *b)* es inversamente proporcional a la rapidez de la luz en un medio, *c)* es inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz en el medio o *d)* todas las opciones anteriores son verdaderas.
18. **OM** ¿Cuál de las siguientes condiciones debe satisfacerse para que ocurra una reflexión interna total? *a)* $n_1 > n_2$, *b)* $n_2 > n_1$, *c)* $\theta_1 > \theta_c$ o *d)* $\theta_1 < \theta_c$.
19. **PC** Explique cuál es la causa física fundamental de la refracción.
20. **PC** Cuando la luz pasa de un medio a otro, ¿cambia su longitud de onda? ¿Su frecuencia? ¿Su rapidez?
21. **PC** Explique por qué el popote de la  figura 7.24 casi parece que estuviera roto. Compare esta figura con la 7.13b y explique la diferencia.



◀ FIGURA 7.24 Efecto de refracción Véase el ejercicio 21.

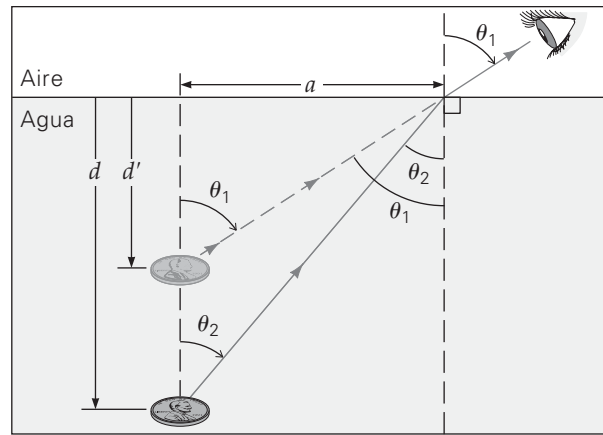
22. **PC** Las fotos de la  figura 7.25 se tomaron con una cámara montada en un tripié, con ángulo fijo. En el interior del recipiente hay una moneda, pero al principio sólo se le ve una punta. Sin embargo, al agregar agua se ve una mayor porción de la moneda. ¿Por qué? Explique lo anterior con un diagrama.



▲ FIGURA 7.25 Primero, apenas si se ve, pero después se ve bien Véanse los ejercicios 22 y 52.

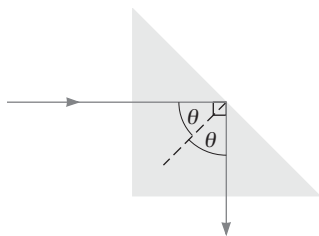
23. **PC** Dos cazadores, uno con arco y flecha y el otro con una escopeta láser, ven un pez bajo el agua. Ambos apuntan directamente hacia donde lo ven. ¿Cuál de ellos, el de la flecha o el del rayo láser, tiene mejor oportunidad de dar en el blanco? Explique por qué.
24. **●** La rapidez de la luz en el núcleo del cristalino en un ojo humano es 2.13×10^8 m/s. ¿Cuál es el índice de refracción del núcleo?
25. **EI ●** Los índices de refracción para el diamante y el circón se encuentran en la tabla 7.1. *a)* La rapidez de la luz en el circón es 1) mayor, 2) menor o 3) igual que la rapidez de la luz en el diamante. Explique por qué. *b)* Calcule la relación de la rapidez de la luz en el circón entre la del diamante.

26. **EI** ● Un haz de luz entra al agua procedente del aire. *a)* El ángulo de refracción será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el ángulo de incidencia. Explique por qué. *b)* Si el haz entra al agua formando un ángulo de 60° en relación con la normal a la superficie, determine el ángulo de refracción.
27. **EI** ● La luz pasa de un recipiente de vidrio crown al agua. *a)* El ángulo de refracción será 1) mayor, 2) igual o 3) menor que el ángulo de incidencia. Explique por qué. *b)* Si el ángulo de refracción es de 20° , ¿cuál es el ángulo de incidencia?
28. ● Un haz de luz que viaja por el aire incide sobre un material plástico transparente a un ángulo de 50° . El ángulo de refracción es de 35° . ¿Cuál es el índice de refracción del plástico?
29. **EI** ● *a)* Para que haya reflexión interna total, la luz debe ir 1) del aire a un diamante o 2) de un diamante al aire. Explique por qué. *b)* ¿Cuál es el ángulo crítico del diamante en el aire?
30. ● El ángulo crítico de cierto tipo de vidrio en el aire es de 41.8° . ¿Cuál es el índice de refracción de ese vidrio?
31. ●● Un haz de luz en el aire incide sobre la superficie de una placa de cuarzo fundido. Parte del haz entra al cuarzo, con un ángulo de refracción de 30° con la normal a la superficie, y otra parte se refleja. ¿Cuál es el ángulo de reflexión?
32. ●● Un haz de luz incide sobre una pieza plana de poliestireno, en un ángulo de 55° con la normal a la superficie. ¿Qué ángulo forma el rayo refractado con el plano de la superficie?
33. ●● Una luz monocromática azul, con frecuencia de 6.5×10^{14} Hz, entra a una pieza de vidrio flint. ¿Cuáles son la frecuencia y la longitud de onda de la luz dentro del vidrio?
34. **EI** ●● Una luz pasa del material A, cuyo índice de refracción es $\frac{4}{3}$, al material B, cuyo índice de refracción es $\frac{5}{4}$. *a)* La rapidez de la luz en el material A es 1) mayor, 2) igual, 3) menor que la rapidez de la luz en el material B. Explique por qué. *b)* Calcule la relación de la rapidez de la luz en el material A entre la rapidez de la luz en el material B.
35. **EI** ●● En el ejercicio 34, *a)* la longitud de onda de la luz en el material A es 1) mayor, 2) igual o 3) menor que la longitud de onda de la luz en el material B. Explique por qué. *b)* ¿Cuál es la relación de la longitud de onda de la luz en el material A respecto al material B?
36. ●● El láser que se usa en la cirugía para tratar algunas enfermedades de la córnea es de excímero y emite luz ultravioleta con 193 nm de longitud de onda en el aire. El índice de refracción de la córnea es 1.376. ¿Cuáles son la longitud de onda y la frecuencia de la luz en la córnea?
37. ●● *a)* Un objeto sumergido en el agua parece más cercano a la superficie de lo que en realidad está. ¿Cuál es la causa de esta ilusión? *b)* Con base en la figura 7.26, demuestre que la profundidad aparente, para ángulos de refracción pequeños, es d/n , donde n es el índice de refracción del agua. [Sugerencia: recuerde que para ángulos pequeños, $\tan \theta \approx \sin \theta$.]



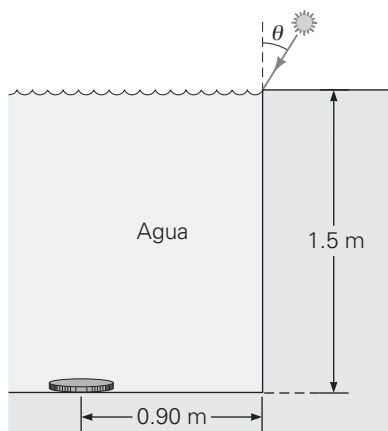
▲ FIGURA 7.26 ¿Profundidad aparente? Véase el ejercicio 37. (Sólo para ángulos pequeños; aquí los ángulos están amplificados para tener mayor claridad.)

38. ●● Una persona yace a la orilla de una alberca, y desde allí ve directamente abajo la tapa de una botella; la profundidad en ese lugar es de 3.2 m. ¿A qué distancia bajo el agua parece estar esa tapa de botella? (Véase el ejercicio 37b.)
39. ●● ¿Qué porcentaje de la profundidad real es la profundidad aparente de un objeto sumergido en el agua, si el observador lo ve casi directamente abajo? (Véase el ejercicio 37b.)
40. ●● Un rayo de luz en el aire llega a una placa de vidrio de 10.0 cm de espesor, con un ángulo de incidencia de 40° . El índice de refracción del vidrio es 1.65. El rayo que sale por la otra cara de la placa es paralelo al rayo incidente, pero tiene un desplazamiento lateral. ¿Cuál es la distancia perpendicular entre la dirección del rayo original y la del rayo emergente? [Sugerencia: véase el ejemplo 7.4.]
41. **EI** ●● Para una persona que está sumergida y que ve hacia arriba a través del agua, la altura del Sol (que es el ángulo entre el Sol y el horizonte) parece de 45° . *a)* La altura real del Sol es 1) mayor, 2) igual o 3) menor que 45° . Explique por qué. *b)* ¿Cuál es en realidad la altura del Sol?
42. ●● ¿A qué ángulo respecto a la superficie debe ver un buzo dentro de un lago hacia arriba para observar la puesta del Sol?
43. ●● Un buzo sumergido dirige una luz hacia la superficie de un cuerpo de agua, con ángulos de incidencia de 40° y 50° . En ambos casos, ¿una persona en la orilla podrá ver el rayo de luz que sale? Justifique su respuesta desde el punto de vista matemático.
44. **EI** ●● *a)* Un rayo de luz va a experimentar una reflexión interna total al pasar por un prisma cuyos ángulos son de 45° , -90° y -45° (figura 7.27). Este arreglo dependerá 1) del índice de refracción del prisma, 2) del índice de refracción del medio que rodea al prisma o 3) de ambos índices de refracción? Explique por qué. *b)* Calcule el índice mínimo de refracción del prisma, si el medio que lo rodea es aire. Realice el cálculo también para el agua.



◀ **FIGURA 7.27** Reflexión interna total en un prisma
Véanse los ejercicios 44 y 45.

45. ●● Un prisma de $45^\circ-90^\circ-45^\circ$ (figura 7.27) está fabricado con un material cuyo índice de refracción es 1.85. ¿Ese prisma se podría usar para desviar 90° un rayo de luz *a*) en aire o *b*) en agua?
46. ●● Una moneda está en el fondo de una alberca, bajo 1.5 m de agua y a 0.90 m de la pared (▼ figura 7.28). Si incide un rayo de luz sobre la superficie del agua en la pared, ¿qué ángulo θ debe formar el rayo con el muro para iluminar la moneda?

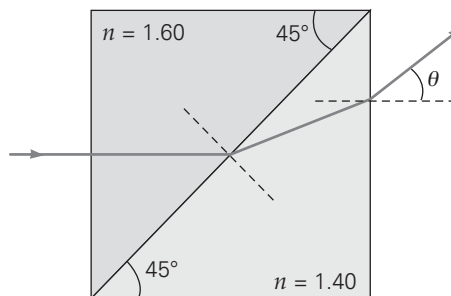


▲ **FIGURA 7.28** Localice la moneda Véase el ejercicio 46.
La figura no está a escala.

47. ●● ¿Podría determinar el índice de refracción del fluido en aire de la figura 7.9a? Si es así, ¿cuál es su valor?
48. ●● Una placa de vidrio crown de 2.5 cm de espesor se coloca sobre un periódico. Si uno ve el periódico casi verticalmente desde arriba, ¿a qué distancia de la superficie del vidrio parecen estar las letras? (Véase el ejercicio 37b.)
49. ●● Un rayo de luz va por el agua y llega a una superficie de un material transparente, con ángulo de incidencia de 45° . Si el ángulo de refracción en el material es de 35° , ¿cuál es su índice de refracción?
50. ●● Luz amarillo verdosa, con una longitud de onda de 550 nm, incide en la superficie de una pieza plana de vidrio crown, con un ángulo de 40° . ¿Cuáles son *a*) el ángulo de refracción de la luz, *b*) la rapidez de la luz en el vidrio y *c*) la longitud de onda de la luz en el vidrio?
51. **EI** ●●● Un haz de luz dirigido hacia arriba, dentro de un material plástico con índice de refracción de 1.60, incide en una interfase superior horizontal. *a*) A ciertos ángulos de incidencia, la luz no se transmite al aire. La causa de esto es 1) la reflexión, 2) la refracción o 3) la reflexión interna total. Explique su respuesta. *b*) Si el ángulo de inci-

dencia es de 45° , ¿parte del haz se transmitiría al aire?
c) Suponga que la superficie superior del material plástico se cubre con una capa de líquido, con índice de refracción igual a 1.20. ¿Qué sucede en este caso?

52. ●●● Un depósito opaco, que estaría completamente vacío si no fuera porque en el fondo hay una moneda, tiene 15 cm de profundidad. Al ver al contenedor desde un ángulo de 50° con respecto a su lado vertical, no se ve nada en el fondo. Cuando se llena con agua, se ve la moneda (desde el mismo ángulo) en el fondo y justo saliendo del lado del depósito. (Véase la figura 7.25.) ¿A qué distancia del lado del depósito está la moneda?
53. ●●● Una pecera circular, que se encuentra a la intemperie, tiene 4.00 m de diámetro y una profundidad uniforme de 1.50 m. Un pez localizado a media profundidad y a 0.50 m de la orilla más cercana justo alcanza a ver por completo a una persona de 1.80 m de alto. ¿A qué distancia de la orilla de la pecera se encuentra la persona?
54. ●●● Un cubo de vidrio flint descansa sobre un periódico en una mesa. La mitad inferior de los lados verticales del cubo está pintada, de manera que es opaca, pero la mitad superior es transparente. Al mirar por uno de los lados *verticales* del cubo ¿es posible ver la parte del periódico cubierta por la parte central del vidrio? Pruebe su respuesta. [Sugerencia: dibuje la luz al abandonar el punto de interés.]
55. ●●● Se colocan juntos dos prismas de vidrio (▼ figura 7.29). *a*) Si un haz de luz llega a la cara de uno de ellos en dirección normal, ¿a qué ángulo θ sale el haz por el otro prisma? *b*) ¿A qué ángulo de incidencia se refractaría el haz a lo largo de la interfase entre los prismas?

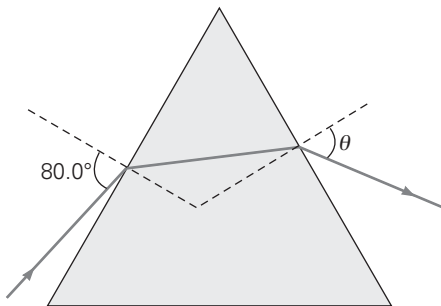


▲ **FIGURA 7.29** Prismas unidos Véase el ejercicio 55.

7.5 Dispersión

56. **OM** La dispersión sólo se presenta si la luz es *a*) monocromática, *b*) policromática, *c*) blanca o *d*) tanto *b* como *c*.
57. **OM** La dispersión sólo se presenta durante *a*) la reflexión, *b*) la refracción, *c*) la reflexión interna total o *d*) todos los casos anteriores.
58. **OM** La dispersión se produce por *a*) la diferencia en la rapidez de la luz en distintos medios, *b*) la diferencia en la rapidez de la luz para distintas longitudes de onda de la luz en un medio determinado, *c*) la diferencia en el ángulo de incidencia para distintas longitudes de onda de luz en un medio determinado o *d*) la diferencia en los índices de refracción de la luz en distintos medios.

59. **PC** ¿Por qué la dispersión es más notable en un prisma de forma triangular que en un bloque cuadrado?
60. **PC** Un prisma de vidrio dispersa la luz blanca y forma un espectro. ¿Podría usarse un segundo prisma de vidrio para recombinar los componentes del espectro? Explique su respuesta.
61. **PC** Es imposible caminar bajo un arco iris. Explique por qué.
62. **PC** Un rayo de luz está formado por dos colores, A y B, y pasa por un prisma. El color A se refracta más que el color B. ¿Cuál color tiene la mayor longitud de onda? Explique su respuesta.
63. **PC** a) Si el vidrio es dispersor, ¿por qué no se ven los colores del arco iris cuando la luz del Sol pasa por el vidrio de una ventana? b) Hay dispersión cuando una luz policromática incide en un medio dispersor con un ángulo de 0° ? Explique su respuesta. (¿Todos los colores de la luz tienen la misma rapidez en ese medio?)
64. **EI** ●● El índice de refracción del vidrio crown es 1.515, para la luz roja, y 1.523 para la luz azul. a) Si la luz incide en el vidrio crown, llegando desde el aire, ¿cuál de los dos colores, rojo o azul, se refractará más? ¿Por qué? b) Calcule el ángulo que separa a los rayos de los dos colores, en una pieza de vidrio crown, si su ángulo de incidencia es de 37° .
65. ●● Un haz de luz, con componentes rojo y azul, de longitudes de onda de 670 y 425 nm, respectivamente, llega a una placa de cuarzo fundido, con un ángulo de incidencia de 30° . Al refractarse, los componentes se separan y forman un ángulo de 0.00131 rad. Si el índice de refracción para la luz roja es 1.4925, ¿cuál es el índice de refracción para la luz azul?
66. ●● Una luz blanca pasa por un prisma de vidrio crown y llega a una interfase con aire en un ángulo de 41.15° . Suponga que los índices de refracción son los mismos del ejercicio 64. ¿Qué color (o colores) de luz se refractará hacia fuera, en el aire?
67. ●●● Un haz de luz roja incide en un prisma equilátero, como se ve en la **figura 7.30**. a) Si el índice de refracción del

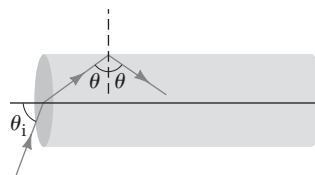


▲ **FIGURA 7.30** De nuevo el prisma Véase el ejercicio 67.

prisma es 1.400 para la luz roja, ¿a qué ángulo θ sale el rayo por la otra cara del prisma? b) Supongamos que el haz incidente fuera de luz blanca. ¿Cuál sería la separación angular de los componentes rojo y azul en el rayo que sale, si el índice de refracción de la luz azul fuera 1.403? c) ¿Y si el índice de refracción para la luz azul fuera 1.405?

Ejercicios adicionales

68. En la figura 7.21b, si el índice de refracción del prisma de vidrio es 1.5, y el experimento se hace en el agua y no en el aire, ¿qué sucedería con el espectro que sale del prisma? ¿Y si se hace en un líquido que también tenga un índice de refracción de 1.5? Explique su respuesta.
69. Una luz pasa del medio A al medio B con un ángulo de incidencia de 30° . El índice de refracción de A es 1.5 veces el de B. a) ¿Cuál es el ángulo de refracción? b) ¿Cuál es la relación de la rapidez de la luz en B entre la rapidez de la luz en A? c) ¿Cuál es la relación de la frecuencia de la luz en B entre la frecuencia de la luz en A? d) ¿A qué ángulo de incidencia se reflejaría internamente la luz?
70. Para que la reflexión interna total ocurra dentro de una fibra óptica como la que se observa en la **figura 7.31**, el ángulo θ debe ser mayor que el ángulo crítico para la interfase fibra-aire. En el extremo de la fibra, la luz incidente experimenta una refracción para entrar en ella. Si la reflexión interna total debe ocurrir para *cualquier* ángulo de incidencia, θ_i , fuera del extremo de la fibra, ¿cuál es el índice mínimo de refracción de la fibra?



◀ **FIGURA 7.31** Fibra óptica Véase el ejercicio 70.

71. **EI** El ángulo crítico para la interfase vidrio-aire es de 41.11° para la luz roja y de 41.04° para la luz azul. a) Durante el tiempo que la luz azul recorre 1.000 m, la luz roja recorrerá 1) una mayor distancia, 2) una menor distancia o 3) exactamente 1.000 m. Explique por qué. b) Calcule la diferencia en la distancia recorrida por los dos colores.
72. En el ejercicio 67, si el ángulo de incidencia es demasiado pequeño, la luz no saldrá por la otra cara del prisma. ¿Cómo podría suceder esto? Calcule el ángulo mínimo de incidencia para la luz roja de manera que no salga por la otra cara del prisma.
73. Una luz que viaja por el aire incide sobre un material transparente. Se sabe que el ángulo de reflexión es el doble del ángulo de refracción. ¿Cuál es el *intervalo* del índice de refracción del material?

ESPEJOS Y LENTES

| | |
|--|-----|
| 8.1 Espejos planos | 212 |
| 8.2 Espejos esféricos | 214 |
| 8.3 Lentes | 222 |
| 8.4 La ecuación del fabricante de lentes | 232 |
| *8.5 Aberraciones de las lentes | 234 |



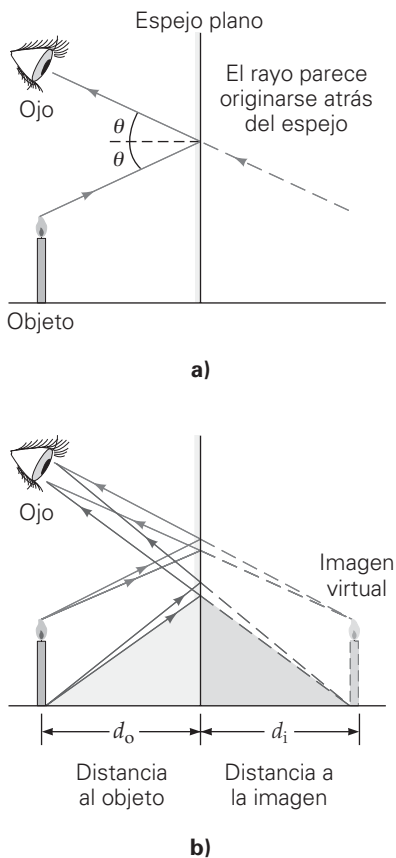
HECHOS DE FÍSICA

- La lente óptica de refracción más grande del mundo mide 1.827 m (5.99 ft) de diámetro. La construyó un equipo del Optics Shop of the Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona, en Tucson, Arizona, y se terminó en enero de 2000.
- El espejo más grande en proceso de desarrollo para el Observatorio Espacial Herschel de la Agencia Espacial Europea mide 3.5 m (11.5 ft) de diámetro. Está hecho de carburo de silicio, que reduce su masa por un factor de 5 en comparación con los materiales tradicionales.
- El sistema óptico de una cámara fotográfica en realidad tiene más de un elemento (es decir, más de una lente). Muchas lentes de cámaras tienen siete o más elementos compensatorios que permiten reducir o eliminar diversos tipos de aberraciones de las lentes. Una sola lente produciría imágenes distorsionadas.

¿Cómo sería la vida si no hubiera espejos en los baños ni en los automóviles, o si no existieran los anteojos? Imagine un mundo sin imágenes ópticas de cualquier clase: sin fotografías, sin cine, sin televisión. Imagine lo poco que sabríamos del universo si no hubiera telescopios para observar planetas y estrellas lejanos, o lo poco que sabríamos de biología y medicina si no hubiera microscopios para observar las bacterias y las células. A veces olvidamos la gran dependencia que tenemos de los espejos y de las lentes.

Quizás el primer espejo fue la superficie de un charco de agua. Después, se descubrió que los metales pulidos y el vidrio tenían propiedades reflectoras. Nuestros antepasados también deben haberse dado cuenta de que al mirar los objetos a través del vidrio, éstos parecían distintos en comparación a cuando los veían de manera directa, dependiendo de la forma del vidrio. En algunos casos, los objetos parecían aumentados o invertidos, como en la foto de esta página. (Véase el pliego a color al final del libro.) Con el tiempo, las personas aprendieron a tallar el vidrio para fabricar lentes, preparando el camino hacia los numerosos dispositivos ópticos que en la actualidad son tan comunes.

Las propiedades ópticas de los espejos y de las lentes se basan en los principios de reflexión y refracción de la luz, que estudiamos en el capítulo 7. Ahora aprenderemos la forma en que funcionan los espejos y las lentes. Entre otras cosas, descubriremos por qué la imagen en la foto de esta página está de cabeza y reducida, mientras que las imágenes en un espejo plano ordinario están derechas, ¡aunque tal parece que su imagen no se peina con la misma mano que usted utiliza!



▲ **FIGURA 8.1** Imagen formada por un espejo plano *a*) Un rayo procedente de un punto en el objeto se refleja en el espejo siguiendo la ley de la reflexión. *b*) Los rayos de varios puntos del objeto producen una imagen. Como los dos triángulos sombreados son idénticos, la distancia a la imagen d_i (la distancia de la imagen al espejo) es igual a la distancia al objeto d_o . Esto es, la distancia que parece haber entre la imagen y el espejo es la misma que hay entre el objeto y el espejo. Los rayos parecen emanar de la posición de la imagen. En este caso se dice que la imagen es virtual.

8.1 Espejos planos

OBJETIVOS: *a*) Comprender cómo se forman las imágenes y *b*) describir las características de las imágenes formadas por los espejos planos.

Los espejos son superficies reflectoras o reflectantes lisas, hechos de metal pulido o de vidrio con un recubrimiento metálico. Como ya sabemos, hasta una pieza de vidrio sin recubrimiento, como el vidrio de una ventana, puede funcionar como un espejo. Sin embargo, cuando se recubre una cara del vidrio con un compuesto de estaño, mercurio, aluminio o plata, aumenta la reflectividad del vidrio, porque la luz no atraviesa el recubrimiento. Un espejo puede tener recubrimiento frontal o trasero, pero la mayoría tiene un recubrimiento por detrás.

Al ver un espejo de forma directa, lo que se ve son las imágenes reflejadas de uno y de los objetos que le rodean (que parecen estar al otro lado de la superficie del espejo). La geometría de la superficie del espejo influye sobre el tamaño, la orientación y el tipo de imagen. En general, una *imagen* es la contraparte visual de un objeto, producida por la reflexión (en los espejos) o la refracción (en el caso de las lentes).

Un espejo con superficie plana se llama **espejo plano**. El diagrama de rayos de la figura 8.1 muestra el modo en que se forman las imágenes en un espejo plano. Parece que una imagen está atrás o “dentro” del espejo. Esto se debe a que cuando el espejo refleja un rayo de luz del objeto hacia el ojo (figura 8.1a), parece que el rayo se origina detrás del espejo. Los rayos reflejados de las partes superior e inferior de un objeto se ilustran en la figura 8.1b. En realidad, los rayos de luz que provienen de todos los puntos de la parte del objeto que da hacia el espejo se reflejan, y entonces se observa una imagen del objeto completo.

La imagen formada así *parece* que está detrás del espejo. Se le llama **imagen virtual**. Los rayos luminosos parecen proceder de las imágenes virtuales y apartarse unos de otros, aunque eso no es cierto. En realidad, ninguna energía lumínica procede de la imagen o pasa a través de ella. Sin embargo, los espejos esféricos (que se describen en la sección 8.2) pueden proyectar imágenes frente a ellos, donde la luz efectivamente pasa a través de la imagen. Esta clase de imágenes se llaman **imágenes reales**. Un ejemplo de imagen real es la que produce un proyector de películas en un salón de clase.

Observe las posiciones y distancias del objeto y la imagen producida por el espejo en la figura 8.1b. Es obvio que la distancia de un objeto a un espejo se llama *distancia del objeto* (d_o), y la distancia que parece haber entre su imagen y la parte posterior del espejo se llama *distancia de la imagen* (d_i). Se puede ver, por consideraciones geométricas de triángulos idénticos y la ley de la reflexión ($\theta_i = \theta_r$) que $d_o = d_i$, lo que significa que *la imagen formada por un espejo plano parece estar detrás del espejo a una distancia igual a la que hay entre el objeto y el espejo*. (Véase el ejercicio 17.)

Son interesantes diversas características de las imágenes. Dos de ellas son su tamaño y orientación con respecto a las del objeto. Ambas se expresan en términos del **factor de amplificación lateral** (M), que se define como la relación entre la altura de la imagen (h_i) y la del objeto (h_o):

$$M = \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h_i}{h_o} \quad (8.1)$$

Usaremos una vela encendida como objeto, para describir otra característica importante de la imagen: la orientación, es decir, si la imagen está derecha o invertida con respecto a la orientación del objeto. (Al trazar diagramas de rayos, una flecha representa adecuadamente al objeto para estos fines.) Para un espejo plano, la imagen siempre está derecha (o erguida). Eso significa que la imagen está orientada en la misma dirección que el objeto. Se dice entonces que h_i y h_o tienen *el mismo signo* (ambos signos son positivos o ambos negativos), así que M es de signo positivo. Note que M es una cantidad adimensional, por ser una relación de alturas.

En la figura 8.2 también se observa que la imagen y el objeto tienen el mismo tamaño (altura), por lo que $h_i = h_o$. Por consiguiente, $M = +1$ para un espejo plano, pues la imagen está derecha y no hay aumento. Esto es, en un espejo plano una persona y su imagen tienen el mismo tamaño.

Con otro tipo de espejos, como los esféricos (que estudiaremos dentro de poco), es posible tener imágenes invertidas donde M es negativo. En resumen, el signo de M nos indica la orientación de la imagen con respecto al objeto, mientras que su valor absoluto nos permite conocer el aumento.

TABLA 8.1 Características de las imágenes formadas por los espejos planos

| | |
|-------------|---|
| $d_i = d_o$ | La distancia a la imagen es igual a la distancia al objeto. Esto es, la distancia que parece haber entre la imagen y la parte posterior del espejo es igual a la que hay entre el espejo y el objeto. |
| $M = +1$ | La imagen es virtual, derecha y sin aumento. |

Otra característica de las imágenes reflejadas es la llamada *inversión derecha-izquierda*. Cuando se mira uno al espejo y levanta la mano derecha, parece que la imagen está levantando su mano izquierda. Sin embargo, esta inversión derecha-izquierda es aparente, causada en realidad por la inversión frente-atrás. Por ejemplo, si su cara está de frente al sur, entonces su espalda está hacia el norte. Por otra parte, su imagen estará de cara hacia el norte y dará la espalda al sur, es decir, se trata de una inversión de la parte anterior y la posterior. Usted podrá demostrar esta inversión pidiendo a uno de sus amigos que se ponga de pie dando la cara hacia usted (sin un espejo). Si su amigo sube su mano derecha, usted podrá ver que esa mano en realidad está al lado izquierdo de usted.

Las características principales de la imagen formada por un espejo plano se resumen en la tabla 8.1. Véase también la sección A fondo 8.1, en la p. 215, que describe todo lo que es posible hacer con los espejos.

Ejemplo 8.1 ■ De cuerpo completo: longitud mínima del espejo

¿Cuál es la longitud vertical mínima que debe tener un espejo plano para que una persona pueda ver su imagen completa (de la cabeza hasta la punta de los pies)? (Véase la figura 8.3.)

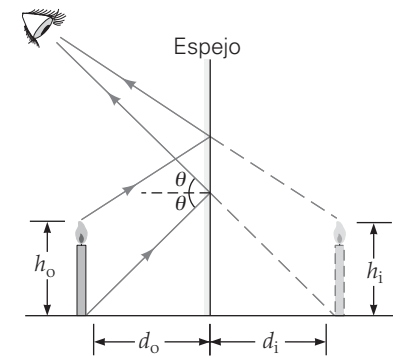
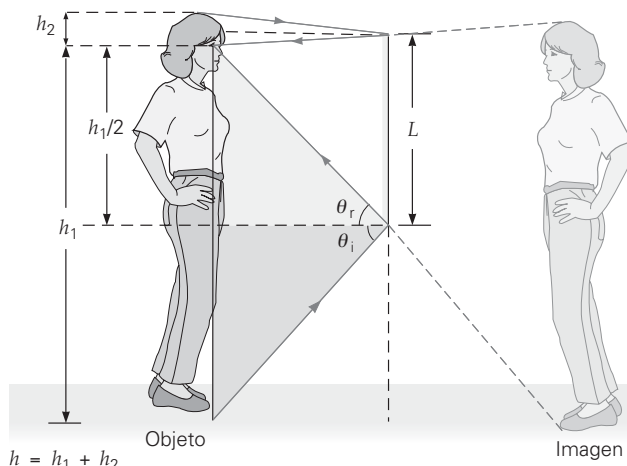
Razonamiento. Al aplicar la ley de la reflexión, vemos en la figura que los rayos necesarios para que la imagen sea completa forman dos triángulos. Esos triángulos relacionan la altura de la persona con la longitud mínima del espejo.

Solución. Para calcular esta longitud se examina el caso ilustrado en la figura 8.3. Con un espejo de longitud mínima, un rayo procedente de la parte superior de la persona se refleja en la parte superior del espejo, y un rayo que proviene de los pies de la persona se refleja en la parte inferior del espejo. La longitud L del espejo es, entonces, la distancia entre las líneas horizontales punteadas perpendiculares al espejo, en sus lados superior e inferior.

Sin embargo, esas líneas también son las normales en las reflexiones de los rayos. De acuerdo con la ley de la reflexión, las normales bisecan a los ángulos que forman los rayos incidentes y reflejados; esto es, $\theta_i = \theta_r$. Entonces, como los triángulos respectivos a cada lado de la normal punteada son semejantes, la longitud del espejo, desde su lado inferior hasta un punto al nivel de los ojos de la persona es $h_1/2$, donde h_1 es la altura de la persona desde sus pies hasta sus ojos. De igual forma, la pequeña longitud superior del espejo es $h_2/2$ (la distancia vertical entre los ojos de la persona y la orilla superior del espejo). Entonces,

$$L = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{h}{2}$$

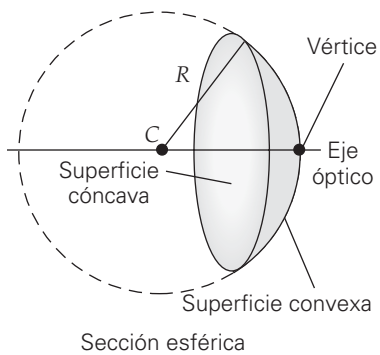
donde h es la altura total de la persona.



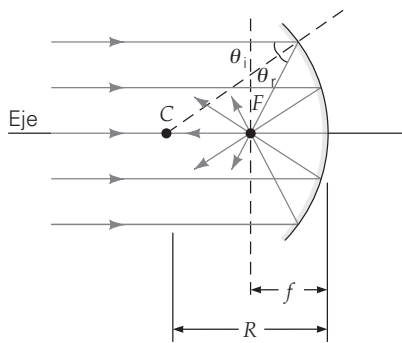
▲ **FIGURA 8.2 Aumento** El factor de amplificación lateral, o de altura, se define como $M = h_i/h_o$. Para un espejo plano, $M = +1$, lo que significa que $h_i = h_o$, es decir, la imagen tiene la misma altura que el objeto, además de que está derecha.

(continúa en la siguiente página)

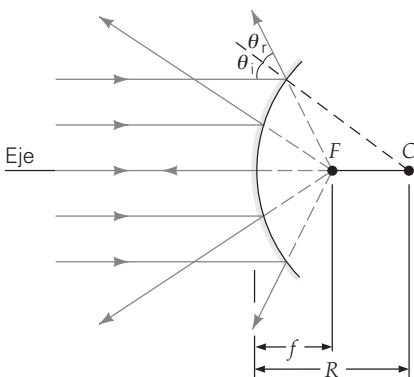
◀ **FIGURA 8.3 De cuerpo entero** La altura mínima, o longitud vertical, de un espejo plano, necesaria para que una persona vea su imagen completa (de la cabeza a los pies) es la mitad de la altura de la persona. Véase el ejemplo 8.1.



▲ FIGURA 8.4 Espejos esféricos
Un espejo esférico es un casquete de una esfera. La superficie reflectora puede ser la exterior (convexa) o la interior (cóncava) del casquete esférico.



a) Espejo cóncavo o convergente



b) Espejo convexo o divergente

▲ FIGURA 8.5 Punto focal *a)* Los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo esférico cóncavo convergen en el punto focal o foco *F*. *b)* Los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo esférico convexo se reflejan en trayectorias que parecen provenir de un foco detrás del espejo. Observe que cada rayo en el diagrama satisface la ley de la reflexión, $\theta_i = \theta_r$.

Por lo anterior, para que una persona vea su imagen completa en un espejo plano, la altura mínima, o longitud vertical, del espejo debe ser igual a la mitad de la altura de la persona.

El lector puede hacer un experimento sencillo para demostrar esta conclusión. Consiga algo de papel periódico y una cinta adhesiva, así como un espejo de cuerpo entero. Cubra gradualmente partes del espejo con el periódico hasta que no pueda ver su imagen completa. Verá que sólo necesitará un espejo que tenga la mitad de su altura.

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué efecto tiene la distancia de una persona al espejo sobre la longitud mínima necesaria para producir su imagen completa? (Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.)

8.2 Espejos esféricos

OBJETIVOS: *a)* Diferenciar entre espejos esféricos convergentes y divergentes, *b)* describir sus imágenes y características y *c)* determinar las características de la imagen con diagramas de rayos y con la ecuación del espejo esférico.

Como su nombre lo indica, un **espejo esférico** es una superficie reflectora con geometría esférica. La figura 8.4 muestra que si se rebana una parte de una esfera hueca de radio *R* a lo largo de un plano, la parte cortada tiene la forma de un espejo esférico. Tanto el interior como el exterior de ese casquete pueden ser reflectores. Si la reflexión se efectúa en la superficie interna, la sección se comporta como un **espejo cóncavo**. Si la reflexión se realiza en la superficie externa, entonces la sección se comporta como un **espejo convexo**.

La línea radial que pasa por el centro del espejo esférico se llama *eje óptico* e interseca a la superficie del espejo en el *vértice* de la parte esférica (figura 8.4). El punto del eje óptico que corresponde al centro de la esfera de donde se cortó la sección se llama **centro de curvatura (C)**. La distancia entre el vértice y el centro de curvatura es igual al radio de la esfera, y se llama **radio de curvatura (R)**.

Cuando unos rayos paralelos y cercanos al eje óptico inciden sobre un espejo cóncavo y se reflejan, convergen en un punto común llamado **foco (F)**. En consecuencia, un espejo cóncavo se llama **espejo convergente** (figura 8.5a). Advierta que cada rayo satisface la ley de la reflexión, $\theta_i = \theta_r$.

De igual forma, los rayos paralelos y cercanos al eje óptico de un espejo convexo divergen al reflejarse, como si provinieran de un foco atrás de la superficie del espejo (figura 8.5b). Por lo anterior, se dice que un espejo convexo es un **espejo divergente** (figura 8.6). Cuando uno ve rayos divergentes, el cerebro interpreta, o supone, que hay un objeto desde donde los rayos *parecen* divergir, aunque en realidad no exista tal objeto.



◀ FIGURA 8.6 Espejo divergente
Si trazamos los rayos al revés en la figura 8.5b, veremos que un espejo esférico divergente (convexo) produce un mayor campo de visión; esto se aprecia con este espejo. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 8.1 TODO SE HACE CON ESPEJOS



FIGURA 1 La Esfinge, una ilustración del sensacional acto de ilusionismo de Tobin. El cuerpo se ocultaba con dos espejos planos.



FIGURA 2 Houdini y Jennie, el elefante que desaparece. El elefante desaparecía ante la vista de los espectadores cuando Houdini disparaba una pistola.

La mayoría de nosotros nos hemos sentido fascinados por los sensacionales trucos de los magos, que hacen aparecer y desaparecer objetos y animales súbitamente en el escenario. Por supuesto, éstos no aparecen ni desaparecen de verdad. El mago requiere de habilidades especiales para realizar el truco rápidamente y con suavidad para “engañar” al auditorio. Todo se hace con espejos, afirman.

En 1876, Thomas William Tobin inventó el primer truco de ilusionismo a base de espejos, “La Esfinge”, para los magos. Su invención se basaba en el uso de espejos para ocultar personas u objetos, como se observa en la figura 1; esta imagen su utilizó como portada del libro *Modern Magic* en 1876. El truco consiste en colocar dos espejos planos entre las tres patas de una mesa, para así esconder el cuerpo de una persona.

Harry Houdini, el mundialmente famoso maestro del ilusionismo, pensaba que era muy fácil sacar una paloma de un sombrero o hacer desaparecer un conejo en el aire. En 1918, Houdini hizo “desaparecer” un elefante de 4500 kg, llamado Jennie, en medio del escenario en el Teatro Hipódromo de Nueva York (figura 2). El acto se llamaba “El elefante que se desvanece”.

Cuando llegaba el momento de hacer desaparecer al elefante, dos enormes espejos planos en ángulo recto uno con el otro se deslizaban rápidamente hacia el lugar preciso. Al alinearlos de la manera correcta, los espejos reflejaban la luz de las paredes inte-

riores del escenario para formar imágenes virtuales que igualaban el telón de fondo del escenario. Así que el auditorio sólo veía el escenario sin el elefante (figura 3). Una luz estroboscópica se utilizaba para disimular el breve desplazamiento de los espejos. El elefante parecía desaparecer rápidamente del escenario.

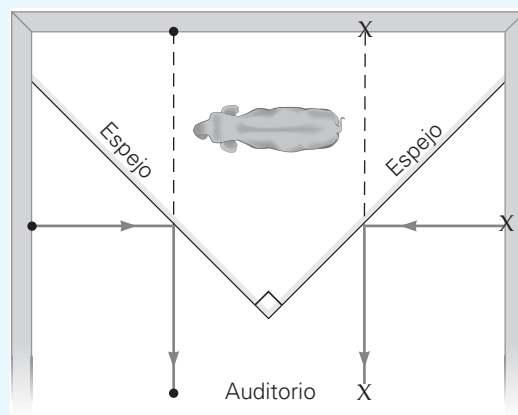


FIGURA 3 El elefante que desaparece. Dos enormes espejos en ángulo recto uno con el otro se utilizaban para ocultar al elefante.

La distancia del vértice al foco de los rayos paralelos cercanos al eje de un espejo esférico se llama **distancia focal** f . (Véase la figura 8.5.) La distancia focal se relaciona con el radio de curvatura mediante esta sencilla ecuación:

$$f = \frac{R}{2} \quad \text{distancia focal, espejo esférico} \quad (8.2)$$

El resultado anterior es válido sólo cuando los rayos están cerca del eje óptico, esto es, para una aproximación de un ángulo pequeño. Los rayos alejados del eje óptico se enfocarán en diferentes focos, lo que dará por resultado cierta distorsión de la imagen. En óptica, esta distorsión es un ejemplo de *aberración*. Algunos espejos telescópicos son de forma parabólica y no esférica, de manera que *todos* los rayos paralelos al eje óptico se enfocan en el punto focal, eliminando así la *aberración esférica*.

Nota:

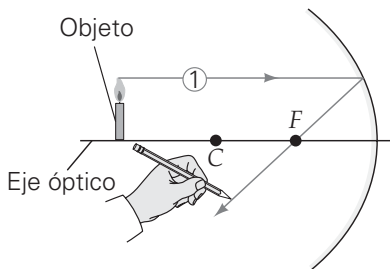
espejo cóncavo = espejo convergente

espejo convexo = espejo divergente

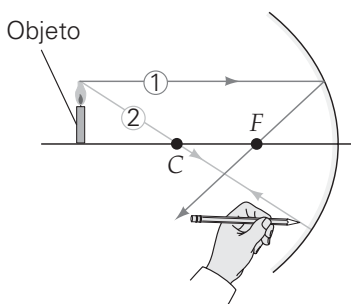
APRENDER DIBUJANDO

Diagramas de rayos para un espejo (véase el ejemplo 8.2)

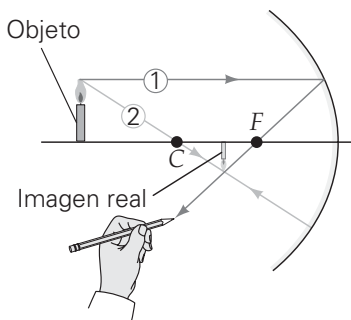
Espejo convergente (cóncavo)



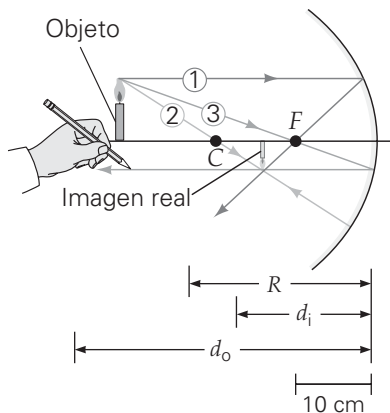
1 Rayo paralelo



2 Rayo principal (radial)



3 Ubicación de la imagen



4 También se puede usar el rayo focal

Diagramas de rayos

Las características de las imágenes formadas por espejos esféricos se determinan con la ayuda de la óptica geométrica (que se presentó en el capítulo 7). Este método consiste en trazar rayos que emanan de uno o más puntos de un objeto. Se aplica la ley de la reflexión ($\theta_i = \theta_r$), y se definen tres rayos con respecto a la geometría del espejo:

1. Un **rayo paralelo**, que incide a lo largo de una trayectoria paralela al eje óptico, y que se refleja y pasa (o parece pasar) por el foco (al igual que todos los rayos paralelos y cercanos al eje).
2. Un **rayo radial**, que incide pasando por el centro de curvatura (C) del espejo esférico. Como incide en dirección normal a la superficie del espejo, se refleja a lo largo de su trayectoria de llegada y pasan por el punto C.
3. Un **rayo focal**, que pasa (o parece pasar) por el foco y se refleja en dirección paralela al eje óptico. Es, por así decirlo, un rayo paralelo que viaja en sentido contrario.

Si utilizamos dos rayos cualesquiera de los tres anteriores podremos ubicar la imagen (distancia a la imagen) y determinar su tamaño (aumentado o reducido), su orientación (derecha o invertida) y su tipo (real o virtual). Se acostumbra usar la punta del objeto asimétrico (por ejemplo, la punta de una flecha o la llama de una vela) como el punto de partida de los rayos. El punto correspondiente de la imagen estará en el punto de intersección de los rayos. Con este método se facilita ver si la imagen está derecha o invertida.

Sin embargo, hay que tener presente que *es factible utilizar rayos bien trazados de cualquier punto del objeto para localizar la imagen*. Todo punto de un objeto visible funciona como emisor de luz. Por ejemplo, en una vela, la llama emite su propia luz, pero cualquier punto de la vela refleja la luz.

Ejemplo 8.2 ■ Aprenda dibujando: diagrama de rayos para un espejo

Se coloca un objeto a 39.0 cm frente a un espejo esférico cóncavo de 24.0 cm de radio. a) Con un diagrama de rayos ubique la imagen formada por este espejo. b) Describa las características de la imagen.

Razonamiento. Un diagrama de rayos, trazado con precisión, dará por sí solo información “cuantitativa” acerca de la ubicación y las características de la imagen, que también podrían determinarse matemáticamente.

Solución.

Dado: $R = 24.0$ cm
 $d_o = 39.0$ cm

Encuentre: a) La ubicación de la imagen
b) Las características de la imagen

a) Como se pide elaborar un diagrama de rayos para ubicar la imagen, lo primero que se debe hacer es elegir la escala del dibujo. Si se usa una escala en la que 1 cm en el dibujo representa 10 cm en la realidad, habría que trazar el objeto a 3.90 cm frente al espejo.

Primero se traza el eje óptico, el espejo, el objeto (una vela encendida) y el centro de curvatura (C). De acuerdo con la ecuación 8.2, $f = 24.0 \text{ cm}/2 = 12.0$ cm. Entonces se ubica el foco (F) a la mitad de la distancia del vértice al centro de curvatura.

Para ubicar la imagen, se siguen los pasos 1 a 4 de la figura de Aprender dibujando:

1. El primer rayo que se trazó en este caso es el rayo paralelo (el ① en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo paralelo al eje óptico. Al reflejarse, ese rayo pasa por el foco, F.
2. A continuación se traza el rayo radial (② en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo que pase por el centro de curvatura, C. Ese rayo se reflejará por su trayectoria original (¿por qué?).
3. Se puede ver con claridad que los dos rayos se intersecan. El punto de intersección es la punta de la *imagen* de la vela. A partir de este punto se traza la imagen extendiendo la punta de la flama hacia el eje óptico. La distancia de imagen $d_i = 17$ cm, como se mide en el diagrama.
4. Sólo se necesitan dos rayos para ubicar la imagen. Sin embargo, si para verificar se traza el tercero, que en este caso es el rayo focal (③ en la figura), éste deberá pasar por el mismo punto de la imagen donde se intersecan los otros dos rayos (si se traza el diagrama con cuidado). El rayo focal de la punta de la llama que pasa por el foco, F, al reflejarse, será paralelo al eje óptico.

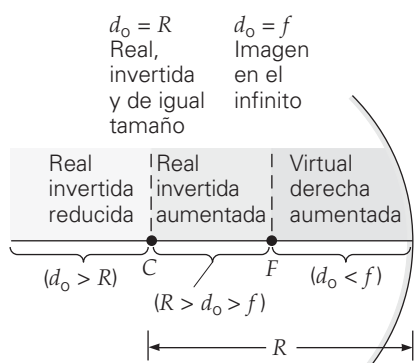
b) En el diagrama de rayos que se dibujó en el inciso *a* se observa con claridad que la imagen es real, porque los rayos se intersecan *frente* al espejo. Los rayos reflejados convergen y pasan por la imagen. Resulta entonces una imagen real, que se podría ver en una pantalla (por ejemplo, un trozo de papel blanco) colocada a la distancia d_i del espejo cóncavo. Además, la imagen está invertida (porque la llama apunta hacia abajo) y es más pequeña que el objeto.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cuáles serían las características de la imagen si el objeto estuviera a 15.0 cm del espejo? Ubique la imagen y describa sus características.

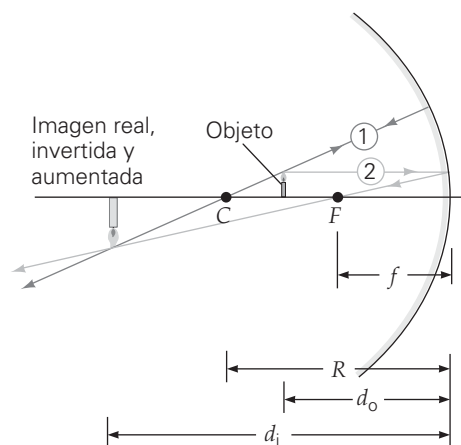
En el Ejemplo integrado 8.4 se presentará un diagrama de rayos en el que se usan los tres mismos rayos con un espejo convexo (divergente).

Un espejo convergente *no* siempre forma una imagen real. Para un espejo esférico convergente, las características de la imagen cambian con la distancia del objeto al espejo. Hay dos puntos donde esos cambios son drásticos: C , el centro de curvatura, y F , el foco. Estos puntos dividen al eje óptico en tres regiones (▼ figura 8.7a): $d_o > R$, $R > d_o > f$ y $d_o < f$.

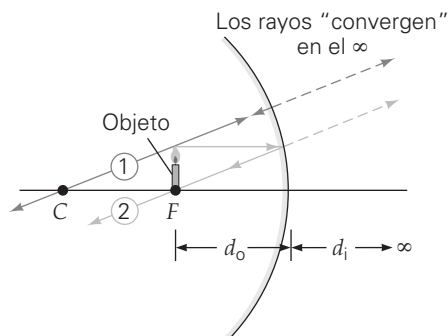
▼ **FIGURA 8.7 Espejos cóncavos** *a)* Para un espejo cóncavo o convergente, el objeto se puede ubicar dentro de una de las tres regiones definidas por el centro de curvatura (C) y el foco (F), o en uno de esos dos puntos. Para $d_o > R$, la imagen es real, invertida y más pequeña que el objeto, como se ve en los diagramas de rayos del ejemplo 8.2. *b)* Cuando $R > d_o > f$, la imagen también es real e invertida, pero agrandada. *c)* Cuando el objeto está en el foco F , es decir, que $d_o = f$, se dice que la imagen se forma en el infinito. *d)* Cuando $d_o < f$, la imagen es virtual, derecha y aumentada.



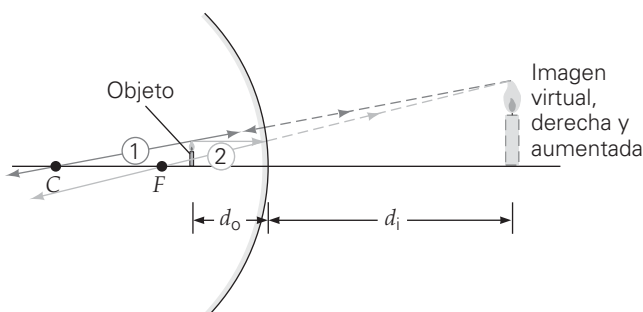
a) Espejo cóncavo



b) $(R > d_o > f)$



c) $d_o = f$



d) $d_o < f$

Se comenzará la descripción con el objeto en la región más alejada del espejo ($d_o > R$), viendo lo que sucede al acercarse a él:

- El caso en que $d_o > R$ ya se describió en el ejemplo 8.2.
- Cuando $d_o = R = 2f$, la imagen es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.
- Cuando $R > d_o > f$, se forma una imagen aumentada, invertida y real (figura 8.7b). La imagen es aumentada cuando el objeto está más cerca que el centro de curvatura, C .
- Cuando $d_o = f$, el objeto está en el foco (figura 8.7c). Los rayos reflejados son paralelos, y se dice que la imagen “se forma en el infinito”. El foco F es un punto especial de “paso” de los rayos, porque divide al espacio frente al espejo en dos regiones.
- Cuando $d_o < f$, el objeto está entre el foco y la superficie del espejo. Se forma entonces una imagen virtual, aumentada y derecha (figura 8.7d).

Cuando $d_o > f$, la imagen es real; cuando $d_o < f$, la imagen es virtual. Cuando $d_o = f$, la imagen está “en el infinito” (figura 8.7c). Esto es, el objeto está tan alejado que los rayos que emanan de él y llegan al espejo son paralelos en esencia, y su imagen se forma en el plano focal. Este hecho es la base de un método sencillo para determinar la distancia focal de un espejo cóncavo.

Como hemos visto, la posición, la orientación y el tamaño de la imagen se pueden determinar en forma gráfica, con diagramas de rayos trazados a escala. Sin embargo, estas características se determinan con más rapidez y precisión con métodos analíticos. Es posible demostrar, por medio de la geometría, que la distancia al objeto (d_o), la distancia a la imagen (d_i) y la distancia focal (f) están relacionadas. Esta relación se conoce como **ecuación del espejo esférico**:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad \text{ecuación del espejo esférico} \quad (8.3)$$

Note que esta ecuación se puede escribir en función del radio de curvatura, R , o de la distancia focal, f , ya que de acuerdo con la ecuación 8.2, $f = R/2$. Tanto R como f pueden ser positivos o negativos, como explicaremos dentro de poco.

Si d_i es la cantidad que se busca para un espejo esférico, sería conveniente emplear una forma alternativa de la ecuación del espejo esférico:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \quad (8.3a)$$

Pero siempre es posible utilizar la forma recíproca de la ecuación 8.3.

Los signos de las diversas cantidades son muy importantes en la aplicación de las ecuaciones 8.3. Utilizaremos las convenciones de signos resumidas en la tabla 8.2.

TABLA 8.2 Convenciones de signos para los espejos esféricos

| | |
|--|--------------------------|
| <i>Distancia focal (f)</i> | |
| Espejo cóncavo (convergente) | f (o R) es positiva |
| Espejo convexo (divergente) | f (o R) es negativa |
| <i>Distancia al objeto (d_o)</i> | |
| El objeto está frente al espejo (objeto real) | d_o es positiva |
| El objeto está atrás del espejo (objeto virtual)* | d_o es negativa |
| <i>Distancia a la imagen (d_i) y tipo de imagen</i> | |
| La imagen se forma frente al espejo (imagen real) | d_i es positiva |
| La imagen se forma atrás del espejo (imagen virtual) | d_i es negativa |
| <i>Orientación de la imagen (M)</i> | |
| La imagen está derecha en relación con el objeto | M es positiva |
| La imagen está invertida en relación con el objeto | M es negativa |

*En una combinación de dos (o más) espejos, la imagen que forma el primero es el objeto del segundo (y así sucesivamente). Si esta imagen-objeto está atrás del segundo espejo, se llama objeto *virtual*, y la distancia al objeto se considera negativa. Este concepto es más importante para las combinaciones de lentes, como se verá en la sección 8.3, y sólo se menciona aquí para completar el tema.

Por ejemplo, para un objeto real, una d_i positiva indica una imagen real, mientras que una d_i negativa corresponde a una imagen virtual.

El **factor de amplificación lateral** M , definido en la ecuación 8.1, también se puede calcular de forma analítica para un espejo esférico. De nuevo, por consideraciones geométricas, se expresa en función de las distancias a la imagen y al objeto:

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad \text{factor de aumento} \quad (8.4)$$

Se agrega el signo menos por convención, para indicar la orientación de la imagen: un valor positivo de M indica que se trata de una imagen derecha, mientras que una M negativa implica una imagen invertida. Además, si $|M| > 1$, la imagen es aumentada, o mayor que el objeto. Si $|M| < 1$, la imagen es reducida, o menor que el objeto. Note que para los espejos, la amplificación lateral M , llamada también *factor de aumento* o simplemente *aumento*, se expresa convenientemente en función de la distancia a la imagen d_i y la distancia al objeto d_o , y no en función de las alturas de la imagen y del objeto que se usaron en la ecuación 8.1. (Más adelante se presenta una descripción del origen de las ecuaciones 8.3 y 8.4, como tema opcional.)

En el ejemplo 8.3 y en el Ejemplo integrado 8.4 se indica cómo se usan esas ecuaciones y convenciones de signos con los espejos esféricos. En general, este método consiste en determinar la imagen de un objeto; se le preguntará dónde se forma la imagen (d_i) y cuáles son las características de la imagen (M). Esas características indican si la imagen es real o virtual, derecha o invertida, y mayor o menor (aumentada o reducida) que el objeto.

***Deducción de la ecuación del espejo esférico (opcional)** Seguramente usted se preguntará de dónde vienen las ecuaciones 8.3 y 8.4. La ecuación del espejo esférico se deduce con un poco de geometría. Véase el diagrama de rayos de la figura 8.8. Se indican las distancias al objeto y a la imagen (d_o y d_i) y las alturas del objeto y la imagen (h_o y h_i). Note que estas longitudes constituyen las bases y las alturas de triángulos formados por el rayo reflejado en el vértice (V). Esos triángulos ($O'VO$ e $I'VI$) son semejantes, porque según la ley de la reflexión, sus ángulos en V son iguales. Por consiguiente, se escribe

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad (1)$$

Esta ecuación es la ecuación 8.4, de la definición de la ecuación 8.1. El signo negativo que se agregó aquí indica que la imagen es invertida, por lo que h_i es negativa.

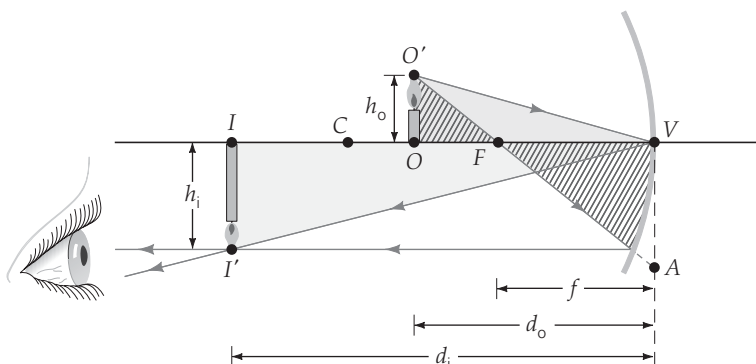
El rayo focal que pasa por F también forma triángulos semejantes, el $O'FO$ y el VEA , suponiendo, aproximadamente, que el espejo es pequeño en comparación con su radio. (¿Por qué son semejantes esos triángulos?) Las bases de esos triángulos son $VF = f$ y $OF = d_o - f$. Entonces, si $VA = h_i$,

$$\frac{h_i}{h_o} = -\frac{VF}{OF} = -\frac{f}{d_o - f} \quad (2)$$

De nuevo, el signo negativo agregado aquí indica que la imagen es invertida, por lo que h_i es negativa.

Igualando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene

$$\frac{d_i}{d_o} = \frac{f}{d_o - f} \quad (3)$$



Nota: un recurso que le ayudará a recordar que el aumento es d_i sobre d_o es que la relación guarda orden alfabético (“i” antes que la “o”).

Nota: $|M|$ es el valor absoluto de M : es su magnitud sin tener en cuenta su signo. Por ejemplo, $|+2| = |-2| = 2$.

◀ **FIGURA 8.8** Ecuación del espejo esférico Los rayos definen la geometría de triángulos semejantes, para la deducción de la ecuación del espejo esférico.

La manipulación algebraica da

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

que es la ecuación del espejo esférico (ecuación 23.3).

Ejemplo 8.3 ■ ¿Qué clase de imagen? Características de un espejo cóncavo

Un espejo cóncavo tiene 30 cm de radio de curvatura. Si un objeto se coloca a *a*) 45 cm, *b*) 20 cm y *c*) 10 cm del espejo, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características? (Especifique si la imagen es real o virtual, derecha o invertida y aumentada o reducida.)

Razonamiento. En este caso el dato es *R*, de donde se puede calcular $f = R/2$. También se dan tres distancias distintas al objeto, que se pueden sustituir en las ecuaciones 8.3 y 8.4 para calcular la ubicación y determinar las características de la imagen.

Solución.

Dado: $R = 30$ cm, entonces $f = R/2 = 15$ cm
Encuentre: d_i , *M* y determine las características de la imagen para las distancias dadas al objeto
a) $d_o = 45$ cm
b) $d_o = 20$ cm
c) $d_o = 10$ cm

Observe que los datos de distancia al objeto corresponden a las regiones que se ven en la figura 8.7a. No hay necesidad de convertirlas a metros, siempre y cuando todas las distancias se manejen con la misma unidad (centímetros, en este caso). Es recomendable trazar los diagramas de rayos respectivos de cada uno de esos casos para determinar las características de cada imagen.

a) En este caso, la distancia al objeto es mayor que el radio de curvatura ($d_o > R$) y

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \text{o} \quad \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15 \text{ cm}} - \frac{1}{45 \text{ cm}} = \frac{2}{45 \text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = \frac{45 \text{ cm}}{2} = +22.5 \text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{22.5 \text{ cm}}{45 \text{ cm}} = -\frac{1}{2}$$

Por lo anterior, la imagen es real (d_i es positiva), invertida (*M* es negativo) y tiene la mitad del tamaño que el objeto ($|M| = \frac{1}{2}$).

b) Aquí, $R > d_o > f$ y el objeto está entre el foco y el centro de curvatura:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{15 \text{ cm}} - \frac{1}{20 \text{ cm}} = \frac{1}{60 \text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = +60 \text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{60 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = -3.0$$

En este caso, la imagen es real (d_i es positiva), invertida (*M* es negativo) y tiene un tamaño triple en relación con el del objeto ($|M| = 3$).

c) Para este caso, $d_o < f$ y el objeto está más cerca del espejo que el foco.

Se usa la forma alternativa de la ecuación 23.3:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} = \frac{(10 \text{ cm})(15 \text{ cm})}{10 \text{ cm} - 15 \text{ cm}} = -30 \text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-30 \text{ cm})}{10 \text{ cm}} = +3.0$$

En este caso, la imagen es virtual (d_i es negativa), derecha (*M* es positivo) y tiene un tamaño triple en relación con el del objeto ($|M| = 3$).

Se puede ver, en el denominador de la ecuación de d_i , que d_i siempre será negativa cuando d_o sea menor que *f*. En consecuencia, siempre se forma imagen virtual de un objeto que está entre el foco y un espejo convergente.

Ejercicio de refuerzo. Para el espejo convergente de este ejemplo, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características si el objeto está a 30 cm del espejo, es decir, si $d_o = R$?

Sugerencia para resolver problemas

Al aplicar las ecuaciones del espejo esférico para determinar las características de la imagen, es útil hacer primero un esquema rápido (aproximado, no necesariamente a escala) del diagrama de rayos para el caso que se examina. Ese esquema indicará las características de la imagen y ayudará a evitar errores cuando se apliquen las convenciones de signos. *El diagrama de rayos y la solución matemática deben concordar.*

Ejemplo integrado 8.4 ■ Semejanzas y diferencias: comportamiento de un espejo convexo

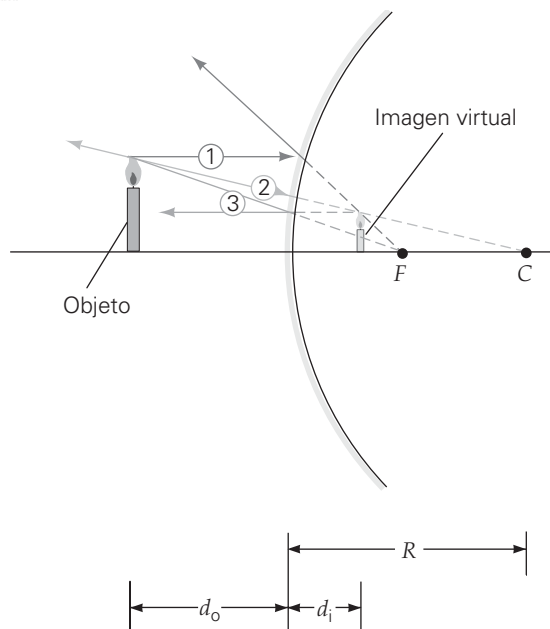
Un objeto (en este caso una vela) está a 20 cm frente a un espejo divergente cuya distancia focal es de -15 cm (véase las convenciones de signos en la tabla 8.2). *a)* Con un diagrama de rayos, determine si la imagen que se forma es 1) real, derecha y aumentada, 2) virtual, derecha y aumentada, 3) real, derecha y reducida, 4) virtual, derecha y reducida, 5) real, invertida y aumentada o 6) virtual, invertida y reducida. *b)* Determine la ubicación y las características de la imagen aplicando las ecuaciones del espejo.

a) Razonamiento conceptual. Como se conocen la distancia al objeto y la distancia focal del espejo convexo, se traza un diagrama de rayos para determinar las características de la imagen. Lo primero que se necesita es elegir una escala para el diagrama de rayos. En este ejemplo se podría usar la escala de 1 cm (en el dibujo) para representar a 10 cm en la realidad. De esta forma, el objeto estaría a 2.0 cm frente al espejo en el dibujo. Se trazan el eje óptico, el espejo, el objeto (una vela encendida) y el foco (F). Como este espejo es convexo, el foco (F) y el centro de curvatura (C) están detrás del espejo. De acuerdo con la ecuación 8.2, $R = 2f = 2(-15 \text{ cm}) = -30$ cm. Entonces, C se traza al doble de la distancia de F con respecto al vértice.

Sólo son necesarios dos de los tres rayos para ubicar la imagen (▼figura 8.9). El rayo paralelo 1 comienza en la punta de la llama, va paralelo al eje óptico y después diverge del espejo, después de la reflexión, como si viniera de F . El rayo radial 2 comienza en la punta de la llama, parece pasar por C y a continuación se refleja directo hacia atrás, pero parece provenir de C . Se ve con claridad que esos dos rayos, después de reflejarse, divergen entre sí, y no hay posibilidad de que se crucen. Sin embargo, ambos parecen salir de un punto común detrás del espejo: el punto de la imagen de la punta de la llama. También se traza el rayo focal 3, para comprobar que los tres parecen emanar del mismo punto de la imagen.

Así, la imagen es virtual, ya que los rayos reflejados en realidad no vienen de un punto tras el espejo; es derecha y es menor que el objeto. Por lo tanto, la respuesta correcta es la 4 (virtual, derecha y reducida). Si se mide en el diagrama (teniendo en cuenta la escala que se está usando), se encuentra que $d_i \approx -9.0$ cm, y que el aumento es

$$M = \frac{h_i}{h_o} \approx \frac{0.5 \text{ cm}}{1.2 \text{ cm}} = +0.4.$$



(continúa en la siguiente página)

◀ FIGURA 8.9 Espejo divergente
Diagrama de rayos de un espejo divergente. Véase el Ejemplo integrado 8.4.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Los datos son la distancia al objeto y la distancia focal. La posición y las características de la imagen se determinan con las ecuaciones del espejo.

Dado: $d_o = 20 \text{ cm}$
 $f = -15 \text{ cm}$

Encuentre: d_i, M y las características de la imagen

Note que la distancia focal es negativa en un espejo convexo (véase la tabla 8.2). Con la ecuación 8.3, se tiene

$$\frac{1}{20 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-15 \text{ cm}}$$

de manera que

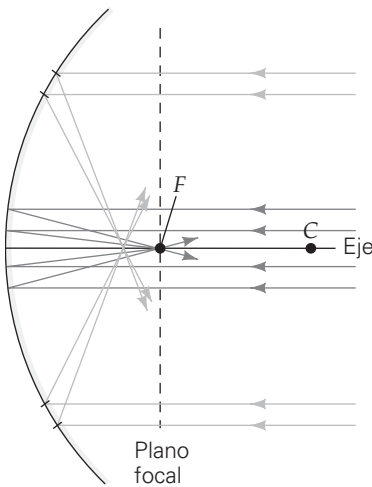
$$d_i = -\frac{60 \text{ cm}}{7} = -8.6 \text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-8.6 \text{ cm})}{20 \text{ cm}} = +0.43$$

Así, la imagen es virtual (d_i es negativa), derecha (M es positivo) y su tamaño (altura) es 0.43 veces el del objeto. Como f es negativa, la imagen de un objeto real siempre es virtual si el espejo es divergente (o convexo). (¿Podría probar esto utilizando ya sea un diagrama de rayos o la ecuación del espejo?)

Ejercicio de refuerzo. Como se hizo notar, un espejo divergente siempre forma una imagen virtual de un objeto real. ¿Qué hay de las demás características de la imagen: su orientación y su aumento? ¿Es posible establecer conclusiones generales acerca de ellas?



▲ FIGURA 8.10 Aberración esférica de un espejo De acuerdo con la aproximación para ángulos pequeños, los rayos paralelos al eje del espejo, y cercanos a él, convergen en el foco. Sin embargo, cuando los rayos paralelos no están cerca del eje, se reflejan y convergen frente al foco. Este efecto se llama *aberración esférica* y produce imágenes borrosas.

Aberraciones en los espejos esféricos

Desde el punto de vista técnico, las descripciones que se han dado de las características de la imagen en los espejos esféricos sólo son ciertas para objetos que estén cerca del eje óptico, esto es, sólo para ángulos pequeños de incidencia y de reflexión. Si no se cumplen estas condiciones, las imágenes serán borrosas, es decir, estarán desenfocadas (o fuera de foco), o distorsionadas, porque no todos los rayos van a converger en el mismo plano. Como se observa en la figura 8.10, los rayos paralelos incidentes lejos del eje óptico no convergen en el foco. Cuanto más lejano está el rayo incidente del eje, más lejos del foco estará el rayo reflejado. Este efecto se conoce como **aberración esférica**.

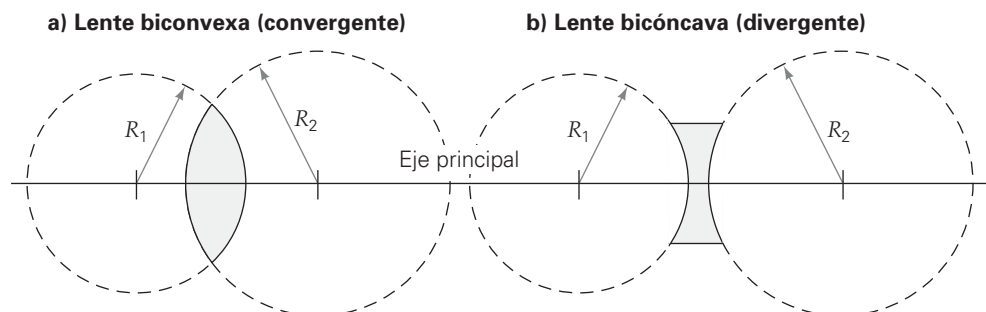
La aberración esférica no sucede en un espejo parabólico. (Como indica su nombre, el *espejo parabólico* tiene la forma de una parábola.) *Todos* los rayos incidentes paralelos al eje óptico de ese espejo tienen un foco común. Por esta razón se usan espejos parabólicos en la mayoría de los telescopios astronómicos, como se verá en el capítulo 9. Sin embargo, es más difícil fabricar esos espejos que los esféricos, por lo que son más costosos.

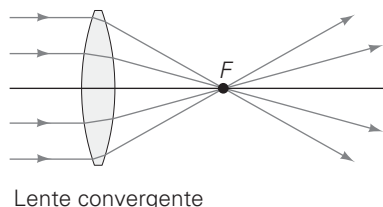
8.3 Lentes

OBJETIVOS: a) Diferenciar entre lentes convergentes y divergentes, b) describir las imágenes que producen y sus características y c) determinar las ubicaciones y las características de las imágenes mediante diagramas de rayos y ecuaciones para lentes delgadas.

La palabra *lente* proviene de la palabra latina *lentil*, que significa lenteja; la forma de esta leguminosa es similar a la de una lente común. Una lente óptica se fabrica con un material transparente (el más común es el vidrio, aunque a veces se utiliza plástico o cristal). Una o ambas superficies tienen contorno esférico. Las lentes esféricas *biconvexas* (con ambas superficies convexas) y las *bicóncavas* (ambas superficies cóncavas) se ven en la figura 8.11. Las lentes forman imágenes al refractar la luz que pasa por ellas.

► FIGURA 8.11 Lentes esféricas Las lentes esféricas tienen sus superficies definidas por dos esferas; las superficies pueden ser convexas o cóncavas. Lentes a) biconvexas y b) bicóncavas. Si $R_1 = R_2$, una lente tiene simetría esférica.





Lente convergente

a) Lente biconvexa (convergente)



b)

Una lente biconvexa es una **lente convergente**: los rayos de luz incidentes paralelos al eje de la lente convergen en un foco (F) en el lado opuesto de la lente (▲ figura 8.12a). Este hecho constituye una forma de determinar experimentalmente la distancia focal de una lente convergente. Quizá usted haya enfocado los rayos del Sol con una lupa (una lente biconvexa o convergente) y habrá atestiguado la concentración de la energía radiante que se obtiene (figura 8.12b).

Por otra parte, una lente bicóncava es una **lente divergente**: los rayos de luz incidentes y paralelos salen de ésta como si emanaran de un foco que estuviera en el lado de incidencia de la lente (► figura 8.13).

Hay varios tipos de lentes convergentes y divergentes (► figura 8.14). Las lentes menisco son las que más se usan en los anteojos. En general, una lente convergente es más gruesa en su centro que en su periferia, y una divergente es más delgada en su centro que en su periferia. Esta explicación se limitará a las lentes biconvexas y bicóncavas, de simetría esférica, en las que ambas superficies tienen el mismo radio de curvatura.

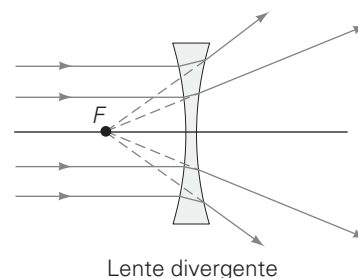
Cuando la luz pasa por el interior de una lente, se refracta y se desplaza en sentido lateral (ejemplo 7.4, figura 7.11). Si una lente es gruesa, este desplazamiento podría ser bastante considerable, lo que complicaría el análisis de las características de la lente. Este problema no se presenta con lentes delgadas, para las que el desplazamiento refringente (es decir, causado por la refracción) de la luz transmitida es insignificante. Nuestra descripción se limitará a las lentes delgadas. Una lente delgada es aquella cuyo grosor se supone insignificante en comparación con la distancia focal.

Al igual que un espejo esférico, una lente de caras esféricas tiene, *para cada superficie*, un centro de curvatura (C), un radio de curvatura (R), un foco (F) y una distancia focal (f). Los focos están a distancias iguales a ambos lados de una lente delgada. Sin embargo, para una lente esférica, la distancia focal *no* está relacionada simplemente con R mediante $f = R/2$, como sucede con los espejos esféricos. Como la distancia focal también depende del índice de refracción de la lente, por lo general sólo se especifica la distancia focal y no su radio de curvatura. Esto se analizará en el apartado 8.4.

Las reglas generales para trazar diagramas de rayos con lentes son similares a las que se utilizan para los espejos esféricos, pero se necesitan algunas modificaciones, porque la luz pasa a través de la lente. Las caras opuestas de una lente, en general, se distinguen con los nombres de *lado del objeto* y *lado de la imagen*. El lado del objeto es la cara frente a la cual está el objeto, y el lado de la imagen es el lado *contrario* de la lente (donde se formaría una imagen real). Los tres rayos de un punto de un objeto se trazan como sigue (véase la sección Aprender dibujando para el ejemplo 8.5 en la p. 225):

1. Un **rayo paralelo** es, como su nombre lo indica, paralelo al eje óptico de la lente en la incidencia *y*, después de la refracción, *a*) pasa por el foco del lado de la imagen en una lente convergente, *o bien*, *b*) parece emanar del foco en el lado del objeto de una lente divergente.

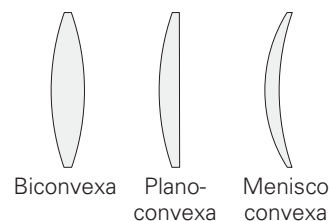
◀ **FIGURA 8.12 Lentes convergentes** *a*) En una lente biconvexa delgada, los rayos paralelos al eje convergen en el foco F . *b*) Una lente de aumento (lente convergente) puede enfocar los rayos de Sol en un punto, y los resultados son incendiarios. ¡Nunca intente esto en el hogar!



Lente divergente

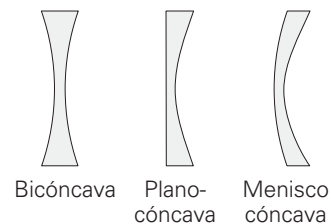
Lente bicóncava (divergente)

▲ **FIGURA 8.13 Lente divergente**
Los rayos paralelos al eje de una lente bicóncava o divergente parecen emanar de un foco en el lado de incidencia de la lente.



Biconvexa Planoconvexa Meniscoconvexa

Lentes convergentes



Bicóncava Planocóncava Meniscocóncava

Lentes divergentes

▲ **FIGURA 8.14 Formas de lentes**
Las formas de las lentes varían mucho, y normalmente se clasifican como convergentes y divergentes. En general, una lente convergente es más gruesa en su centro que en la periferia, mientras que una lente divergente es más delgada en el centro que en la periferia.

2. Un **rayo central** o **principal** es el que pasa por el centro de la lente, y no se desvía porque ésta es “delgada”.
3. Un **rayo focal** es el que *a)* pasa por el foco del lado del objeto en una lente convergente, *o bien, b)* parece pasar a través del foco en el lado de la imagen de una lente divergente y, después de la refracción, es paralelo al eje óptico de la lente.

Como en el caso de los espejos esféricos, sólo se necesitan dos rayos para determinar la imagen; aquí se usarán el paralelo y el central. (También, como en el caso de los espejos, se aconseja incluir el tercer rayo, el rayo focal, como comprobación en los diagramas.)

Ejemplo 8.5 ■ Aprender dibujando: diagrama de rayos para lentes

Un objeto se coloca a 30 cm frente a una lente biconvexa delgada de 20 cm de distancia focal. *a)* Utilice un diagrama de rayos para ubicar la imagen. *b)* Describa las características de la imagen.

Razonamiento. Recuerde los pasos que se siguieron en el diagrama de rayos anterior.

Solución.

Dado: $d_o = 30$ cm
 $f = 20$ cm

Encuentre: *a)* la ubicación de la imagen
(con un diagrama de rayos)
b) las características de la imagen

a) Como se pide hacer un diagrama de rayos (véase la sección Aprender dibujando, que acompaña a este ejemplo) para ubicar la imagen, lo primero que hay que hacer es definir una escala para el dibujo. En este ejemplo se utiliza una escala de 1 cm en el dibujo para representar 10 cm en la realidad. De esa forma, el objeto estaría a 3.00 cm frente a la lente en nuestro dibujo.

Primero se trazarán el eje óptico, la lente, el objeto (una vela encendida) y los focos (F). Se traza una línea vertical punteada en el centro de la lente porque, para simplificar, la refracción de los rayos se ilustra como si sucediera en el centro de cada lente. En realidad, sucede en las superficies aire-vidrio y vidrio-aire de cada lente.

Se siguen los pasos 1 a 4 de la sección Aprender dibujando:

1. El primer rayo que se traza es el paralelo (① en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo horizontal (paralelo al eje óptico). Después de pasar por la lente, pasa por el foco F en el lado de la imagen.
2. A continuación se traza el rayo central (② en la figura). Desde la punta de la llama se traza un rayo que pase por el centro de la lente. Ese rayo pasará sin desviarse por la lente delgada en el lado de la imagen.
3. Se observa con claridad que estos dos rayos se cruzan en el lado de la imagen. El punto de intersección es el punto de la imagen de la punta de la llama. A partir de ahí, se traza el resto de la imagen avanzando hacia el eje óptico.
4. Sólo se necesitan dos rayos para ubicar la imagen. Sin embargo, si se quiere trazar el tercer rayo, en este caso el rayo focal (③ en la figura), éste debe pasar por el mismo punto de la imagen en el que se intersecan los otros dos rayos (si el diagrama se traza con cuidado). El rayo de la punta de la llama, que pasa por el foco F en el lado del objeto, saldrá paralelo al eje óptico en el lado de la imagen.

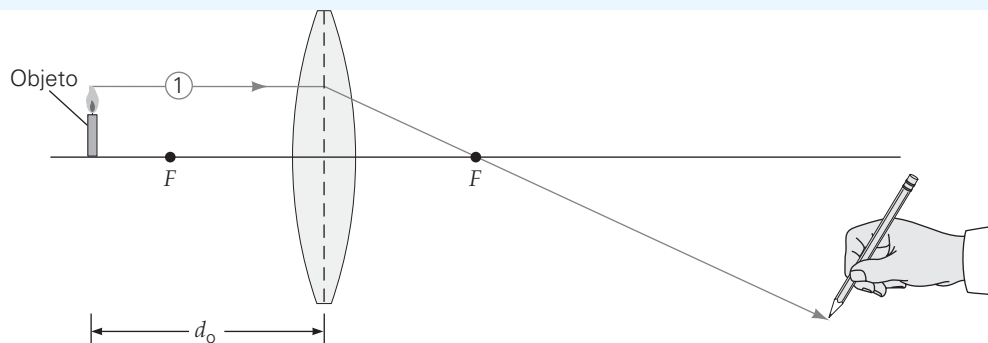
b) De acuerdo con el diagrama de rayos que se trazó en el inciso *a* se observa con claridad que la imagen es real (porque los rayos se cruzan en el lado de la imagen). En consecuencia, se podría captar la imagen real en una pantalla (por ejemplo, en un trozo de papel) colocada a la distancia d_i de la lente convergente. Además, la imagen es invertida (la imagen de la vela apunta hacia abajo) y es mayor que el objeto.

En este caso, $d_o = 30$ cm y $f = 20$ cm, por lo que $2f > d_o > f$. Si se usan los diagramas de rayos correspondientes, se podrá demostrar que para d_o entre estos límites, la imagen siempre es real, aumentada e invertida. Por cierto, el proyector de filmas del salón de clase usa este arreglo en particular.

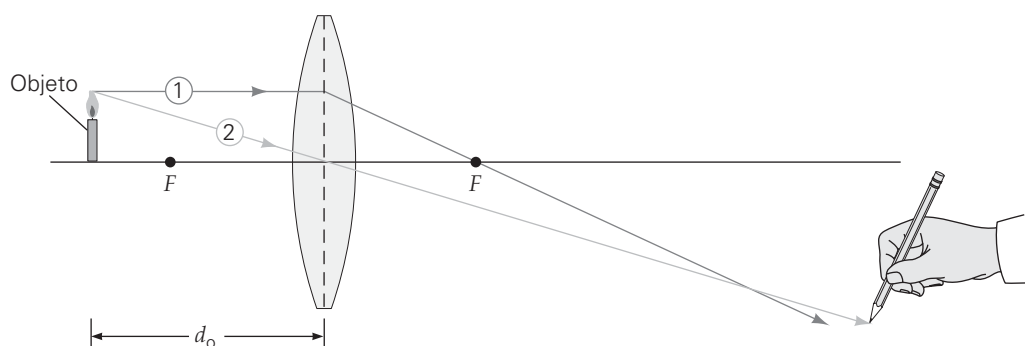
Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, ¿cómo se vería la imagen si el objeto estuviera a 10 cm frente a la lente? Ubique la imagen de forma gráfica y describa sus características.

DIAGRAMA DE RAYOS PARA LENTES (VÉASE EL EJEMPLO 8.5)

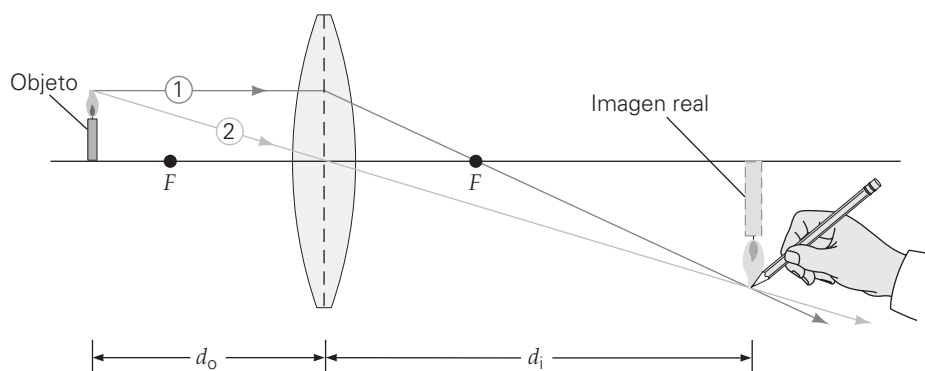
1
Rayo paralelo



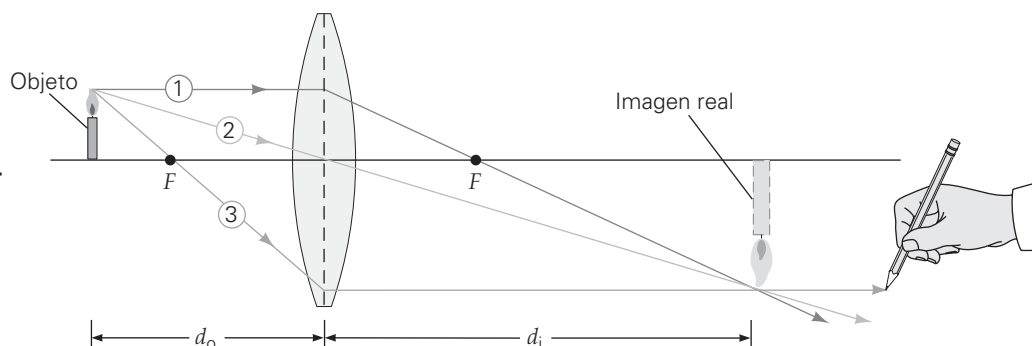
2
Rayo central

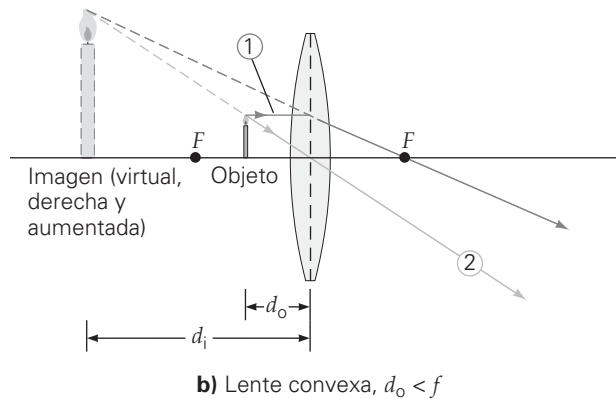
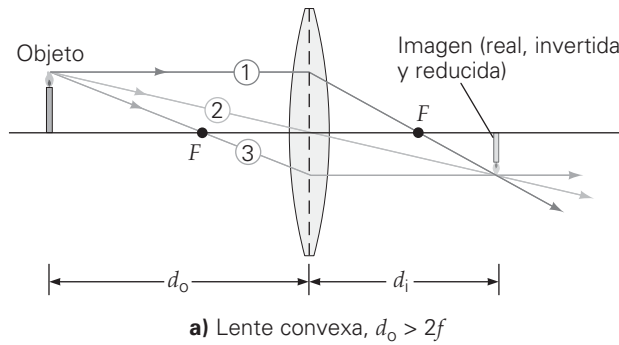


3
Ubicación de la imagen



4
También se traza el rayo focal para verificar





▲ **FIGURA 8.15 Diagramas de rayos para lentes** a) Una lente convergente biconvexa forma un objeto real cuando $d_o > 2f$. La imagen es real, invertida y reducida. b) Diagrama de rayos para una lente divergente con $d_o < f$. La imagen es virtual, derecha y aumentada. Se muestran los ejemplos prácticos de ambos casos. (Véase el pliego a color al final del libro.)

La ▲ figura 8.15 muestra otros diagramas de rayos, con distintas distancias al objeto, para una lente convergente; también se ven sus aplicaciones en la vida real. La imagen de un objeto es real cuando se forma o se proyecta en el lado *opuesto* de la lente al que está el objeto (véase la figura 8.15a) y es virtual cuando se forma del mismo lado de la lente en el que está el objeto (véase la figura 8.15b).

Se podrían definir regiones de distancia del objeto para una lente convergente de forma semejante a como se hizo con un espejo convergente en la figura 8.7a. En este caso, una distancia al objeto $d_o = 2f$ para una lente convergente tiene importancia similar a la de $d_o = R = 2f$ para un espejo convergente (▼ figura 8.16).

El diagrama de rayos para una lente divergente se describirá dentro de poco. Al igual que los espejos divergentes, las lentes divergentes sólo pueden formar imágenes virtuales.

► **FIGURA 8.16 Lente convergente**

Para una lente convexa o convergente, el objeto se puede ubicar en una de las tres regiones definidas por el foco (F) y el doble de la distancia focal ($2f$), o en uno de esos dos puntos. Cuando $d_o > 2f$, la imagen es real, invertida y reducida (figura 8.15a). Cuando $2f > d_o > f$, la imagen también es real e invertida, pero aumentada, como se ve en los diagramas de rayos del ejemplo 8.5. Cuando $d_o < f$, la imagen es virtual, derecha y aumentada (figura 8.15b).

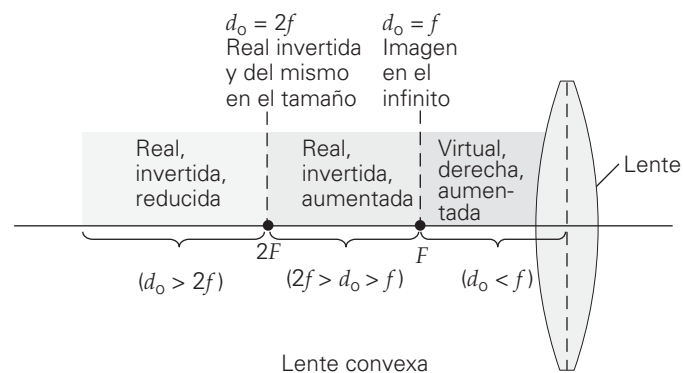


TABLA 8.3 Convención de signos para lentes delgadas

| | |
|--|-------------------|
| <i>Distancia focal (f)</i> | |
| Lentes convergentes (también llamadas lentes <i>positivas</i>) | f es positiva |
| Lentes divergentes (también llamadas lentes <i>negativas</i>) | f es negativa |
| <i>Distancia al objeto (d_o)</i> | |
| El objeto está frente a la lente (objeto real) | d_o es positiva |
| El objeto está atrás de la lente (objeto virtual)* | d_o es negativa |
| <i>Distancia a la imagen (d_i) y tipo de imagen</i> | |
| La imagen se forma en el lado de la imagen de la lente: el lado opuesto al del objeto (imagen real) | d_i es positiva |
| La imagen se forma en el lado del objeto de la lente el mismo lado donde está el objeto (imagen virtual) | d_i es negativa |
| <i>Orientación de la imagen (M)</i> | |
| La imagen está derecha con respecto al objeto | M es positivo |
| La imagen está invertida con respecto al objeto | M es negativo |

*En una combinación de dos (o más) lentes, la imagen que forma la primera lente se considera como el objeto de la segunda lente (y así sucesivamente). Si esta imagen-objeto está atrás de la segunda lente, se llama objeto virtual, y se considera que la distancia al objeto es negativa (-).

Las distancias a la imagen y las características de una lente también se pueden determinar de forma analítica. Las ecuaciones para lentes delgadas son idénticas a las de los espejos esféricos. La **ecuación de lentes delgadas** es

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \text{ecuación de lentes delgadas} \quad (8.5)$$

Al igual que en el caso de los espejos esféricos, existe una forma alternativa a la ecuación de lentes delgadas

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \quad (8.5a)$$

que es una forma fácil y rápida de encontrar d_i .

El **factor de amplificación**, al igual que en el caso de los espejos esféricos, se determina mediante

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad (8.6)$$

Las convenciones de signos para estas ecuaciones de lentes delgadas se presentan en la tabla 8.3.

Igual que cuando se trabaja con espejos, resulta útil trazar un diagrama de rayos antes de resolver un problema de lentes de forma analítica.

Ejemplo 8.6 ■ Tres imágenes: comportamiento de una lente convergente

Una lente biconvexa tiene 12 cm de distancia focal. Para un objeto que esté a a) 60 cm, b) 15 cm y c) 8.0 cm de la lente, ¿dónde se forma la imagen y cuáles son sus características?

Razonamiento. Con la distancia focal (f) y las distancias al objeto (d_o) se aplica la ecuación 8.5 para determinar las distancias a la imagen (d_i), y la ecuación 8.6 para definir las características de esta última. Se trazan los rayos para todos esos casos, con el fin de tener una idea de las características de la imagen. Los diagramas deberían concordar con los cálculos.

Solución.

Dado: $f = 12$ cm
 a) $d_o = 60$ cm
 b) $d_o = 15$ cm
 c) $d_o = 8.0$ cm

Encuentre: d_i y las características de la imagen para los tres casos

(continúa en la siguiente página)

a) La distancia al objeto es mayor que el doble de la distancia focal ($d_o > 2f$). Con la ecuación 8.5,

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

o

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{12 \text{ cm}} - \frac{1}{60 \text{ cm}} = \frac{5}{60 \text{ cm}} - \frac{1}{60 \text{ cm}} = \frac{4}{60 \text{ cm}} = \frac{1}{15 \text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = 15 \text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{15 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} = -0.25$$

La imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y de la cuarta parte del tamaño del objeto ($|M| = 0.25$). Este arreglo se usa en las cámaras, cuando la distancia al objeto es mayor que $2f$ ($d_o > 2f$).

b) Aquí, $2f > d_o > f$. Se aplica la ecuación 8.5,

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{12 \text{ cm}} - \frac{1}{15 \text{ cm}} = \frac{5}{60 \text{ cm}} - \frac{4}{60 \text{ cm}} = \frac{1}{60 \text{ cm}}$$

Entonces

$$d_i = 60 \text{ cm} \quad \text{y} \quad M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{60 \text{ cm}}{15 \text{ cm}} = -4.0$$

La imagen es real (d_i es positiva), invertida (M es negativo) y tiene cuatro veces el tamaño del objeto ($|M| = 4.0$). Éste es el caso del proyector de películas y del proyector de diapositivas ($2f > d_o > f$).

c) Para este caso, $d_o < f$. Se usa la forma alternativa (ecuación 23.5a),

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} = \frac{(8.0 \text{ cm})(12 \text{ cm})}{8.0 \text{ cm} - 12 \text{ cm}} = -24 \text{ cm}$$

Entonces

$$M = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{(-24 \text{ cm})}{8.0 \text{ cm}} = +3.0$$

La imagen es virtual (d_i es negativa), es derecha (M es positivo) y tiene tres veces el tamaño del objeto ($|M| = 3.0$). Es el caso de un microscopio simple y el de una lupa ($d_o < f$).

Como podrá darse cuenta, las lentes convergentes son versátiles. Dependiendo de la distancia al objeto (relativa a la longitud focal), la lente puede utilizarse como una cámara, un proyector o una lente de aumento.

Ejercicio de refuerzo. Si la distancia de una lente convexa a un objeto se hace variar, ¿a qué distancia deja la imagen real de reducirse para comenzar a aumentar?

Ejemplo conceptual 8.7 ■ ¿Media imagen?

Una lente convergente forma una imagen en una pantalla, como se ilustra en la ►figura 8.17a. Después, se cubre la mitad inferior de la lente, como se ve en la figura 8.17b. El resultado será que a) sólo la mitad superior de la imagen original se verá en la pantalla; b) sólo la mitad inferior de la imagen original se verá en la pantalla o c) se verá la imagen completa.

Razonamiento y respuesta. En principio, tal vez usted imagine que al cubrir la mitad de la lente se elimina la mitad de la imagen. Sin embargo, los rayos de *cada* punto del objeto pasan por *todas las partes* de la lente. Por consiguiente, la mitad superior de la lente puede formar una imagen total (al igual que la mitad inferior), de manera que la respuesta correcta es c.

Esta conclusión se confirma trazando un rayo central en la figura 8.17b. Usted también podría aplicar el método científico y realizar la prueba, sobre todo si usa anteojos. Cubra la mitad inferior de los anteojos, y verá que todavía puede leer a través de la parte superior (a menos que use bifocales).

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué propiedad de la imagen *podría* afectarse al bloquear la mitad de una lente? Explique por qué.

A FONDO 8.2 LENTES DE FRESNEL

Para enfocar luz de rayos paralelos, o para producir un gran haz de rayos paralelos, se necesita una lente convergente de gran tamaño. La gran masa de vidrio necesaria para formar esa lente es voluminosa y pesada. Además, una lente gruesa absorbe algo de la luz y es probable que genere distorsiones. El físico francés Augustin Fresnel (1788-1827) desarrolló una solución para este problema, que se aplica en las lentes de los faros. Fresnel se dio cuenta de que la refracción de la luz sucede en las superficies de las lentes. Por consiguiente, es posible hacer que una lente sea más delgada —y casi plana— si se elimina vidrio del interior hasta el punto de que no se alteren las propiedades refringentes de las superficies.

Esto se logra cortando una serie de surcos concéntricos en la superficie de la lente (figura 1a). Observe que la superficie de cada segmento curvo que queda es casi paralela a la superficie correspondiente de la lente original. Juntos, los segmentos concéntricos

refractan la luz de la misma forma que la lente biconvexa original (figura 1b). De hecho, la lente sólo se ha adelgazado eliminando vidrio innecesario entre las superficies refringentes.

Una lente con esa serie de superficies curvas concéntricas se llama *lente de Fresnel*. Esta clase de lentes se usa mucho en los proyectores de películas y en los faros (figura 1c). Una lente de Fresnel es muy delgada y, por ende, mucho más ligera que una lente biconvexa convencional con las mismas propiedades ópticas. Además, las lentes de Fresnel se moldean con facilidad en plástico, con frecuencia con un lado plano (planoconvexas) para que se pueda fijar a una superficie de vidrio.

Una desventaja de las lentes de Fresnel es que se ven los círculos concéntricos, cuando el observador las usa y cuando se proyecta la imagen que producen en una pantalla, como sucede con un proyector de películas.

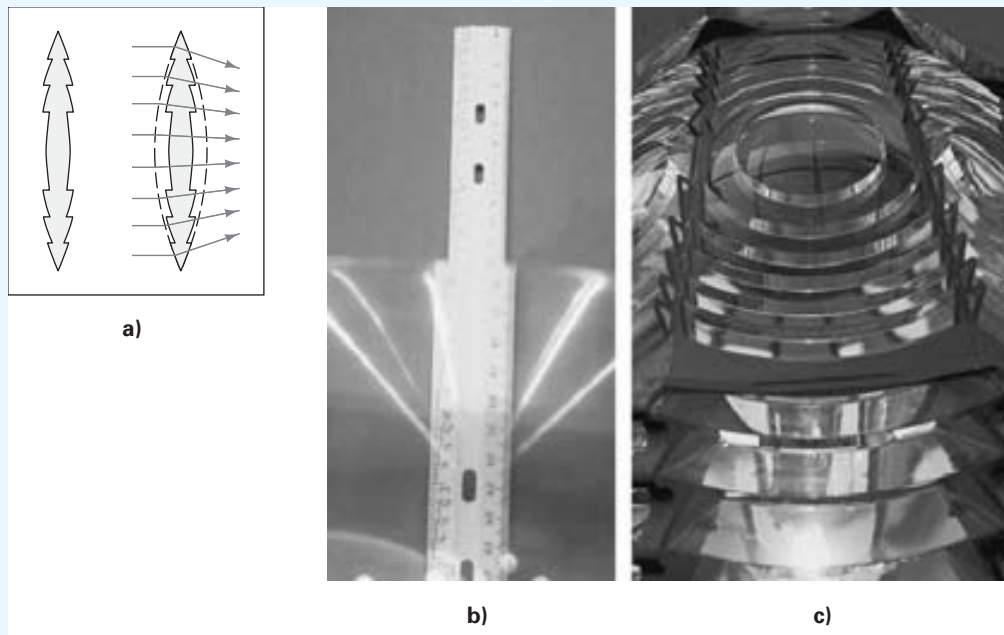


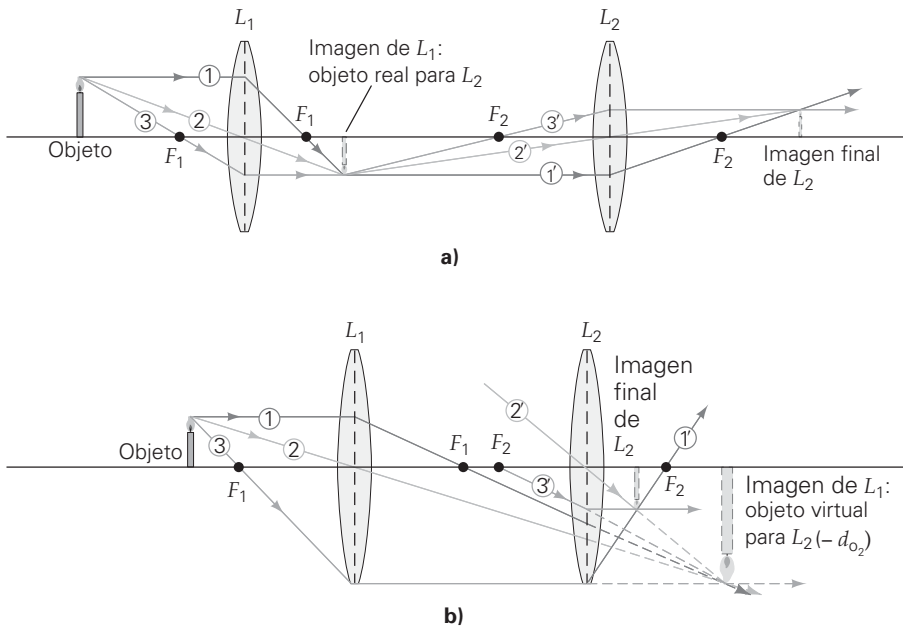
FIGURA 1 Lentes de Fresnel

a) El efecto concentrador de estas lentes se debe a la refracción en sus superficies. Por consiguiente, es posible reducir el espesor de una lente cortando ranuras concéntricas en un vidrio, para formar un conjunto de superficies curvas con las mismas propiedades refringentes que las de la lente de la que se derivan. **b)** Una lente de Fresnel plana, con superficies curvas concéntricas, amplifica como si fuera una lente convergente biconvexa. **c)** Una serie de lentes de Fresnel produce haces luminosos enfocados en este faro del puerto de Boston. (De hecho, las lentes de Fresnel se desarrollaron para usarse en los faros.) (Véase el pliego a color al final del libro.)

Combinaciones de lentes

Muchos instrumentos ópticos, como los microscopios y los telescopios (capítulo 10) usan una combinación de lentes, es decir, son un sistema compuesto de lentes. Cuando en una combinación se usan dos o más lentes, es factible determinar la imagen general que se produce, examinando las lentes de forma individual. Esto es, la imagen que forma la primera lente se vuelve el objeto para la segunda, y así sucesivamente. Por este motivo presentaremos aquí los principios de combinación de lentes, antes de explicar los detalles de sus aplicaciones en la vida real.

Si la primera lente produce una imagen frente a la segunda, esa imagen se considera como objeto real (d_o es positiva) para la segunda (►figura 8.19a). Sin embargo, si las lentes están lo suficientemente cerca de manera que la imagen de la primera *no* se forme antes que los rayos pasen por la segunda (figura 8.19b), se debe hacer una modificación a la convención de signos. En este caso, la imagen de la primera lente se considera como objeto *virtual* para la segunda, y su distancia al objeto se considera de signo *negativo* en la ecuación de la lente (tabla 8.3).



◀ **FIGURA 8.19** Combinaciones de lentes La imagen final que produce un sistema compuesto de lentes se determina considerando que la imagen de una lente es el objeto de la lente adyacente. **a)** Si la imagen de la primera lente (L_1) se forma frente a la segunda lente (L_2), se dice que el objeto es real para la segunda lente. (Note que los rayos 1', 2' y 3' son los rayos paralelo, central y focal, respectivamente, para L_2 . No son continuaciones de los rayos 1, 2, 3, que son los rayos paralelo, central y focal, respectivamente, para L_1 .) **b)** Si los rayos pasan por la segunda lente antes de formar la imagen, se dice que el objeto para la segunda lente es virtual, y la distancia a la segunda lente se toma como negativa.

El aumento total (M_{total}) de un sistema compuesto es el producto de los factores individuales de amplificación de las lentes que lo forman. Por ejemplo, para un sistema de dos lentes, como el de la figura 8.19,

$$M_{\text{total}} = M_1 M_2 \quad (8.7)$$

Los signos convencionales de M_1 y M_2 se tienen en cuenta en el producto para indicar, con el signo de M_{total} , si la imagen final es derecha o invertida. (Véase el ejercicio 83.)

Ejemplo 8.9 ■ Una oferta especial: una combinación de lentes y un objeto virtual

Se tienen dos lentes parecidos a los que se ven en la figura 8.19b. Supongamos que el objeto está a 20 cm frente a la lente L_1 , cuya distancia focal es de 15 cm. La lente L_2 , con distancia focal de 12 cm, está a 26 cm de L_1 . ¿Cuál es el lugar de la imagen final y cuáles son sus características?

Razonamiento. Se trata de una doble aplicación de la ecuación para lentes delgadas. Las lentes se examinan de forma sucesiva. La imagen de la lente L_1 se vuelve el objeto de la lente L_2 . Se deben identificar muy bien las cantidades e indicar de forma adecuada las distancias (¡con signos!).

Solución. Se tiene

Dado: $d_{o_1} = +20$ cm
 $f_1 = +15$ cm
 $f_2 = +12$ cm
 $D = 26$ cm (distancia entre las lentes)

Encuentre: d_{i_2} y las características de la imagen

El primer paso es aplicar la ecuación de las lentes delgadas (ecuación 8.5) y el factor de amplificación para lentes delgadas (ecuación 8.6) a L_1 :

$$\frac{1}{d_{i_1}} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{d_{o_1}} = \frac{1}{15 \text{ cm}} - \frac{1}{20 \text{ cm}} = \frac{4}{60 \text{ cm}} - \frac{3}{60 \text{ cm}} = \frac{1}{60 \text{ cm}}$$

o

$$d_{i_1} = 60 \text{ cm (imagen real } L_1)$$

y

$$M_1 = -\frac{d_{i_1}}{d_{o_1}} = -\frac{60 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = -3.0 \text{ (invertida y aumentada)}$$

La imagen de la lente L_1 viene a ser el objeto para la lente L_2 . Esta imagen se encontrará entonces a $d_{i_1} - D = 60 \text{ cm} - 26 \text{ cm} = 34 \text{ cm}$ a la derecha de L_2 , es decir, en el lado de la imagen. Por consiguiente, es un objeto *virtual* (véase la tabla 8.3), y $d_{o_2} = -34$ cm. (Recuerde que la d_o se toma como negativa para objetos virtuales.)

(continúa en la siguiente página)

A continuación se aplican las ecuaciones a la segunda lente, L_2 :

$$\frac{1}{d_{i_1}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{d_{o_1}} = \frac{1}{12 \text{ cm}} - \frac{1}{(-34 \text{ cm})} = \frac{23}{204 \text{ cm}}$$

o

$$d_{i_2} = 8.9 \text{ cm (imagen real)}$$

y

$$M_2 = -\frac{d_{i_1}}{d_{o_2}} = -\frac{8.9 \text{ cm}}{(-34 \text{ cm})} = 0.26 \text{ (derecha y reducida)}$$

(Nota: el objeto virtual para L_2 era invertido, por lo que el término *derecha* quiere decir que también la imagen *final* es invertida.) El aumento total M_{total} es entonces

$$M_{\text{total}} = M_1 M_2 = (-3.0)(0.26) = -0.78$$

El signo se incluye en los aumentos. Se determina entonces que la imagen final real está a 8.9 cm al lado derecho (el lado de la imagen) de L_2 , y que es invertida (signo negativo) con respecto al objeto inicial; además, es reducida.

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que el objeto en la figura 8.19b estuviera a 30 cm frente a L_1 . ¿Dónde se formaría la imagen en este caso, y cuáles serían sus características?

8.4 La ecuación del fabricante de lentes

OBJETIVOS: a) Describir la ecuación del fabricante de lentes, b) explicar cómo difiere de la ecuación de lentes delgadas y c) comprender la potencia de las lentes en dioptrías.

El análisis de las lentes delgadas biconvexas y bicóncavas que se ha hecho hasta ahora en este capítulo ha sido relativamente fácil. Sin embargo, hay una diversidad de formas de lentes, como se ilustra en la figura 8.14. Para éstas, el análisis se complica, pero es importante tomar en cuenta las distancias focales en las consideraciones ópticas, porque las lentes se tallan para fines y aplicaciones específicos.

La refracción de una lente depende de las formas de sus superficies y del índice de refracción de su material. Esas propiedades, en conjunto, determinan la distancia focal de una lente delgada. La distancia focal de una lente delgada se determina con la **ecuación del fabricante de lentes**, que expresa la distancia focal de una lente delgada *en el aire* ($n_{\text{aire}} = 1$), como sigue:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{para una lente delgada en el aire}) \quad (8.8)$$

donde n es el índice de refracción del material de la lente y R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las superficies primera (cara frontal) y segunda (cara posterior) de la lente, respectivamente. (La primera superficie es aquella a la que llega por primera vez la luz que emite un objeto.)

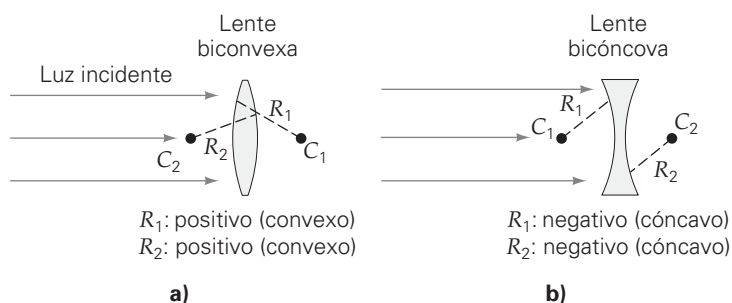
En la ecuación del fabricante de lentes se requiere tener una convención de signos (tabla 8.4). Los signos dependen sólo de la forma de la superficie, esto es, cóncava o convexa (►figura 8.20). Para la lente biconvexa de la figura 8.20a, tanto R_1 como R_2 son positivos (ambas superficies son convexas) y para la lente bicóncava de la figura 8.20b, tanto R_1 como R_2 son negativos (ambas superficies son cóncavas).

Si la lente está rodeada de otro medio que no sea aire, el primer término de la ecuación 8.8 se convierte en $(n/n_m) - 1$, donde n y n_m los índices de refracción del material de la lente y del medio que la rodea, respectivamente. Ahora se puede ver por qué algunas lentes convergentes en el aire se vuelven divergentes en el agua: si $n_m > n$, entonces f es negativa y la lente es divergente.

TABLA 8.4

Convenciones de signos en la ecuación del fabricante de lentes

| | |
|------------------------------|-----------------|
| Superficie convexa | R es positivo |
| Superficie cóncava | R es negativa |
| Superficie plana | $R = \infty$ |
| Lente convergente (positiva) | f es positivo |
| Lente divergente (negativa) | f es negativa |



◀ **FIGURA 8.20 Centros de curvatura** Las lentes **a)** biconvexas y **b)** bicóncavas tienen dos centros de curvatura, como en esta lente biconvexa, que definen los signos de los radios de curvatura. Véase la tabla 8.4.

Potencia de la lente: dioptrías

Note que la ecuación del fabricante de lentes (8.8) maneja la inversa de la distancia focal, $1/f$. Los optometristas usan esta relación inversa para expresar la *potencia* (P) de una lente en unidades llamadas **dioptrías** (su símbolo es D). La potencia de la lente es el recíproco de su distancia focal expresada en *metros*:

$$P(\text{expresada en dioptrías}) = \frac{1}{f(\text{expresada en metros})} \quad (8.9)$$

Así, $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$. La ecuación del fabricante de lentes expresa la potencia de una lente ($1/f$) en dioptrías, si los rayos de curvatura se expresan en metros.

Si usted usa lentes habrá notado que la prescripción del optometrista mencionaba dioptrías. Las lentes convergentes y divergentes se consideran como lentes positivas (+) y negativas (-), respectivamente. Así, si un optometrista prescribe anteojos de corrección con +2 dioptrías de potencia, se trata de lentes convergentes con distancia focal de

$$f = \frac{1}{P} = \frac{1}{+2 \text{ D}} = \frac{1}{2 \text{ m}^{-1}} = 0.50 \text{ m} = +50 \text{ cm}$$

Cuanto mayor sea la potencia de la lente en dioptrías, menor es su distancia focal, y es más fuertemente convergente o divergente. Así, para corregir un problema de la vista más severo, se requieren lentes de mayor potencia y menor f que en el caso de un problema que se considera leve.

Ejemplo integrado 8.10 ■ Una lente menisco convexa: convergente o divergente

La lente menisco convexa mostrada en la figura 8.14 tiene un radio de 15 cm para la superficie convexa y 20 cm para la superficie cóncava. La lente está hecha de vidrio crown y está rodeada de aire. *a)* La lente es 1) convergente o 2) divergente. Explique por qué. *b)* ¿Cuál es la distancia focal y la potencia de la lente?

a) Razonamiento conceptual. El índice de refracción del vidrio crown se indica en la tabla 7.1: $n = 1.52$. Para un menisco convexo, la primera superficie es convexa, así que R_1 es positivo; la segunda superficie es cóncava, así que R_2 es negativo. Como $R_1 = 15 \text{ cm} < |R_2| = 20 \text{ cm}$, $1/R_1 + 1/R_2$ será positivo. Por consiguiente, la lente es convergente (positiva), de acuerdo con la ecuación 8.8. Así que la respuesta correcta es la 1 (convergente).

b) Razonamiento cuantitativo y solución.

Dado: $R_1 = 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$ **Encuentre:** f y P
 $R_2 = -20 \text{ cm} = -0.20 \text{ m}$
 $n = 1.52$ (de la tabla 22.1 para vidrio crown)

De acuerdo con la ecuación 8.8, tenemos

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = (1.52 - 1) \left(\frac{1}{0.15 \text{ m}} + \frac{1}{-0.20 \text{ m}} \right) = 0.867 \text{ m}^{-1}$$

Así que $f = \frac{1}{0.867 \text{ m}^{-1}} = +1.15 \text{ m}$.

La potencia de la lente es $P = \frac{1}{f} = +0.867 \text{ D}$.

Ejercicio de refuerzo. En este ejemplo, si la lente estuviera inmersa en agua, ¿cuáles serían sus respuestas?

*8.5 Aberraciones de las lentes

OBJETIVOS: a) Describir algunas de las aberraciones comunes de las lentes y b) explicar cómo se pueden reducir o corregir.

Las lentes, al igual que los espejos, también pueden generar aberraciones. A continuación se describirán algunas de las más frecuentes.

Aberración esférica

La explicación de las lentes, hasta ahora, se ha concentrado en rayos que están cerca del eje óptico. Sin embargo, al igual que los espejos esféricos, las lentes convergentes pueden presentar **aberración esférica**, que consiste en que los rayos paralelos que pasan por regiones distintas de una lente no se reúnen en un plano focal común. En general, los rayos cercanos al eje de una lente convergente se refractan menos, y se reúnen en un punto más alejado de la lente con respecto a los rayos que pasan por la periferia (▼ figura 8.21a).

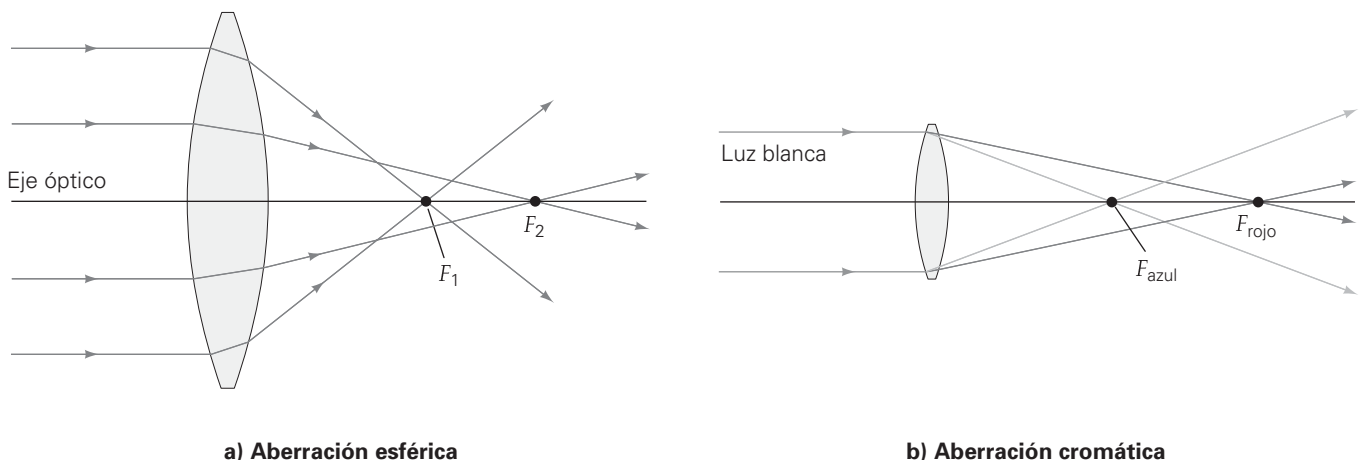
La aberración esférica se minimiza empleando un diafragma para reducir el área efectiva de la lente, de manera que sólo se transmitan rayos luminosos próximos al eje. También es conveniente utilizar combinaciones de lentes convergentes y divergentes, porque la aberración de una lente se compensa con las propiedades ópticas de otra.

Aberración cromática

La **aberración cromática** es un efecto que se debe a que el índice de refracción del material de una lente *no* es igual para todas las longitudes de onda de la luz (esto es, a que el material es dispersivo). Cuando incide luz blanca en una lente, los rayos transmitidos de diferentes longitudes de onda (colores) no tienen un foco común, y se producen imágenes de diversos colores en distintos lugares (figura 8.21b).

Esta aberración dispersiva se puede reducir al mínimo, aunque no eliminar, si se usa un sistema compuesto de lentes de distintos materiales, por ejemplo, de vidrio crown y vidrio flint. Se escogen las lentes de tal forma que la dispersión que genera una quede compensada con la dispersión contraria que produce la otra. Con un sistema de lentes de dos componentes, bien fabricado y que se llama *doblete acromático* (*acromático* significa “sin color”), es posible hacer que coincidan las imágenes en dos longitudes de onda seleccionadas.

▼ **FIGURA 8.21** Aberraciones de las lentes a) Aberración esférica. En general, los rayos más cercanos al eje de una lente se refractan menos y se unen en un punto más alejado de la lente que los rayos que pasan por la periferia de ésta. b) Aberración cromática. A causa de la dispersión, las diversas longitudes de onda (colores) de la luz se enfocan en planos distintos, lo que ocasiona la distorsión de la imagen general.



Astigmatismo

Un haz luminoso circular que va por el eje de una lente forma una área iluminada circular en ésta. Cuando incide en una lente convergente, el haz paralelo converge en el foco. Sin embargo, cuando a la superficie esférica convexa de una lente llega a un cono circular de luz procedente de una fuente fuera del eje, la luz forma una zona *elíptica* iluminada en la lente. Los rayos que entran siguiendo los ejes mayor y menor de la elipse se enfocan en puntos distintos, después de pasar por la lente. A esta condición se le llama **astigmatismo**.

Como hay distintos focos en diferentes planos, las imágenes en ambos planos son borrosas. Por ejemplo, la imagen de un punto deja de ser tal y se convierte en dos imágenes lineales cortas (puntos borrosos). Para reducir el astigmatismo hay que disminuir el área efectiva de la lente con un diafragma o agregando una lente cilíndrica para compensar.

Repaso del capítulo

- Los **espejos planos** forman imágenes virtuales, derechas y sin aumento. La distancia al objeto es igual a la distancia a la imagen ($d_o = d_i$).
- El **factor de amplificación** o **aumento lateral** para todos los espejos y las lentes es

$$M = -\frac{d_i}{d_o} \quad (8.4, 8.6)$$

- Los **espejos esféricos** pueden ser cóncavos (convergentes) o convexos (divergentes). Los espejos esféricos divergentes siempre forman imágenes derechas, reducidas y virtuales.

La distancia focal de un espejo esférico es:

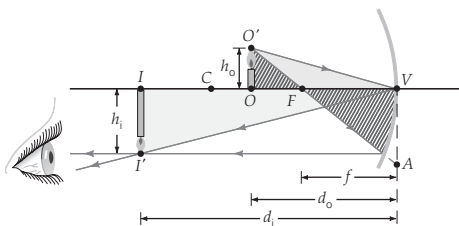
$$f = \frac{R}{2} \quad (8.2)$$

Ecuación del espejo esférico:

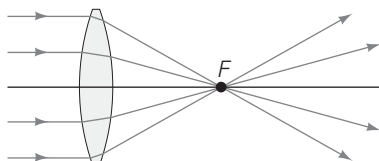
$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (8.3)$$

Forma alternativa:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \quad (8.3a)$$



- Las lentes biesféricas pueden ser convexas (convergentes) o cóncavas (divergentes). Las lentes esféricas divergentes siempre forman imágenes derechas, reducidas y virtuales.



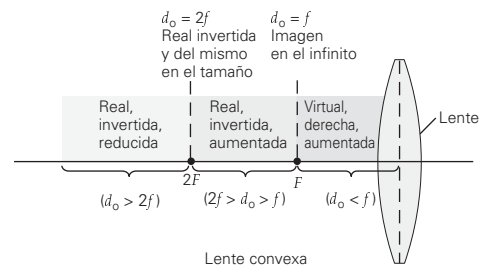
Lente convergente

- La **ecuación de la lente delgada** relaciona la distancia focal, la distancia al objeto y la distancia a la imagen:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad (8.5)$$

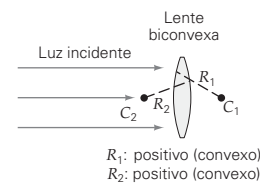
Forma alternativa:

$$d_i = \frac{d_o f}{d_o - f} \quad (8.5a)$$



- La **ecuación del fabricante de lentes** se usa para calcular los radios de tallado y así obtener una lente de distancia focal determinada:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{sólo para lente delgada en aire}) \quad (8.8)$$



R_1 : positivo (convexo)
 R_2 : positivo (convexo)

- La **potencia de la lente en dioptrías** (estando f en metros) se determina con

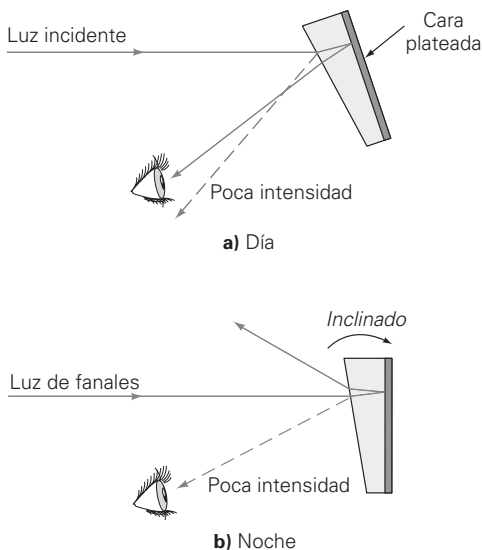
$$P = \frac{1}{f} \quad (8.9)$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

8.1 Espejos planos

- OM** Un espejo plano *a)* tiene mayor distancia a la imagen que distancia al objeto; *b)* produce una imagen virtual, derecha y sin aumento; *c)* cambia la orientación vertical de un objeto, o *d)* invierte las partes superior e inferior del objeto.
- OM** Un espejo plano *a)* produce imágenes tanto reales como virtuales, *b)* siempre produce una imagen virtual, *c)* siempre produce una imagen real o *d)* forma imágenes por reflexión difusa.
- OM** El aumento lateral de un espejo plano es *a)* mayor que 1, *b)* menor que 1, *c)* igual a +1, *d)* igual a -1.
- PC** ¿Qué es la distancia focal de un espejo plano? ¿Por qué?
- PC** Los espejos retrovisores para día y noche se usan con frecuencia en los automóviles. Por la noche se inclina el espejo hacia atrás, y se reduce la intensidad y el reflejo de los faros de los automóviles que van detrás (▼ figura 8.22). El espejo tiene forma de cuña y está plateado en la cara trasera. Este efecto tiene que ver con las reflexiones de la superficie frontal y trasera. La superficie frontal, no plateada, refleja el 5% de la luz que le llega, y la superficie trasera, plateada, refleja el 90% de la luz incidente. Explique cómo funciona el retrovisor para día y noche.



▲ FIGURA 8.22 Espejo retrovisor de un automóvil. Véase el ejercicio 5.

- PC** Al estar de pie frente a un espejo plano, es evidente la inversión derecha-izquierda. *a)* ¿Por qué no hay inversión arriba-abajo? *b)* Podría usted lograr una inversión arriba-abajo aparente colocando su cuerpo de forma distinta?

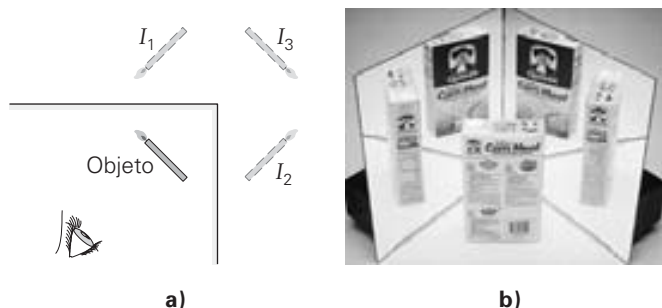
- PC** ¿Por qué algunas ambulancias tienen el letrero AIDNAJUBMA (▼ figura 8.23) impreso al frente?



▲ FIGURA 8.23 Hacia atrás y al revés. Véase el ejercicio 7.

- PC** ¿Se puede proyectar una imagen virtual en una pantalla? ¿Por qué?
- Una persona se pone de pie a 2.0 m de un espejo plano. *a)* ¿Cuál es la distancia aparente entre la persona y su imagen? *b)* ¿Cuáles son las características de la imagen?
- Un objeto de 5.0 cm de altura se coloca a 40 cm de un espejo plano. Calcule *a)* la distancia del objeto a la imagen, *b)* la altura de la imagen y *c)* el aumento de la imagen.
- Usted se coloca de pie a 2.5 m frente a un espejo plano, con cámara en mano para tomarse una foto. ¿A qué distancia debe enfocar manualmente la cámara para obtener una buena imagen?
- Si usted sostiene un espejo plano y cuadrado, de 900 cm^2 , a 45 cm de sus ojos y justo alcanza a ver el asta de la bandera que hay detrás de usted y que mide 8.5 de longitud, ¿qué tan lejos está usted del asta? [Sugerencia: elaborar un diagrama le será útil.]
- Un perro pequeño está a 1.5 m frente a un espejo plano. *a)* ¿Dónde está la imagen del perro en relación con el espejo? *b)* Si el animal salta hacia el espejo con una velocidad de 0.50 m/s, ¿con qué velocidad se acerca a su imagen?
- EI** ●● Una señora se arregla el cabello de la parte posterior de su cabeza y sostiene un espejo plano a 30 cm frente a su cara para verse en un espejo plano de su baño, que está atrás de ella. Ella está a 90 cm del espejo del baño. *a)* La imagen de la parte posterior de su cabeza estará 1) sólo en el espejo que tiene enfrente, 2) sólo en el espejo de la pared o 3) en ambos espejos. *b)* ¿Aproximadamente a qué distancia parece estar frente a ella la imagen de su nuca?

15. **El ●● a)** Cuando usted está de pie entre dos espejos planos, en las paredes opuestas de un estudio de baile, observa 1) una, 2) dos o 3) varias imágenes. Explique por qué. **b)** Ahora está a 3.0 m del espejo de la pared norte, y a 5.0 m del de la pared sur; ¿cuáles son las distancias a las dos primeras imágenes en ambos espejos?
16. **●●** Una mujer de 1.7 m de estatura se coloca de pie a 3.0 m frente a un espejo plano. **a)** ¿Cuál es la altura mínima que debe tener el espejo para que ella vea su imagen completa, desde la coronilla hasta la punta de los pies? Suponga que sus ojos están 10 cm debajo de la coronilla. **b)** ¿Cuál sería la altura mínima necesaria del espejo, si se colocara a 5.0 m de distancia?
17. **●●** Demuestre que para un espejo plano, $d_o = d_i$ (igual magnitud). [Sugerencia: véase la figura 8.2 y utilice triángulos semejantes e idénticos.]
18. **●●●** Dibuje diagramas de rayos que indiquen cómo se forman tres imágenes de un objeto en dos espejos planos en ángulo recto, como se ve en la figura ▼8.24a. [Sugerencia: examine rayos que procedan de ambos extremos del objeto en el dibujo de cada imagen.] La figura 8.24b presenta un caso similar, desde un punto de vista distinto, que produce cuatro imágenes. Explique la imagen adicional que se ve en este caso.



▲ FIGURA 8.24 Dos espejos, varias imágenes. Véase el ejercicio 18.

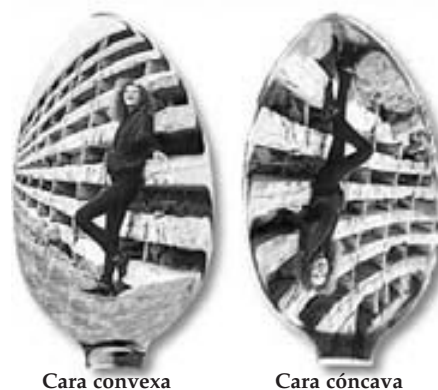
8.2 Espejos esféricos

19. **OM** ¿Cuál de las siguientes afirmaciones acerca de los espejos esféricos es correcta? **a)** Un solo espejo convergente puede producir una imagen virtual invertida. **b)** Un solo espejo divergente puede producir una imagen virtual invertida. **c)** Un espejo divergente puede producir una imagen real e invertida. **d)** Un espejo convergente puede producir una imagen real invertida.
20. **OM** La imagen que produce un espejo convexo siempre es **a)** virtual y derecha, **b)** real y derecha, **c)** virtual e invertida o **d)** real e invertida.
21. **OM** Un espejo para afeitarse o maquillarse se utiliza para formar una imagen que es más grande que el objeto. El espejo es **a)** cóncavo, **b)** convexo, **c)** plano.
22. **PC a)** ¿Qué utilidad tiene un espejo dual en un automóvil o camión, como el de la ►figura 8.25? **b)** Algunos espejos retrovisores del lado del pasajero, en los automóviles, tienen una advertencia: “LOS OBJETOS EN EL ESPEJO ESTÁN MÁS CERCA DE LO QUE PARECEN”. Explique por qué. **c)** ¿Se podría considerar que una antena parabólica de TV para satélite es un espejo convergente? Explique por qué.



▲ FIGURA 8.25 Aplicaciones de los espejos. Véase el ejercicio 22.

23. **PC a)** Al mirar una cuchara brillante se ve una imagen invertida por una de sus caras, y una imagen derecha en la otra (▼figura 8.26). (Haga la prueba.) ¿Por qué se ven así? **b)** ¿Se podrían ver imágenes derechas en ambas caras? Explique su respuesta.



▲ FIGURA 8.26 Reflexiones en superficies cóncavas y convexas. Véase el ejercicio 23.

24. **PC a)** Un espejo de 10 cm de altura tiene la siguiente leyenda: “Mini espejo de cuerpo completo. Vea todo su cuerpo en 10 cm”. ¿Cómo es posible esto? **b)** Una novedad muy común consiste en un espejo cóncavo con una bolita suspendida en el centro de curvatura, o ligeramente dentro (▼figura 8.27). Cuando la bolita oscila hacia el espejo, su imagen crece y de repente llena todo el espejo. La imagen parece saltar fuera del espejo. Explique lo que sucede.




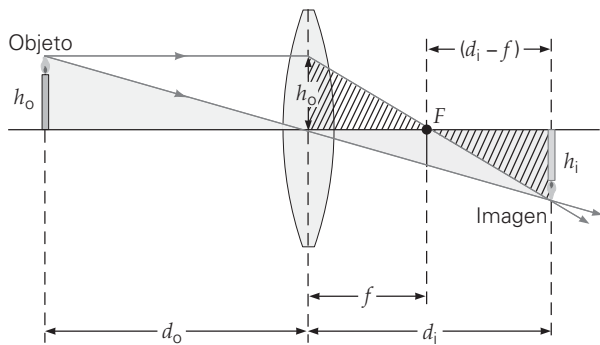
▲ FIGURA 8.27 Juguete con espejo esférico. Véase el ejercicio 24.

25. **PC** ¿Cómo se determina de forma experimental la distancia focal de un espejo cóncavo? ¿Se puede hacer lo mismo para un espejo convexo?
26. **PC** ¿Es posible que un espejo convexo produzca una imagen que sea más alta que el objeto? ¿Por qué?
27. **EI ●** Un objeto está a 30 cm frente a un espejo convexo, cuya distancia focal es de 60 cm. *a)* Con un diagrama de rayos, determine si la imagen es 1) real o virtual, 2) derecha o invertida y 3) mayor o menor que el objeto. *b)* Calcule la distancia a la imagen y la altura de ésta.
28. ● Un objeto de 3.0 cm de altura se coloca a 20 cm frente a un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura es de 30 cm. ¿Dónde se forma la imagen y qué altura tiene?
29. ● Si el objeto del ejercicio 28 se mueve a un lugar a 10 cm frente al espejo, ¿cuáles serán las características de su imagen?
30. ● Una vela cuya flama mide 1.5 cm de altura se coloca a 5.0 cm al frente de un espejo cóncavo. Se produce una imagen virtual a 10 cm del vértice del espejo. *a)* Calcule la distancia focal y el radio de curvatura del espejo. *b)* ¿Qué altura tiene la imagen de la llama?
31. ●● Use la ecuación del espejo y el factor de aumento para demostrar que cuando en un espejo cóncavo $d_o = R = 2f$, la imagen es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.
32. ●● Un objeto de 3.0 cm de altura se coloca en distintos lugares frente a un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura es de 30 cm. Calcule la ubicación de la imagen y sus características, cuando la distancia al objeto es de 40, 30, 15 y 5.0 cm, mediante *a)* un diagrama de rayos y *b)* la ecuación del espejo.
33. **EI ●●** Se produce una imagen virtual con +0.50 de aumento cuando se coloca un objeto frente a un espejo esférico. *a)* El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. Explique por qué. *b)* Calcule el radio de curvatura del espejo, si el objeto está a 7.0 cm frente a él.
34. ●● Una botella de 6.0 cm de largo se localiza a 75 cm de la superficie cóncava de un espejo cuyo radio de curvatura es de 50 cm. ¿Dónde se localiza la imagen y cuáles son sus características?
35. **EI ●●** Un espejo para afeitarse tiene +4.00 de aumento. *a)* Ese espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la distancia focal del espejo, si la cara se coloca a 10 cm frente al espejo?
36. ●● Con la ecuación del espejo esférico y el factor de aumento, demuestre que para un espejo cóncavo en el que $d_o < f$, la imagen de un objeto siempre es virtual, derecha y aumentada.
37. ●● Con la ecuación del espejo esférico y el factor de aumento, demuestre que en un espejo convexo la imagen de un objeto siempre es virtual, derecha y reducida.
38. ●● Un espejo cóncavo para maquillaje produce una imagen virtual que es 1.5 veces el tamaño de una persona cuya cara está a 20 cm del mismo. *a)* Dibuje un diagrama de rayos de esta situación. *b)* ¿Cuál es la distancia focal del espejo?
39. **EI ●●** La imagen de un objeto colocado a 30 cm de un espejo se forma en una pantalla localizada a 20 del espejo. *a)* El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?
40. **EI ●●** La imagen derecha de un objeto a 18 cm frente a un espejo tiene la mitad del tamaño del objeto. *a)* El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la distancia focal del espejo?
41. **EI ●●** Un espejo cóncavo tiene +3.0 de aumento cuando un objeto se coloca a 50 cm frente él. *a)* El tipo de imagen que se produce es 1) virtual y derecha, 2) real y derecha, 3) virtual e invertida, 4) real e invertida. Explique por qué. *b)* Determine el radio de curvatura del espejo.
42. ●● Un espejo cóncavo de afeitarse se fabrica de tal forma que un hombre a una distancia de 20 cm de éste ve su imagen aumentada 1.5 veces. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?
43. ●● Un niño observa en una esfera de Navidad, de 9.0 cm de diámetro, y ve una imagen de su cara que mide la mitad del tamaño real. ¿A qué distancia está el niño de la esfera?
44. **EI ●●** Un dentista utiliza un espejo esférico que produce una imagen derecha de un diente, aumentado cuatro veces. *a)* El espejo es 1) convergente, 2) divergente o 3) plano. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la distancia focal del espejo en función de la distancia al objeto?
45. ●● Se coloca un lápiz de 15 cm de longitud, con su goma en el eje óptico de un espejo cóncavo y su punta hacia arriba, 20 cm enfrente del espejo. El radio de curvatura del espejo es de 30 cm. Utilice *a)* un diagrama de rayos y *b)* la ecuación del espejo para ubicar la imagen y determinar sus características.
46. **EI ●●** Un frasco de píldoras de 3.0 cm de altura se coloca a 12 cm frente a un espejo. Se forma una imagen derecha de 9.0 cm de altura. *a)* El espejo es 1) convexo, 2) cóncavo o 3) plano. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es su radio de curvatura?
47. ●● Un espejo esférico, en un parque de diversiones, muestra a quienquiera que se pare a 2.5 m frente a él, su imagen aumentada al doble. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?
48. ●●● Para valores de d_o desde 0 hasta ∞ , *a)* trace gráficas de 1) d_i en función de d_o y 2) M en función de d_o para un espejo convergente. *b)* Trace los mismos diagramas, pero para un espejo divergente.
49. ●●● La superficie anterior de un cubo de vidrio de 5.0 cm por lado se coloca a una distancia de 30.0 cm de un espejo convergente, cuya distancia focal es de 20 cm. *a)* ¿Dónde se ubican las imágenes de las caras anterior y posterior del cubo, y cuáles son las características de esas imágenes? *b)* ¿La imagen sigue siendo la de un cubo?
50. ●●● Un casquete esférico está plateado por ambas caras. Si el aumento que produce en un objeto es de +1.8 cuando el casquete se usa como espejo cóncavo, ¿cuál es el aumento de un objeto a la misma distancia del lado convexo?

51. **El ●●●** Un espejo cóncavo, cuyo radio de curvatura mide 20 cm, forma una imagen que tiene el doble de altura del objeto. *a)* Podría haber 1) una, 2) dos 3) tres distancias al objeto que satisfacen las características de la imagen. Explique por qué. *b)* ¿Cuáles son las distancias al objeto?
52. ●●● En el exterior de muchos camiones, del lado del pasajero, hay un espejo convexo (ejercicio 7a). Si la distancia focal de uno de esos espejos es de -40.0 cm, ¿cuál será la ubicación y la altura de la imagen de un automóvil de 2.0 m de altura y *a)* a 100 m detrás del camión y *b)* a 10.0 m frente al espejo?
53. ●●● Dos alumnos en un laboratorio de física tienen, cada uno, un espejo cóncavo del mismo radio de curvatura: 40 cm. Cada estudiante coloca un objeto frente a su espejo. En ambos espejos, la imagen tiene tres veces el tamaño del objeto. Sin embargo, cuando los alumnos comparan sus notas, ven que las distancias al objeto no son iguales. ¿Es posible esto? En caso afirmativo, ¿cuáles son las distancias al objeto?

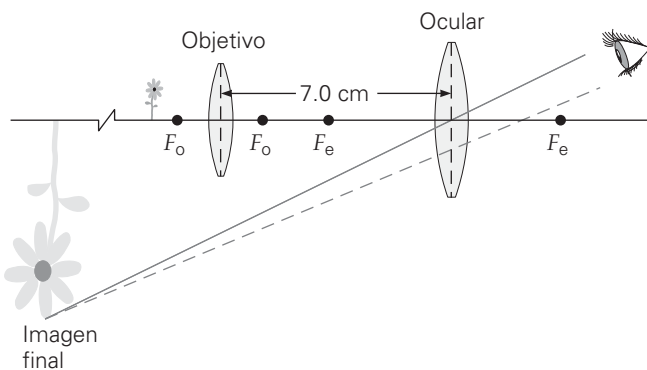
8.3 Lentes

54. **OM** La imagen producida por una lente divergente siempre es *a)* virtual y aumentada, *b)* real y aumentada, *c)* virtual y reducida o *d)* real y reducida.
55. **OM** Una lente convergente *a)* debe tener al menos una superficie convexa; *b)* no puede producir una imagen virtual y reducida, *c)* es más gruesa en su centro que en su periferia o *d)* todo lo anterior.
56. **OM** Si un objeto se coloca en el foco de una lente convergente, la imagen está *a)* en cero, *b)* también en el foco, *c)* a una distancia igual al doble de la distancia focal, *d)* en el infinito.
57. **PC** Explique por qué un pez dentro de una pecera esférica se ve, desde el exterior, más grande de lo que realmente es.
58. **PC** ¿Una lente convergente puede formar una imagen virtual de un objeto real? Si es así, ¿en qué condiciones?
59. **PC** ¿Cómo se podría determinar con rapidez la distancia focal de una lente convergente? ¿Funcionará ese método con lentes divergentes?
60. **PC** Si se quiere usar una lente convergente para diseñar un proyector sencillo de filminas y proyectar la imagen ampliada de un texto pequeño en una pantalla colocada en la pared, ¿a qué distancia se debe colocar el objeto frente a la lente?
61. ● Un objeto se coloca a 50.0 cm frente a una lente convergente de 10.0 cm de distancia focal. ¿Cuáles son la distancia a la imagen y el aumento lateral?
62. ● Un objeto se coloca a 30 cm frente a una lente convergente, y forma una imagen a 15 cm detrás de la lente. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
63. ● Con una lente convergente de 20 cm de longitud focal se produce una imagen en una pantalla que está a 2.0 m de la lente. ¿Cuál es la distancia al objeto?
64. **El ●●** Un objeto de 4.0 cm de altura está frente a una lente convergente, cuya distancia focal es de 22 cm. El objeto está a 15 cm de la lente. *a)* Con un diagrama de rayos, determine si la imagen es 1) real o virtual, 2) derecha o invertida y 3) mayor o menor que el objeto. *b)* Calcule la distancia a la imagen y el aumento lateral.
65. ●● *a)* Diseñe la lente de un proyector de transparencias que forme una imagen nítida en una pantalla a 4.0 m de distancia, con las transparencias a 6.0 cm de la lente. *b)* Si el objeto en una transparencia tiene 1.0 cm de altura, ¿qué altura tendrá la imagen en la pantalla, y cómo se debe colocar la diapositiva en el proyector?
66. ●● Utilice la ecuación de lentes delgadas y el factor de aumento para demostrar que en el caso de una lente divergente esférica, la imagen de un objeto real siempre es virtual, derecha y reducida.
67. ●● Una lente biconvexa tiene 0.12 m de distancia focal. ¿Dónde se debe colocar un objeto en el eje de la lente para obtener *a)* una imagen real, con aumento de 2.0 y *b)* una imagen virtual con un aumento de 2.0?
68. ●● Un objeto se coloca frente a una lente bicóncava, cuya distancia focal es de -18 cm. ¿Dónde se ubica la imagen, y cuáles son sus características si la distancia al objeto es *a)* 10 cm y *b)* 25 cm? Trace diagramas de rayos para cada caso.
69. ●● Una lente biconvexa produce una imagen real e invertida de un objeto, aumentada 2.5 veces cuando ese objeto está a 20 cm de la lente. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
70. ●● Una cámara sencilla tiene una sola lente (biconvexa) y con ella se fotografía a un hombre de 1.7 m de altura, que está de pie a 4.0 m de la cámara. Si la imagen del hombre llena la longitud (35 mm) de un negativo, ¿cuál es la distancia focal de la lente?
71. ●● Para fotografiar la Luna llena, una persona usa una cámara de 60 mm de distancia focal. ¿Cuál será el diámetro de la imagen de la Luna en la película? [Nota: en la tercera de forros de este libro se encuentran datos importantes de la Luna.]
72. ●● *a)* Para valores de d_o desde 0 hasta ∞ , dibuje gráficas para 1) d_i en función de d_o y 2) M en función de d_o para una lente convergente. *b)* Trace gráficas similares para una lente divergente. (Compare con el ejercicio 48.)
73. ●● Un objeto se coloca a 40 cm de una pantalla. *a)* ¿En qué punto entre el objeto y la pantalla debe colocarse una lente convergente de 10 cm de distancia focal, para producir una imagen nítida en la pantalla? *b)* ¿Cuál es el aumento de esa lente?
74. ●● Un objeto de 5.0 cm de alto está a 10 cm de una lente cóncava. La imagen producida tiene la quinta parte del tamaño del objeto. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
75. ●● *a)* Para una lente biconvexa, ¿cuál es la distancia mínima entre un objeto y su imagen, si esta última es real? *b)* ¿Cuál es la distancia si la imagen es virtual?
76. ●● Use la  figura 8.28 para deducir *a)* la ecuación de la lente delgada y *b)* la ecuación del aumento para una lente delgada. [Sugerencia: utilice triángulos semejantes.]



▲ FIGURA 8.28 La ecuación de las lentes delgadas Geometría para deducir la ecuación de las lentes delgadas (y su factor de aumento). Observe los dos conjuntos de triángulos semejantes. Véase el ejercicio 76.

77. ●● a) Si se sujeta un libro a 30 cm de una lente de anteojos con -45 cm de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen de sus páginas? b) Si se usa una lupa de $+57$ cm de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen?
78. **El** ●● Un alumno de biología quiere examinar un pequeño insecto con una amplificación de $+5.00$. a) Debería utilizar una lente 1) convexa, 2) cóncava o 3) plana. Explique por qué. b) Si el insecto está a 5.00 cm de la lente, ¿cuál es la distancia focal de ésta?
79. ●● En una práctica de campo, un alumno de biología examina un pequeño insecto con una lupa. Si ve al insecto aumentado por un factor de 3.5 cuando sostiene la lupa a 3.0 cm de él, ¿cuál es la distancia focal de la lupa?
80. ●● El ojo humano es un complejo sistema de lentes múltiples. Sin embargo, cuando el ojo está relajado, se aproxima a una sola lente convergente equivalente con una distancia focal promedio de 1.7 cm. Si un ojo está viendo un árbol de 2.0 m de alto localizado enfrente a 15 m, ¿cuáles son la altura y la orientación de la imagen del árbol en la retina?
81. ●●● En la **▼**figura 8.29 se ilustra la geometría de un microscopio compuesto, formado por dos lentes convergentes. (En el capítulo 10 veremos más detalles de los microscopios.) Las distancias focales del objetivo y el ocular son 2.8 mm y 3.3 cm, respectivamente. Si un objeto se coloca a 3.0 mm del objetivo, ¿dónde se ubica la imagen final y qué tipo de imagen es?



▲ FIGURA 8.29 Microscopio compuesto Véase el ejercicio 81.

82. ●●● Dos lentes convergentes, L_1 y L_2 , tienen 30 y 20 cm de distancia focal, respectivamente. Las lentes se colocan a 60 cm de distancia en el mismo eje, y se coloca un objeto a 50 cm de L_1 , en el lado contrario a L_2 . ¿Dónde se forma la imagen, en relación con L_2 , y cuáles son sus características?
83. ●●● Para una combinación de lentes, demuestre que el aumento total es $M_{\text{total}} = M_1 M_2$. [*Sugerencia:* examine la definición de aumento.]
84. ●●● Demuestre que para lentes delgadas de distancias focales f_1 y f_2 , en contacto mutuo, la distancia focal efectiva (f) es

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

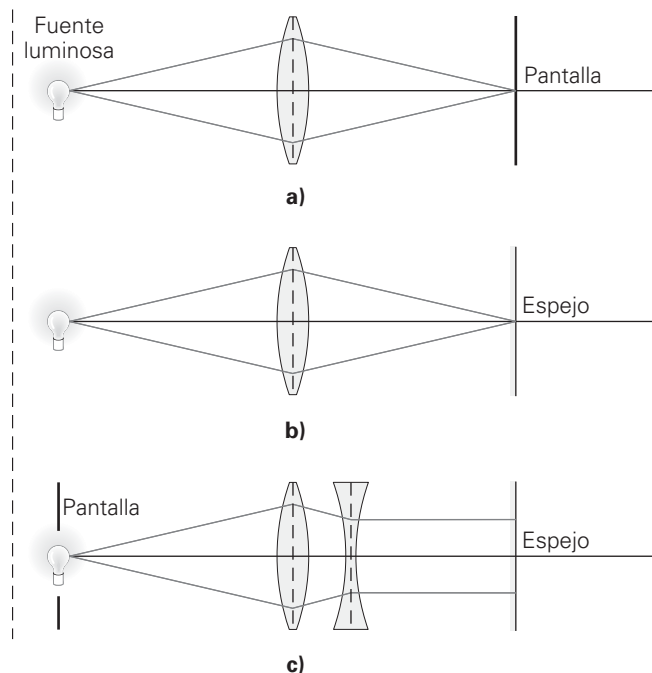
8.4 La ecuación del fabricante de lentes y *8.5 Aberraciones de las lentes

85. **OM** La potencia de una lente se expresa en unidades de a) watts, b) dioptrías, c) metros, d) tanto b como c.
86. **OM** Una aberración de lente causada por la dispersión se llama a) aberración esférica, b) aberración cromática, c) aberración refringente, d) ninguna de las opciones anteriores es válida.
87. **OM** La distancia focal de un bloque rectangular de vidrio es a) cero, b) infinita, c) no está definida.
88. **PC** Determine los signos de R_1 y R_2 para cada lente de la figura 8.14.
89. **PC** Cuando usted abre sus ojos bajo el agua, ve todo borroso. Sin embargo, si usa *goggles*, podrá ver con claridad. Explique por qué.
90. **PC** Una lente que es convergente en el aire, se sumerge en un fluido cuyo índice de refracción es mayor que el de la lente. ¿Sigue siendo convergente esa lente?
91. **PC** a) Cuando se sumerge en agua una lente con $n = 1.60$, ¿cambia su distancia focal? Si es así, ¿en qué forma? b) ¿Cuál sería el caso de una lente sumergida cuyo índice de refracción fuera menor que el del fluido?
92. ● Un optometrista prescribió a un alumno miope unos anteojos con -2.0 D de potencia. ¿Cuál es la distancia focal de los anteojos?
93. ● Un adulto mayor con hipermetropía necesita anteojos con una distancia focal de 25 cm. ¿Cuál es la potencia de los anteojos?
94. ●● Un optometrista prescribe anteojos de corrección con $+1.5$ D de potencia. El fabricante de lentes toma un vidrio materia prima, cuyo índice de refracción es 1.6 , y que tiene una superficie delantera convexa con 20 cm de radio de curvatura. ¿A qué radio de curvatura debe tallar la otra superficie?
95. ●● Una lente plano-cóncava de plástico tiene 50 cm de radio de curvatura en su superficie cóncava. Si el índice de refracción del plástico es 1.35 , ¿cuál es la potencia de la lente?

96. **EI** ●● Una lente de contacto menisco convexa (figura 8.14) está hecha de un plástico cuyo índice de refracción es 1.55. La lente tiene un radio frontal de 2.50 cm y un radio posterior de 3.00 cm. *a)* Los signos de R_1 y R_2 son 1) +, +, 2) +, -, 3) -, +, 4) -, -. Explique por qué. *b)* ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
97. ●● Una lente convergente de vidrio, con índice de refracción de 1.62, tiene una distancia focal de 30 cm en el aire. ¿Cuál es su distancia focal cuando esa lente se sumerge en agua?
98. **EI** ●●● Una lente biconvexa es de vidrio con índice de refracción 1.6. Tiene un radio de curvatura de 30 cm en una superficie y 40 cm en la otra. *a)* Si la lente pasa del aire al agua, su distancia focal 1) aumentará, 2) permanecerá igual o 3) disminuirá? ¿Por qué? *b)* Calcule la distancia focal de esta lente en el aire y bajo el agua.

Ejercicios adicionales

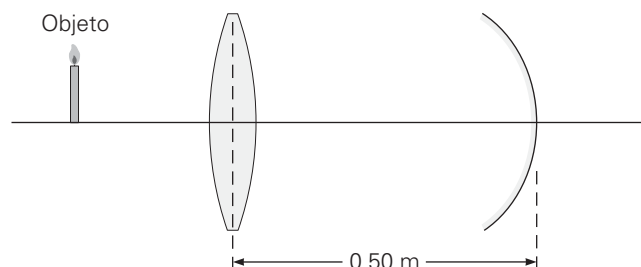
99. Un método para determinar la distancia focal de una lente divergente se llama *autocolimación*. Como se ve en la ▼ figura 8.30, primero se proyecta una imagen nítida de una fuente luminosa en una pantalla, mediante una lente



▲ FIGURA 8.30 Autocolimación Véase el ejercicio 99.

convergente. Después se sustituye la pantalla por un espejo plano. En el tercer paso se coloca una lente divergente entre la lente convergente y el espejo. La luz se refleja en el espejo y regresa por el sistema de lente compuesto, formando una imagen en una pantalla cercana a la fuente luminosa. Esta imagen se enfoca ajustando la distancia entre la lente divergente y el espejo. La distancia a la cual la imagen es más nítida es igual a la distancia focal de la lente. Explique por qué es efectivo este método.

100. Para la configuración de la ▼ figura 8.31, se coloca un objeto a 0.40 m frente a la lente convergente, cuya distancia focal es de 0.15 m. Si el espejo cóncavo tiene 0.13 m de distancia focal, ¿dónde se forma la imagen final y cuáles son sus características?



▲ FIGURA 8.31 Combinación de lente y espejo

Véase el ejercicio 100.

101. Dos lentes, cada una con +10 D de potencia, se colocan a 20 cm de distancia a lo largo del mismo eje. Si un objeto está a 60 cm de la primera, en el lado opuesto de la segunda, ¿dónde se forma la imagen final, en relación con la primera lente, y cuáles son sus características?
102. Demuestre que el aumento, para los objetos cercanos al eje óptico de un espejo convexo, es $|M| = d_i/d_o$. [Sugerencia: utilice un diagrama de rayos, con los rayos reflejados en el vértice del espejo.]
103. Un objeto está a 15 cm de una lente convergente de 10 cm de distancia focal. En el lado opuesto de esa lente, a 60 cm de distancia, hay una lente convergente de 20 cm de distancia focal. ¿Dónde se forma la imagen final y cuáles son sus características?
104. *a)* Con diagramas de rayos, demuestre que un rayo paralelo al eje óptico de una lente biconvexa se refracta hacia el eje, en la superficie de incidencia, y de nuevo hacia el centro en la superficie de salida. *b)* Demuestre que esto también es válido para una lente bicóncava, pero con ambas refracciones alejándose del eje.

ÓPTICA FÍSICA: LA NATURALEZA ONDULATORIA DE LA LUZ

| | |
|---|-----|
| 9.1 El experimento de Young de la doble rendija | 243 |
| 9.2 Interferencia en películas delgadas | 246 |
| 9.3 Difracción | 250 |
| 9.4 Polarización | 257 |
| *9.5 Dispersión atmosférica de la luz | 264 |



HECHOS DE FÍSICA

- Algunas fuentes afirman que Thomas Young, quien fue el primero en demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz, podía leer a la edad de dos años y que leyó la Biblia en dos ocasiones cuando era niño.
- En un DVD-ROM, la distancia entre pistas es de $0.74 \mu\text{m}$, mientras que en un CD-ROM es de $1.6 \mu\text{m}$. En comparación, el diámetro de un cabello humano mide entre 50 y $150 \mu\text{m}$. Las pistas tanto de los DVD-ROM como de los CD-ROM, en realidad, dividen los cabellos.
- Las señales AM de radio se escuchan mejor en algunas áreas que las de FM. Esto se debe a que las ondas AM, que son más largas, se difractan más fácilmente alrededor de los edificios y de otros obstáculos.
- La luz del cielo es parcialmente polarizada. Se cree que algunos insectos, como las abejas, utilizan la luz del cielo polarizada para determinar sus direcciones de navegación con respecto al Sol.
- Para un observador en Tierra, Marte, el “planeta rojo”, aparece rojizo porque el material de su superficie contiene óxido de hierro. La oxidación del hierro en la Tierra produce óxido de hierro.

Siempre es intrigante ver los colores brillantes que producen los objetos que, como sabemos, no tienen colores propios. Por ejemplo, el vidrio de un prisma, que es incoloro y transparente, produce todo un conjunto de colores cuando lo atraviesa la luz blanca. Los prismas, al igual que las gotitas de agua que producen el arco iris, no crean colores. Tan sólo separan las distintas longitudes de onda que forman la luz blanca.

Los fenómenos de reflexión y refracción se analizan en forma adecuada recurriendo a la óptica geométrica (capítulo 7). Los diagramas de rayos (capítulo 8) indican lo que sucede cuando la luz se refleja en un espejo o cuando pasa por una lente. Sin embargo, hay otros fenómenos donde interviene la luz, por ejemplo las figuras de interferencia de la foto de esta página (véase el pliego a color al final del libro), que no se pueden explicar ni describir con el concepto de rayo, porque ese concepto no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz. Otros fenómenos ondulatorios son la difracción y la polarización.

La **óptica física**, u **óptica ondulatoria**, tiene en cuenta las propiedades ondulatorias que en la óptica geométrica se ignoran. La teoría ondulatoria de la luz conduce a explicaciones satisfactorias de los fenómenos que no se pueden analizar mediante rayos. Así, en este capítulo, se usará la naturaleza ondulatoria de la luz para analizar fenómenos como la interferencia y la difracción.

Se debe usar la óptica ondulatoria para explicar cómo se propaga la luz alrededor de objetos pequeños o a través de diminutas aberturas. Vemos esto en la vida cotidiana con los delgados surcos en los CD, DVD y en otros artículos. Se considera que un objeto o una abertura son pequeños si sus dimensiones son del orden de magnitud de la longitud de onda de la luz.

9.1 El experimento de Young de la doble rendija

OBJETIVOS: a) Explicar cómo el experimento de Young demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz y b) calcular la longitud de onda de la luz a partir de los resultados experimentales.

Se ha afirmado que la luz se comporta como una onda, pero hasta el momento no se ha analizado ninguna prueba de esta aseveración. ¿Cómo demostraría usted la naturaleza ondulatoria de la luz? El científico inglés Thomas Young (1773-1829) ideó un método para ello, que implica el uso de la interferencia. El **experimento de Young de la doble rendija** no sólo demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz, sino que también permite medir su longitud de onda. En esencia, se demuestra que la luz es una onda si presenta propiedades ondulatorias, como la interferencia y la difracción.

Recuerde que —como vimos en la descripción de la interferencia de ondas en la sección 11.4 de *Física 11*—, las ondas superpuestas pueden interferir en forma constructiva o destructiva. La interferencia constructiva se presenta cuando se superponen dos crestas, y la interferencia destructiva se presenta cuando se superponen una cresta y un valle. Este fenómeno se puede observar en las ondas en el agua, en donde las interferencias constructivas y destructivas producen obvias figuras de interferencia (►figura 9.1).

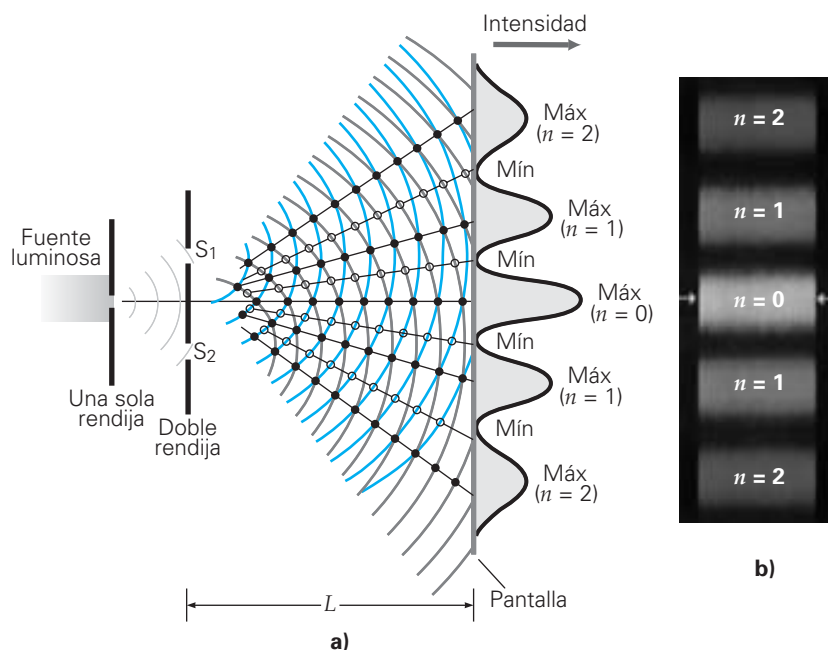
La interferencia de las ondas luminosas (visibles) no se observa con tanta facilidad porque sus longitudes de onda son relativamente cortas ($\approx 10^{-7}$ m) y porque no son monocromáticas (de una sola frecuencia). Además, sólo se producen figuras estacionarias de interferencia cuando las fuentes son *coherentes*, es decir, cuando las fuentes que producen ondas luminosas tienen entre sí una relación constante de fases. Por ejemplo, para que se presente interferencia constructiva en cierto punto, las ondas que lleguen a él deben estar en fase. Al encontrarse las ondas, una cresta *siempre* debe traslaparse con una cresta, y un valle *siempre* debe traslaparse con un valle. Si a través del tiempo se desarrolla una diferencia de fases, cambia la figura de interferencia y no se establece una figura estable o estacionaria.

En una fuente luminosa ordinaria, los átomos se excitan al azar, y las ondas luminosas emitidas fluctúan en amplitud y frecuencia. Por eso, la luz que producen dos de tales fuentes es *incoherente* y no produce una figura estacionaria de interferencia. Si hay interferencia, pero la diferencia entre las fases de las ondas que se interfieren cambia con tal rapidez, que no se distinguen los efectos de la interferencia. Para obtener dos fuentes coherentes se coloca una barrera con una rendija angosta frente a una fuente luminosa, y una barrera con dos rendijas muy angostas colocadas frente a la primera barrera (▼figura 9.2a).

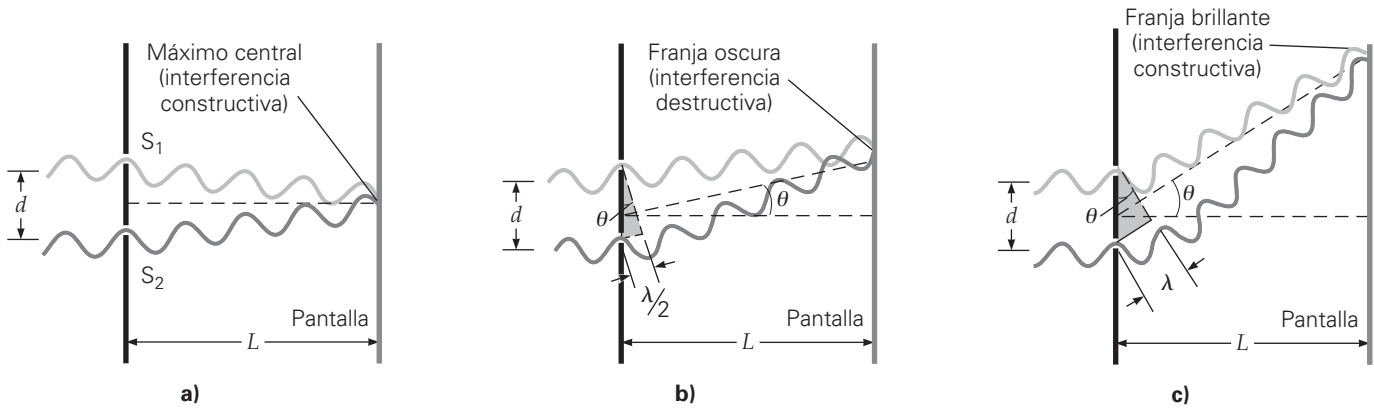
Las ondas que se propagan saliendo de la primera rendija están en fase, y entonces la rendija doble actúa como dos fuentes coherentes, porque cada onda se separa en dos partes. Todo cambio aleatorio en la luz de la fuente original afectará entonces a la luz que pase por ambas rendijas, y la diferencia de fases será constante. El moderno rayo láser, que es una fuente luminosa coherente, facilita mucho la observación de una figu-



▲ **FIGURA 9.1** Interferencia de ondas en agua La interferencia constructiva y destructiva de las ondas procedentes de dos fuentes coherentes en el agua de un estanque produce figuras de interferencia.



◀ **FIGURA 9.2** Interferencia de doble rendija a) Las ondas coherentes de dos rendijas se indican en azul (rendija superior) y en gris (rendija inferior). Las ondas se difunden a causa de la difracción en rendijas angostas. Esas ondas interfieren y producen máximos y mínimos que se alternan, es decir, franjas brillantes y oscuras, en la pantalla. b) Una figura de interferencia. Note la simetría de la figura respecto al máximo central ($n = 0$).



▲ FIGURA 9.3 Interferencia La interferencia que produce franjas brillantes u oscuras depende de la diferencia en longitudes de trayectoria de la luz que procede de las dos rendijas. **a)** La diferencia de longitudes de trayectoria en el lugar del máximo central es cero, por lo que las ondas llegan en fase e interfieren en forma constructiva. **b)** En la posición de la primera franja oscura, la diferencia en longitudes de trayectoria es $\lambda/2$, y las ondas se interfieren en forma destructiva. **c)** En la posición de la primera banda brillante, la diferencia de longitudes de trayectoria es λ , y la interferencia es constructiva.

ra estable de interferencia. Se observa entonces una serie de líneas luminosas en una pantalla, relativamente alejada de las rendijas (figura 9.2b).

Para ayudarnos a analizar el experimento de Young, imaginemos que se usa luz con una sola longitud de onda (luz monocromática). Como resultado de la difracción (véase la sección 11.4 de *Física 11* y la sección 9.3 de este capítulo), que es la propagación de la luz al pasar por una rendija, las ondas se extienden e interfieren como se ve en la figura 9.2a. Al venir de dos “fuentes” coherentes, las ondas que interfieren producen una figura estable de interferencia en la pantalla. Esta figura consiste en un máximo central brillante (▲figura 9.3a) y una serie de franjas laterales simétricas, oscuras (figura 9.3b) y claras (figura 9.3c), que indican las posiciones donde se presenta la interferencia destructiva y constructiva. La existencia de esta figura de interferencia demuestra con claridad la naturaleza ondulatoria de la luz. La intensidad de las franjas brillantes a cada lado disminuye en función de la distancia al máximo central.

Para medir la longitud de onda de la luz se necesita examinar la geometría del experimento de Young, como se ve en la ▼figura 9.4. Tenemos una pantalla colocada a la distancia L de las rendijas, y un punto P arbitrario en la pantalla. P está a una distancia y del centro del máximo central, y determina un ángulo θ en relación con la línea normal entre las rendijas. Las rendijas S_1 y S_2 están separadas por una distancia d . Note que el trayecto de la luz de la rendija S_2 a P es más largo que de S_1 a P . Como se observe en la figura, la diferencia entre longitudes de trayectoria (ΔL) es aproximadamente

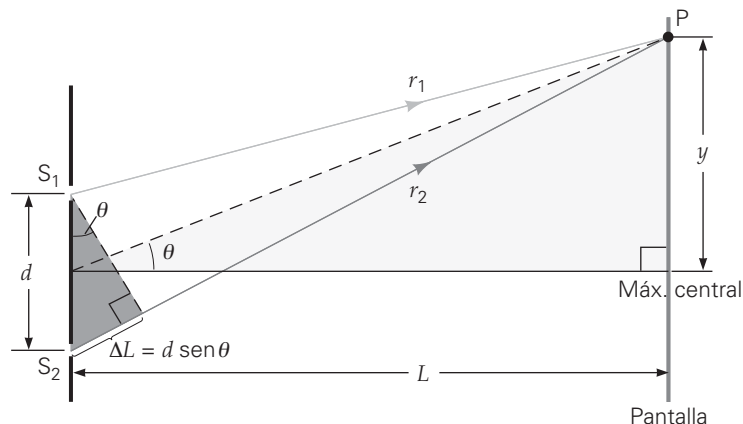
$$\Delta L = d \text{ sen } \theta$$

El hecho de que el ángulo en el triángulo pequeño sombreado sea casi igual a θ se demuestra con un argumento geométrico sencillo, que implica triángulos semejantes cuando $d \ll L$, como se describe en el pie de la figura 9.4.

Las condiciones para interferencia son válidas para cualquier tipo de onda, incluyendo las ondas luminosas. La interferencia constructiva se presenta en cualquier punto en el que la diferencia de longitudes de trayectoria entre las dos ondas es un número entero de longitudes de onda:

$$\Delta L = n\lambda \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{condición para interferencia constructiva} \quad (9.1)$$

► FIGURA 9.4 Geometría del experimento de Young de la doble rendija La diferencia de longitudes de trayectoria de la luz que sale de las dos rendijas y llega a un punto P es $r_2 - r_1 = \Delta L$, que forma un cateto del pequeño triángulo sombreado. Como la barrera con las rendijas es paralela a la pantalla, el ángulo entre r_2 y la barrera (en S_2 , en el pequeño triángulo sombreado) es igual al ángulo que forman r_2 y la pantalla. Cuando L es mucho mayor que y , ese ángulo es casi idéntico al que forman la pantalla y la línea punteada, que es un ángulo en el triángulo grande sombreado. Los dos triángulos sombreados son entonces casi exactamente semejantes, y el ángulo en S_1 del triángulo pequeño es casi exactamente igual a θ . Así, $\Delta L = d \text{ sen } \theta$. (El dibujo no está a escala. Se supone que $d \ll L$.)



De manera similar, en el caso de la interferencia destructiva, la diferencia de longitudes de trayectoria es un número impar de medias longitudes de onda:

$$\Delta L = \frac{m\lambda}{2} \quad \text{para } m = 1, 3, 5, \dots \quad \begin{array}{l} \text{condición para} \\ \text{interferencia destructiva} \end{array} \quad (9.2)$$

Así, en la figura 9.4, la posición de una franja brillante (interferencia constructiva) satisface

$$d \sin \theta = n\lambda \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \begin{array}{l} \text{condición para} \\ \text{franjitas brillantes} \end{array} \quad (9.3)$$

en la que n se llama *número de orden*. La franja de orden cero ($n = 0$) corresponde al máximo central; la franja de primer orden ($n = 1$) es la primera franja brillante en ambos lados del máximo central, y así sucesivamente. Conforme varía la diferencia de longitudes de trayectoria de un punto a otro, también varía la diferencia de fases, y el tipo resultante de interferencia (constructiva o destructiva).

Por lo anterior, la longitud de onda se determina midiendo d y θ en una franja brillante de determinado orden (que no sea el máximo central), porque la ecuación 9.3 se resuelve como $\lambda = (d \sin \theta)/n$.

El ángulo θ localiza una franja en relación con el máximo central y que se puede medir en una fotografía de la figura de interferencia, como la 9.2b. Si θ es pequeño ($y \ll L$), entonces $\sin \theta \approx \tan \theta = y/L$. Se sustituye y/L en lugar de $\sin \theta$ en la ecuación 9.3, y a continuación se despeja y ; así se obtiene una buena aproximación de la distancia de la n -ésima franja brillante (y_n) al máximo central en cada lado:

$$y_n \approx \frac{nL\lambda}{d} \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \begin{array}{l} \text{distancia lateral a la franja} \\ \text{brillante, sólo para } \theta \text{ pequeño} \end{array} \quad (9.4)$$

Con un análisis similar se obtiene la ubicación de las franjas oscuras. (Véase el ejercicio 10a de *Física 11*.)

En la ecuación 9.3 se ve que, excepto en la franja de orden cero, $n = 0$ (el máximo central), las posiciones de las franjas dependen de la longitud de onda: diferentes longitudes de onda (λ) producen valores distintos de $\sin \theta$ y, en consecuencia, de θ y y . Por consiguiente, si utilizamos luz blanca, la banda central es blanca porque todas las longitudes de onda tienen la misma ubicación, pero los demás órdenes se convierten en un espectro “extendido” de colores. Como y es proporcional a λ ($y \propto \lambda$), cabe esperar que el rojo esté más alejado que el azul, o que el rojo tenga una mayor longitud de onda que el azul.

Al medir las posiciones de las franjas de color dentro de determinado orden, Young pudo determinar las longitudes de onda de los colores de la luz visible. Hay que advertir también que el tamaño o la “extensión” de la figura de interferencia, y_n , depende inversamente de la distancia d entre las rendijas. Cuanto menor es d , más se extiende la figura de interferencia. Cuando d es grande, esa figura está tan comprimida que parece una sola franja blanca (en el centro).

En este análisis, el término *destructiva* no implica que la energía se destruya. La interferencia destructiva es tan sólo una descripción de un hecho físico; significa que si la energía luminosa no está presente en un determinado lugar, por conservación de energía, debe estar en algún otro sitio. La descripción matemática del experimento de la doble rendija de Young nos indica que no hay energía luminosa en las franjas oscuras. La energía luminosa se distribuye y se ubica en las franjas brillantes. Esto también se observa en el caso de las ondas sonoras.

Ejemplo integrado 9.1 ■ Medición de la longitud de onda de la luz: experimento de la doble rendija de Young

En un experimento de laboratorio parecido al que se ilustra en la figura 9.4, una luz monocromática (luz que sólo tiene una longitud de onda o frecuencia) pasa por dos rendijas delgadas que están a 0.050 mm de distancia. En una pared blanca se observa la figura de interferencia, a 1.0 m de las rendijas, y se ve que la franja brillante de segundo orden forma un ángulo $\theta_2 = 1.5^\circ$. a) Si la distancia de separación entre las rendijas disminuye, la franja brillante de segundo orden formará un ángulo 1) mayor que 1.5° , 2) 1.5° , 3) menor que 1.5° . Explique su respuesta. b) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz y cuál es la distancia entre las franjas brillantes de segundo y tercer orden? c) Si $d = 0.040$ mm, ¿cuál es θ_2 ?

a) Razonamiento conceptual. De acuerdo con la condición para la interferencia constructiva, $d \sin \theta = n\lambda$, el producto de d y $\sin \theta$ es una constante, para una longitud de onda λ y un número de orden n . Por consiguiente, si d disminuye, $\sin \theta$ aumentará, al igual que θ . Así que la respuesta correcta es la 1.

(continúa en la siguiente página)

b) y c) Razonamiento cuantitativo y solución. La ecuación 9.3 servirá para calcular la longitud de onda. Como $L \gg d$, esto es, $1.0 \text{ m} \gg 0.050 \text{ mm}$, el ángulo θ es pequeño. Se podrían calcular y_2 y y_3 con la ecuación 9.4, para así determinar la distancia entre las franjas de segundo y de tercer orden ($y_3 - y_2$). Sin embargo, las franjas brillantes para determinada longitud de onda tienen separaciones uniformes (para θ pequeño). En general, la distancia entre las franjas brillantes adyacentes es constante.

Dado: $L = 1.0 \text{ m}$
 $n = 2$
 b) $\theta_2 = 1.5^\circ$
 $d = 0.050 \text{ mm} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ m}$
 c) $d = 4.0 \times 10^{-5} \text{ m}$

Encuentre: b) λ longitud de onda) y $y_3 - y_2$ (distancia entre $n = 2$ y $n = 3$)
 c) θ_2 si $d = 0.040 \text{ mm}$

b) Se aplica la ecuación 9.3:

$$\lambda = \frac{d \text{ sen } \theta}{n} = \frac{(5.0 \times 10^{-5} \text{ m}) \text{ sen } 1.5^\circ}{2} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 650 \text{ nm}$$

Este valor es 650 nm, que es la longitud de onda de una luz rojo anaranjada (véase la figura 6.23). Con el método general para n y $n + 1$, se obtiene

$$y_{n+1} - y_n = \frac{(n + 1)L\lambda}{d} - \frac{nL\lambda}{d} = \frac{L\lambda}{d}$$

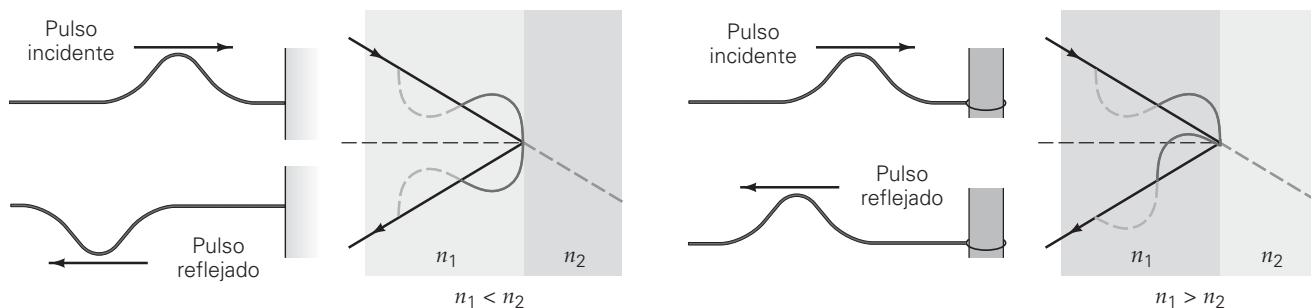
En este caso, la distancia entre las franjas sucesivas es

$$y_3 - y_2 = \frac{L\lambda}{d} = \frac{(1.0 \text{ m})(6.5 \times 10^{-7} \text{ m})}{5.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 1.3 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.3 \text{ cm}$$

c) $\text{sen } \theta_2 = \frac{n\lambda}{d} = \frac{(2)(650 \times 10^{-9} \text{ m})}{(4.0 \times 10^{-5} \text{ m})} = 0.0325$ de manera que $\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.0325) = 1.9^\circ > 1.5^\circ$.

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que se emplea luz blanca, en lugar de la luz monocromática en este ejemplo. ¿Cuál sería la separación entre los componentes rojo ($\lambda = 700 \text{ nm}$) y azul ($\lambda = 400 \text{ nm}$) en la franja de segundo orden? (Las respuestas de todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.)

▼ **FIGURA 9.5 Reflexión y cambios de fase** Los cambios de fase que sufren las ondas luminosas al reflejarse son análogos a los de los pulsos en cuerdas. **a)** La fase de un pulso en una cuerda se desplaza 180° al reflejarse en un extremo fijo, al igual que la fase de una onda luminosa cuando se refleja en un medio ópticamente más denso. **b)** Un pulso en una cuerda tiene un corrimiento de fase igual a cero (no se desplaza) cuando se refleja en un extremo libre. De forma análoga, una onda luminosa no varía en su fase cuando se refleja en un medio ópticamente menos denso.



a) Extremo fijo: cambio de fase de 180°

b) Extremo libre: cambio de fase igual a cero

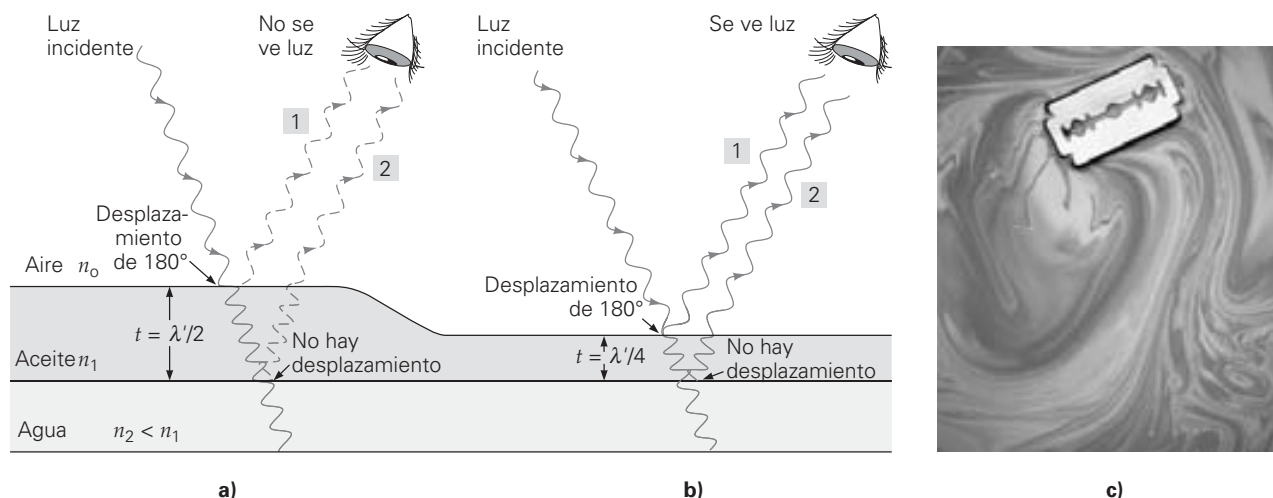
9.2 Interferencia en películas delgadas

OBJETIVOS: a) Describir cómo las películas delgadas producen figuras coloridas y b) dar algunos ejemplos de las aplicaciones prácticas de la interferencia en películas delgadas.

¿Alguna vez se ha preguntado qué es lo que causa los colores de arco iris, que se ven cuando se refleja luz blanca en una película delgada de aceite o en una burbuja de jabón? Este efecto se llama *interferencia en película delgada* y es un resultado de la interferencia de la luz que se refleja en las superficies opuestas de la película, y se comprende con facilidad en términos de interferencia de ondas.

Sin embargo, primero se necesita ver cómo se afecta la fase de una onda luminosa en la reflexión. Recuerde que, como vimos en el capítulo 11 de *Física 11*, un impulso ondulatorio en una cuerda sufre un cambio de fase de 180° [es decir, *de media onda*, $\lambda/2$] cuando se refleja en un soporte rígido, en tanto que no tiene desplazamiento de fase cuando se refleja en un soporte libre (▼ figura 9.5). De igual manera, como se ve en la figura, el cambio de fase para la reflexión de las ondas luminosas en una frontera depende de los índices de refracción (n) de los dos materiales:

- Una onda luminosa sufre un cambio de fase de 180° al reflejarse si $n_1 < n_2$.
- No hay cambio de fase en la reflexión si $n_1 > n_2$.



▲ **FIGURA 9.6 Interferencia en una película delgada** Para una película de aceite hay un desplazamiento de fase de 180° en la luz que se refleja en la interfase aire-aceite, y cambio de fase cero en la interfase aceite-agua. λ' es la longitud de onda en el aceite. **a)** La interferencia destructiva se presenta si la película de aceite tiene un espesor mínimo de $\lambda'/2$ para la incidencia normal. (Para tener mayor claridad, las ondas están desplazadas y en ángulo.) **b)** La interferencia constructiva se presenta con un espesor mínimo de película igual a $\lambda'/4$. **c)** Interferencia en la película delgada de una mancha de aceite. Los distintos espesores de la película originan reflexiones de distintos colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

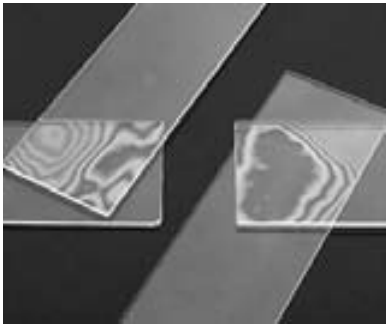
Para comprender por qué se ven los colores en una película de aceite (por ejemplo, cuando flota sobre el agua en el asfalto mojado), examinemos la reflexión de la luz monocromática en una película delgada, que se ilustra en la ▲ figura 9.6. La longitud de la trayectoria de la onda en la película depende del ángulo de incidencia (¿por qué?), pero, para simplificar, supondremos que la luz incide de forma normal (perpendicular), aun cuando los rayos se tracen formando un ángulo en la figura para tener mayor claridad.

La película de aceite tiene mayor índice de refracción que el aire, y la luz que se refleja en la interfase aire-aceite (en la figura, la onda 1) sufre un desplazamiento de 180° en su fase. Las ondas transmitidas pasan por la película de aceite, y se reflejan en la interfase aceite-agua. En general, el índice de refracción del aceite es mayor que el del agua (véase la tabla 7.1); esto es, $n_1 > n_2$, por lo que en este caso, una onda reflejada (onda 2) *no* sufre cambio de fase.

Quizá usted piense que si la longitud de trayectoria de la onda en la película de aceite ($2t$, el doble del espesor: hacia abajo y de regreso) fuera una cantidad entera de longitudes de onda [por ejemplo, $2t = 2(\lambda'/2)$ en la figura 9.6a, donde $\lambda' = \lambda/n$ es la longitud de onda en el aceite], entonces las ondas reflejadas en las dos superficies interferirían en forma constructiva. Pero tome en cuenta que la onda reflejada en la superficie superior (onda 1) experimenta un corrimiento de fase de 180° . Las ondas reflejadas en las dos superficies están, por consiguiente, *fuera de fase* para este espesor de película, e interfieren en forma destructiva. Esto quiere decir que con esta longitud de onda, no se ve la luz reflejada. (La luz no se transmite.)

De igual manera, si la longitud de la trayectoria de la onda en la película fuera un número impar de medias longitudes de onda [$2t = 2(\lambda'/4) = \lambda'/2$] en la figura 9.6b, de nuevo donde λ' es la longitud de onda en el aceite, entonces las ondas reflejadas en realidad estarían *en fase* (como resultado del corrimiento de 180° de la onda 1) e interferirían en forma constructiva. La luz de esta longitud de onda se vería al reflejarse en la película de aceite.

Como, en general, las películas de aceite y de jabón tienen distintos espesores en sus diferentes regiones, ciertas longitudes de onda (colores) de la luz blanca interfieren en forma constructiva en diversas regiones después de la reflexión. El resultado es que se produce una vívida demostración de varios colores (figura 9.6c), que puede cambiar si el espesor de la película varía al paso del tiempo. La interferencia en películas se aprecia cuando las caras de dos portaobjetos se pegan una con otra (▼ figura 9.7a). Los brillantes colores de las plumas de un pavo real constituyen un ejemplo de la interferencia en la naturaleza, y son el resultado de distintas capas de fibras. La luz que se refleja en las capas sucesivas interfiere en forma constructiva, produciendo colores brillantes, aunque las plumas no tienen pigmento propio. Puesto que la condición de interferencia constructiva depende del ángulo de incidencia, las pautas de color cambian al variar el ángulo de visión y el movimiento del ave (figura 9.7b).



a)



b)

▲ **FIGURA 9.7** Interferencia en una película delgada *a)* Una película delgada de aire entre los portaobjetos produce figuras de colores. *b)* La interferencia en varias capas de las plumas del pavo real origina brillantes colores. Los llamativos colores en el pecho de los colibríes también se producen así. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Una aplicación práctica de la interferencia en una película delgada son los recubrimientos antirreflectantes para las lentes (véase la sección A fondo, p. 250, sobre el tema). En este caso, se usa una cubierta de película para crear interferencia destructiva entre las ondas reflejadas, con la finalidad de *aumentar la transmisión de la luz* al vidrio (▼figura 9.8). El índice de refracción de la película es intermedio entre el del aire y el del vidrio ($n_0 < n_1 < n_2$). En consecuencia, en las superficies de la película y el vidrio se producen desplazamientos de fase de la luz incidente.

En este caso, la condición para que haya interferencia constructiva de la luz reflejada es

$$\Delta L = 2t = m\lambda' \quad \text{o} \quad t = \frac{m\lambda'}{2} = \frac{m\lambda}{2n_1} \quad m = 1, 2, \dots \quad \begin{array}{l} \text{condición para interferen-} \\ \text{cia constructiva cuando} \\ n_0 < n_1 < n_2 \end{array} \quad (9.5)$$

y la condición para la interferencia destructiva es

$$\Delta L = 2t = \frac{m\lambda'}{2} \quad \text{o} \quad t = \frac{m\lambda'}{4} = \frac{m\lambda}{4n_1} \quad m = 1, 3, 5, \dots \quad \begin{array}{l} \text{condición para inter-} \\ \text{ferencia destructiva} \\ \text{cuando } n_0 < n_1 < n_2 \end{array} \quad (9.6)$$

Así, el espesor *mínimo* de película para que haya interferencia destructiva es cuando $m = 1$, y entonces

$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} \quad \begin{array}{l} \text{espesor mínimo de película} \\ \text{(para } n_0 < n_1 < n_2) \end{array} \quad (9.7)$$

Si el índice de refracción de la película es mayor que el del aire y el del vidrio, entonces sólo la reflexión en la interfase aire-película tiene el desplazamiento de fase de 180° . En consecuencia, $2t = m\lambda'$ en realidad será para interferencia destructiva, y $2t = m\lambda'/2$ para interferencia constructiva. (¿Por qué?)

Ejemplo 9.2 ■ Recubrimientos antirreflectantes: interferencia en una película delgada

Una lente de vidrio ($n = 1.60$) se recubre con una película delgada y transparente de flúoruro de magnesio ($n = 1.38$) para que el vidrio no sea reflectante. *a)* ¿Cuál es el espesor mínimo de la película para que la lente no refleje la luz incidente de 550 nm de longitud de onda? *b)* Una película de 996 nm ¿hará no reflectante la lente?

Razonamiento. *a)* Se aplicará directamente la ecuación 9.7 para tener una idea del espesor mínimo de película para que el recubrimiento sea no reflectante. *b)* Se necesita determinar si 996 nm satisface la condición de la ecuación 9.6.

Solución.

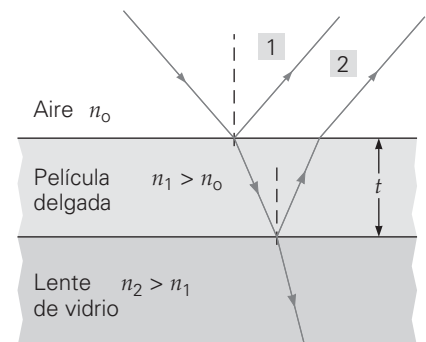
Dado: $n_0 = 1$ (aire) **Encuentre:** a) $t_{\text{mín}}$ (espesor mínimo de película)
 $n_1 = 1.38$ (película) b) determine si $t = 996$ nm da por
 $n_2 = 1.60$ (lente) resultado una lente no reflectante
 $\lambda = 550$ nm

a) Como $n_2 > n_1 > n_0$,

$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} = \frac{550 \text{ nm}}{4(1.38)} = 99.6 \text{ nm}$$

que es bastante delgada ($\approx 10^{-5}$ cm). En términos de átomos, cuyos diámetros son del orden de 10^{-10} m, o 10^{-1} nm, la película tiene 10^3 átomos de espesor.

► **FIGURA 9.8** Interferencia en una película delgada Para una película delgada sobre una lente de vidrio, hay un corrimiento de fase de 180° en cada interfase cuando el índice de refracción de la película es menor que el del vidrio. Las ondas reflejadas en las superficies superior e inferior de la película interfieren entre sí. Para mayor claridad se ha trazado un ángulo de incidencia grande, pero en realidad debe ser casi cero.



$$b) \quad t = 996 \text{ nm} = 10(99.6 \text{ nm}) = 10t_{\min} = 10\left(\frac{\lambda}{4n_1}\right) = 5\left(\frac{\lambda}{2n_1}\right)$$

Esto significa que el espesor de la película *no* satisface la condición necesaria para que la lente sea no reflectante (interferencia destructiva). En realidad, satisface el requisito para interferencia constructiva (ecuación 9.5) con $m = 5$. Ese recubrimiento, específico para radiación infrarroja en ventanas de automóviles y de casas, podría ser útil en climas cálidos porque maximiza la reflexión y minimiza la transmisión.

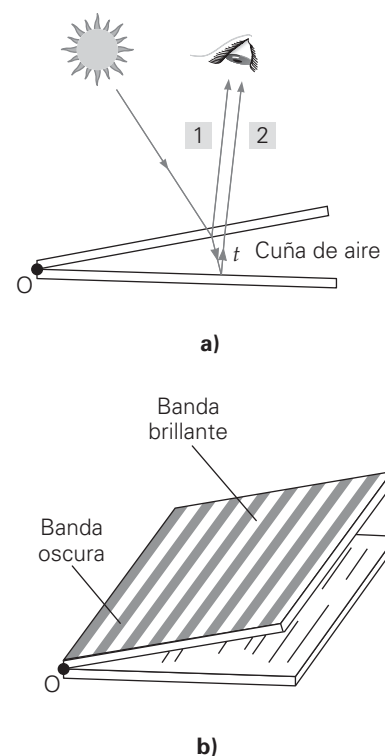
Ejercicio de refuerzo. Para que la lente de vidrio de este ejemplo refleje y no transmita la luz incidente, ¿cuál sería el espesor de película mínimo?

Planos ópticos y anillos de Newton

Se puede aprovechar el fenómeno de la interferencia en una película delgada para comprobar la lisura y la uniformidad de componentes ópticos, como espejos y lentes. Los *planos ópticos* se fabrican tallando y puliendo placas de vidrio hasta que queden tan planas como sea posible. (La rugosidad de la superficie, por lo regular, es del orden de $\lambda/20$.) Para comprobar qué tan planas son esas placas, se colocando juntas dos de ellas formando un ángulo pequeño, de manera que entre ambas quede una cuña de aire muy delgada (►figura 9.9a). Las ondas reflejadas de las placas superior (onda 1) e inferior (onda 2) interfieren entre sí. Note que la onda 2 tiene un desplazamiento de fase de 180° al reflejarse en una interfase aire-placa. En consecuencia, en cierto punto a alguna distancia de donde se tocan las dos placas (el punto O), la condición para interferencia constructiva es $2t = m\lambda/2$ ($m = 1, 3, 5, \dots$), y la condición para interferencia destructiva es $2t = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$). El espesor t determina la clase de interferencia (constructiva o destructiva). Si las placas son lisas y planas, aparece una figura regular de interferencia, de franjas o bandas brillantes y oscuras (figura 9.9b). Esta figura es el resultado de las diferencias de longitud de trayectoria entre las placas, que varía de manera uniforme. Toda irregularidad en la figura indica que hay una irregularidad al menos en una placa. Una vez que se ha comprobado que una superficie es ópticamente plana, se podrá utilizar para comprobar qué tan plana es una superficie reflectora, como la de un espejo de precisión.

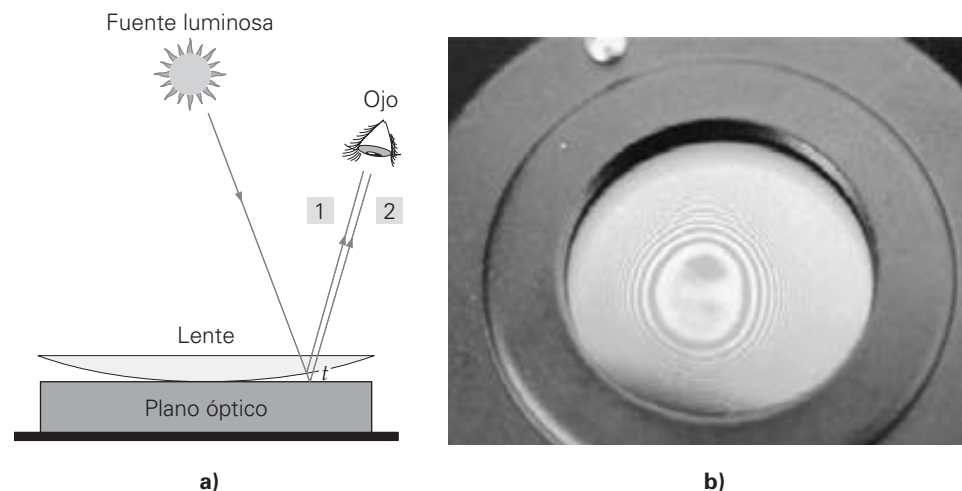
En la figura 9.9 se aprecia una prueba directa del desplazamiento de fase en 180° , que se describió antes. En el punto donde se tocan las dos placas ($t = 0$), se ve una banda *oscura*. Si no hubiera desplazamiento de fase, $t = 0$ correspondería a $\Delta L = 0$, y aparecería una banda brillante. El hecho de que se vea una banda oscura en este punto demuestra que hay un desplazamiento de fase en la reflexión en un material ópticamente más denso.

Para comprobar la lisura y la simetría de las lentes se emplea una técnica similar. Cuando se coloca una lente curva sobre un plano óptico, se forma una cuña de aire de simetría radial entre ésta y el plano óptico (▼figura 9.10a). Como el espesor de esa cuña determina la condición para que haya interferencia constructiva y destructiva, en este caso la figura regular de interferencia es un conjunto de franjas concéntricas brillantes y oscuras (figura 9.10b). Se llaman *anillos de Newton*, en honor de Isaac Newton,



▲ FIGURA 9.9 Planos ópticos

a) Un plano óptico se usa para comprobar la lisura de una superficie reflectante. El plano se coloca de forma que quede una cuña de aire entre él y la superficie. Las ondas reflejadas en las dos placas interfieren entre sí, y el espesor de la cuña de aire en ciertos puntos determina si se ven bandas brillantes u oscuras. b) Si la superficie es lisa, se ve una figura regular o simétrica de interferencia. Observe que hay una banda oscura en el punto O donde $t = 0$.



◀ FIGURA 9.10 Anillos de Newton

a) Una lente colocada sobre un plano óptico forma una cuña de aire anular, que origina interferencia de las ondas reflejadas en la parte superior (onda 1) y la parte inferior (onda 2) de esa cuña. b) La figura de interferencia que resulta es un conjunto de anillos concéntricos, llamados *anillos de Newton*. Observe que en el centro de la figura hay una mancha oscura. Las irregularidades de la lente producen una figura distorsionada. (Véase el pliego a color al final del libro.)

A FONDO 9.1 LENTES NO REFLECTANTES

Tal vez haya notado la tonalidad azul-púrpura de las lentes recubiertas que se usan en cámaras y binoculares. El recubrimiento hace que las lentes sean “antirreflectantes”. Si una lente es del tipo antirreflectante, la luz que le llega se transmite en su mayor parte a través de ella. Es preferible que la transmisión de la luz sea máxima para reducir la exposición de la película fotográfica, y para ver con detalle los objetos a través de los binoculares.

En una interfase aire-vidrio, por lo regular se refleja el 4% de la luz y se transmite el 96%. Por ejemplo, una lente fotográfica moderna se fabrica con un grupo de lentes (elementos) para reducir al mínimo las aberraciones y mejorar la calidad de la imagen. Por ejemplo, una lente zoom de 35-70 mm consta de 13 elementos, es decir, tiene 26 superficies reflectoras.

Después de una reflexión se transmite el $0.96 = 96\%$ de la luz. Después de dos reflexiones, esto es, al atravesar un elemento, se transmite el $0.96 \times 0.96 = 0.96^2 = 0.92$ o 92% de la luz incidente. Después de 26 reflexiones, la luz transmitida sólo es el $0.96^{26} = 0.35$ o 35% de la luz incidente, si las lentes tienen recubrimiento. Por consiguiente, casi todas las lentes modernas están recubiertas con películas no reflectantes.

Una lente se hace no reflectante recubriéndola con una película delgada de un material cuyo índice de refracción sea intermedio entre los del aire y del vidrio (figura 9.8). Si el recubrimiento tiene un cuarto de longitud de onda de espesor ($\lambda'/4$), la diferencia en longitudes de trayectoria de los rayos reflejados es $\lambda'/2$, donde λ' es la longitud de onda de la luz en el recubrimiento. Ambas ondas reflejadas experimentan un desplazamiento de fase y están fuera de fase cuando la diferencia de longitudes de trayectoria es $\lambda'/2$; entonces, interfieren destructivamente. Esto es, se transmite la luz incidente y la lente recubierta es no reflectante.

Note que el espesor real de una película de un cuarto de onda es específico de determinada longitud de onda. Por lo general, se escoge el espesor como un cuarto de longitud de onda de la luz verde amarillenta ($\lambda \approx 550$ nm), a la cual el ojo humano es más sensible. Las longitudes de onda en los extremos rojo y azul de la región visible siguen reflejándose parcialmente, lo que da a la lente recubierta una tonalidad azul-púrpura (figura 1). A veces se escogen otros espesores de cuarto de onda, que originan otros matices, como ámbar o púrpura rojizo, dependiendo de la aplicación de las lentes.

También se aplican recubrimientos antirreflectantes a las superficies de las celdas solares. Como el espesor de ese recubrimiento depende de la longitud de onda, las pérdidas por reflexión se pueden reducir desde un 30 hasta un 10%. De esta forma, el proceso mejora la eficiencia de la celda.



FIGURA 1 Lentes recubiertas El recubrimiento no reflectante de las lentes de binoculares y cámaras produce, en general, una tonalidad azul-púrpura. (¿Por qué?) (Véase el pliego a color al final del libro.)

quien fue el primero en describir este efecto de la interferencia. Note que en el punto donde se tocan la lente y el plano óptico ($t = 0$), de nuevo hay una mancha oscura. (¿Por qué?) Las irregularidades de las lentes dan lugar a una figura distorsionada de bandas, y con los radios de esos anillos se calcula el radio de curvatura de la lente.

▼ **FIGURA 9.11 Refracción de las olas del mar** Esta fotografía de una playa muestra con claridad la difracción de las olas del mar en una sola rendija, como la que hay en las aberturas de la barrera. Note que los frentes de onda circulares han moldeado la playa. (Véase el pliego a color al final del libro.)

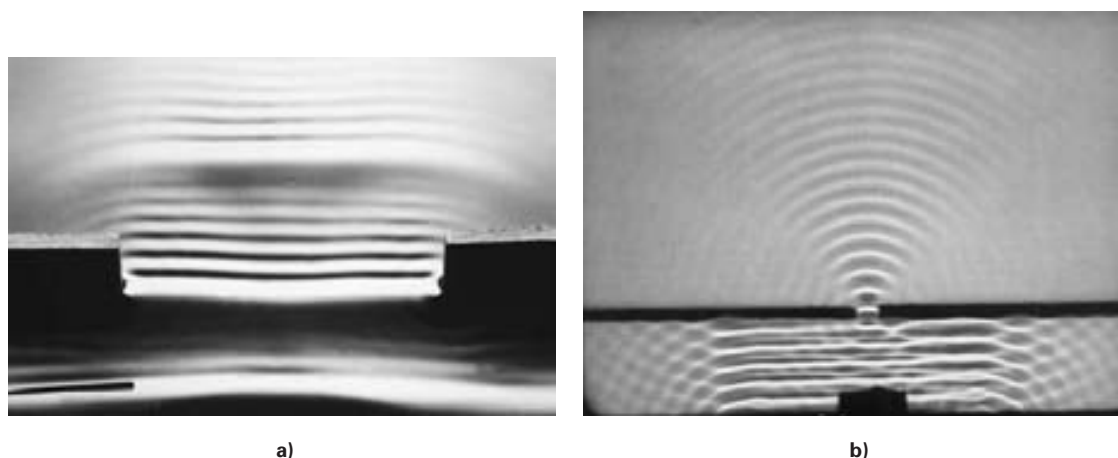


9.3 Difracción

OBJETIVOS: a) Definir la difracción y b) describir ejemplos de efectos de difracción.

En la óptica geométrica, la luz se representa con rayos y se describe como si se propagara en líneas rectas. Sin embargo, si este modelo representara la naturaleza real de la luz, no habría efectos de interferencia en el experimento de Young de la doble rendija. En lugar de ello, sólo habría dos imágenes brillantes de ranuras en la pantalla, con una zona bien definida de sombra, donde no entraría la luz. Pero el hecho es que *sí* se ven figuras de interferencia, lo que significa que la luz se desvía de una trayectoria en línea recta para entrar en regiones que, de otra forma, estarían en la penumbra. En realidad, las ondas “se despliegan” al pasar por las rendijas; a este despliegue de la onda luminosa se le llama **difracción**. En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de aberturas pequeñas, o cuando rodean aristas agudas. En la figura 9.11 se observa la difracción de las olas del mar. (Véase también la figura 11.18 de *Física 11*.)

Como se ve en la figura 11.18 de *Física 11*, la cantidad de difracción depende de la longitud de la onda, en relación con el tamaño de la abertura o del objeto. En general, *cuanto mayor sea la longitud de onda en comparación con la abertura u objeto, mayor será la difracción*. Este principio se ve también en la figura 9.12. Por ejemplo, en la figura 9.12a, el ancho de la abertura w es mucho mayor que la longitud de onda ($w \gg \lambda$), y hay poca difracción: la onda sigue avanzando sin extenderse mucho. (También existe algún grado de difracción en torno a las orillas de la abertura.) En la figura 9.12b, donde la longitud de onda y el ancho de la abertura son del mismo orden de magnitud ($w \approx \lambda$),



▲ **FIGURA 9.12 Dimensiones de la longitud de onda y de la abertura** En general, cuanto más angosta es la abertura en comparación con la longitud de onda, mayor es la difracción. **a)** Sin mucha difracción ($w \gg \lambda$), la onda sigue propagándose en su dirección original. **b)** Con difracción apreciable ($w \approx \lambda$), la onda se desvía en torno a la abertura y se difunde.

hay una difracción apreciable: la onda se extiende hacia fuera y se desvía de su dirección original de propagación. Parte de ella sigue propagándose en su dirección original, pero el resto *da vuelta* a la abertura y se extiende claramente en muchas direcciones.

La difracción del sonido es muy evidente. Cuando alguien le habla a uno desde otra habitación, o a la vuelta de la esquina de una construcción, aun en ausencia de reflexiones se le puede oír con claridad. Las ondas sonoras tienen longitudes del orden de centímetros a metros. Por ello, el ancho de los diversos objetos y aberturas son más o menos iguales, o más angostos, que las longitudes de las ondas sonoras y por ello la difracción se presenta con facilidad en el sonido.

Sin embargo, las ondas de la luz visible tienen longitudes del orden de 10^{-7} m. Por eso, los fenómenos de difracción en ellas a menudo pasan desapercibidos, en especial cuando se realizan a través de grandes aberturas, como las puertas, donde el sonido fácilmente se difracta. Sin embargo, al examinar con cuidado el área en torno de una hoja de afeitar afilada, se verá una figura de franjas brillantes y oscuras (►figura 9.13). La difracción puede conducir a la interferencia, y estas figuras de interferencia son la evidencia de la difracción de la luz en torno a la orilla del objeto.

Como ejemplo de la difracción en “una rendija”, considere una rendija en una barra (▼figura 9.14). Supongamos que la rendija (de ancho w) se ilumina con luz monocromática. En una pantalla que está a la distancia L de la rendija (se supone que $L \gg w$), aparece una figura de difracción, formada por un máximo central brillante y un conjunto simétrico de franjas brillantes (regiones de interferencia constructiva) en ambos lados.

Así, una figura de difracción es el resultado del hecho de que varios puntos en el frente de onda que pasan a través de la rendija se consideran como pequeñas fuentes luminosas puntuales. La interferencia de esas ondas origina la *difracción* máxima y mínima.

Sin embargo, no se presentará aquí todo ese análisis complejo. A partir de consideraciones geométricas se pueden ver los mínimos (regiones de interferencia destructiva) satisfacen la relación

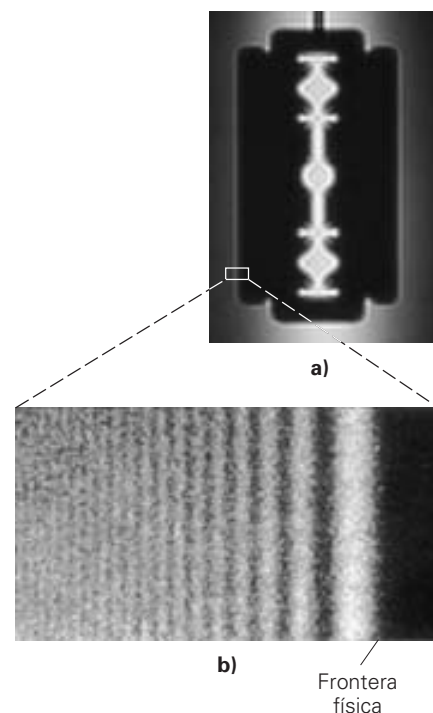
$$w \sin \theta = m\lambda \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{condición para los mínimos} \quad (9.8)$$

donde θ es el ángulo de determinados mínimos, que se designa como $m = 1, 2, 3, \dots$, en cualquier lado del máximo central, y m se llama número de orden. (No hay $m = 0$. ¿Por qué?)

Aunque el resultado anterior tiene una forma muy parecida a la del experimento de Young de doble rendija (ecuación 9.3), es muy importante hacer notar que para el experimento de una sola rendija se analizan las franjas oscuras, y no las franjas brillantes. Note también que el ancho de la rendija (w) aparece en la difracción. Físicamente, ésta es una difracción a partir de una sola rendija, y *no* una interferencia a partir de dos rendijas.

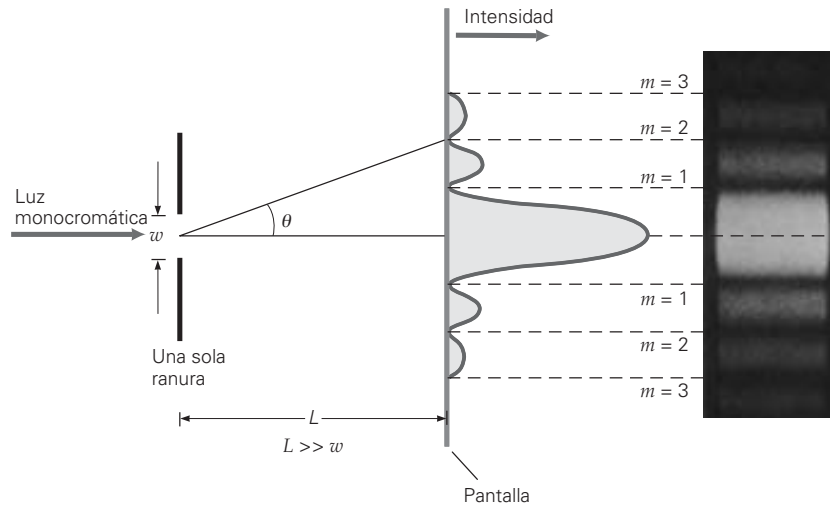
La aproximación $\sin \theta \approx y/L$, para ángulos pequeños, se utiliza cuando $y \ll L$. En este caso, las distancias de los mínimos relativos en ambos lados del centro del máximo central se determinan:

$$y_m = m \left(\frac{L\lambda}{w} \right) \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \dots \quad \text{ubicación de los mínimos} \quad (9.9)$$



▲ **FIGURA 9.13 La difracción en acción** **a)** Figuras de difracción producidas por una hoja de afeitar. **b)** Acercamiento de las franjas que se forman en el filo de la navaja.

► **FIGURA 9.14** Difracción en una sola rendija La difracción de la luz por una sola rendija origina una figura de difracción formada por un máximo central grande y brillante, y un conjunto simétrico de franjas brillantes laterales. El número de orden m corresponde a los mínimos, es decir, a las franjas oscuras. (Véase la descripción en el texto.)



Las predicciones cualitativas de la ecuación 9.9 son bastante interesantes e instructivas:

- Para determinado ancho de rendija (w), cuanto mayor sea la longitud de onda (λ), más ancha (o más extendida) será la figura de difracción.
- Para determinada longitud de onda (λ), cuanto menor sea el ancho de la rendija (w), más ancha será la figura de difracción.
- El ancho del máximo central es el doble del ancho de los máximos laterales.

Examinemos con detenimiento cada una de estas predicciones. Conforme la rendija se hace más angosta, el máximo central y las franjas laterales se distribuyen y se agrandan. La ecuación 9.9 no es aplicable a rendijas muy angostas (por la aproximación para ángulos pequeños). Si el ancho de la rendija disminuye hasta que tiene el mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz, el máximo central se reparte en toda la pantalla. Esto es, la difracción se hace evidente de forma drástica, cuando el ancho de la rendija es aproximadamente igual que la longitud de onda de la luz que se usa. Los efectos de la difracción se observan con más facilidad cuando $\lambda/w \approx 1$ o $w \approx \lambda$.

A la inversa, si la rendija se hace más ancha para determinada longitud de onda de la luz, la figura de difracción se hace más angosta. Las franjas brillantes se acercan entre sí, y al final es difícil distinguir las cuando w es mucho mayor que λ ($w \gg \lambda$). Entonces la figura parece como una sombra difusa en torno al máximo central, que es la imagen iluminada de la rendija. Este tipo de figura se observa cuando la imagen de la luz solar entra a un cuarto oscuro por un agujero en una cortina. Esa observación fue la que condujo a los primeros experimentadores a investigar la naturaleza ondulatoria de la luz. La aceptación de este concepto se debió, en gran parte, a la explicación de la difracción que ofrecía la óptica física.

El máximo central tiene el doble del ancho que las franjas brillantes laterales. Si se supone que el ancho del máximo central es la distancia entre los mínimos o franjas oscuras que lo rodean a cada lado ($m = 1$), es decir, si tiene un valor de $2y_1$, a partir de la ecuación 9.9, con $y_1 = L\lambda/w$, se obtiene

$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} \quad \text{ancho del máximo central} \quad (9.10)$$

De forma similar, el ancho de las franjas brillantes laterales se determina con

$$y_{m+1} - y_m = (m + 1) \left(\frac{L\lambda}{w} \right) - m \left(\frac{L\lambda}{w} \right) = \frac{L\lambda}{w} = y_1 \quad (9.11)$$

Por lo anterior, el ancho del máximo central es el doble del de las franjas laterales.

Ejemplo conceptual 9.3 ■ La difracción y la radiorrecepción

Tal vez usted haya notado que al conducir con la radio encendida, en la ciudad o en zonas montañosas, que en ciertas bandas la calidad de la recepción del radio varía mucho de un lugar a otro; la señal de algunas estaciones se pierde de repente y luego reaparece. ¿La difracción podría ser la causa de esto? ¿Cuál de las siguientes bandas será probablemente la menos afectada? a) Meteorológica (162 MHz); b) FM (88-108 MHz); c) AM (525-1610 kHz).

Razonamiento y respuesta. Las ondas de radio, al igual que las de luz, son ondas electromagnéticas, por lo que tienden a propagarse en líneas rectas, a grandes distancias de sus fuentes. En su trayectoria es probable que se encuentren con objetos que las bloqueen, en especial si éstos son masivos (como montañas y edificios).

Sin embargo, a causa de la difracción, las ondas de radio también pueden “rodear” obstáculos, o “difundirse” al pasar por obstáculos y aberturas, *siempre y cuando* su longitud de onda sea por lo menos del tamaño aproximado del obstáculo o abertura. Cuanto mayor sea la longitud de onda, mayor será la difracción, y habrá *menos probabilidad* de que las ondas de radio resulten obstruidas.

Para determinar qué banda aprovecha más esa difracción es necesario calcular las longitudes de onda correspondientes a las frecuencias dadas, con la relación $c = \lambda f$. Al hacerlo, se ve que las ondas de AM, con $\lambda = 186$ a 571 m son las más largas de las tres bandas (por un factor aproximado de 100). En consecuencia, la conclusión es que las transmisiones de AM son las que tienen más probabilidad de difractarse en torno a objetos como edificios o montañas, o a través de las aberturas entre ellos. Así que la respuesta correcta es la c.

Ejercicio de refuerzo. Los instrumentos de viento, como el clarinete y la flauta, tienen aberturas de menor tamaño que los metales, como la trompeta y el trombón. Durante el medio tiempo de un partido de fútbol, cuando la banda musical está frente a uno, el sonido de los instrumentos de viento y los metales se escucha con facilidad. Sin embargo, cuando la banda se aleja, se opacan los metales, pero los instrumentos de viento se escuchan bastante bien. ¿Por qué?

Ejemplo integrado 9.4 ■ Ancho de un máximo central: difracción en una sola rendija

Una luz monocromática pasa por una rendija de 0.050 mm de ancho. a) La figura de difracción, en general, es 1) más grande para mayores longitudes de onda, 2) más grande para menores longitudes de onda, 3) igual para todas las longitudes de onda. Explique por qué. b) ¿A qué ángulo se verá el tercer mínimo y cuál es el ancho del máximo central, en una pantalla que está a 1.0 m de la rendija, para $\lambda = 400$ y 550 nm, respectivamente?

a) Razonamiento conceptual. El tamaño general de la figura de difracción se caracteriza por la posición de una franja brillante u oscura en particular. De acuerdo con la ecuación 9.8, se ve que para un ancho w y un número de orden m dados, la posición de un mínimo θ es directamente proporcional a la longitud de onda λ . Por lo tanto, una mayor longitud de onda corresponderá a un mayor $\sin \theta$ o a un mayor θ , y la respuesta correcta es la 1.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Esta parte es una aplicación directa de la ecuación 9.8 y 9.10.

Dado: $\lambda_1 = 400$ nm = 4.00×10^{-7} m **Encuentre:** θ_3 y $2y_1$ (ancho del máximo central)
 $\lambda_2 = 550$ nm = 5.50×10^{-7} m
 $w = 0.050$ mm = 5.0×10^{-5} m
 $m = 3$
 $L = 1.0$ m

Para $\lambda = 400$ nm:

De acuerdo con la ecuación 9.8, tenemos

$$\sin \theta_3 = \frac{m\lambda}{w} = \frac{3(4.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{5.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 0.024 \quad \text{así que} \quad \theta_3 = \sin^{-1} 0.024 = 1.4^\circ$$

La ecuación 9.10 nos da

$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} = \frac{2(1.0 \text{ m})(4.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{5.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 1.6 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.6 \text{ cm}$$

Para $\lambda = 700$ nm:

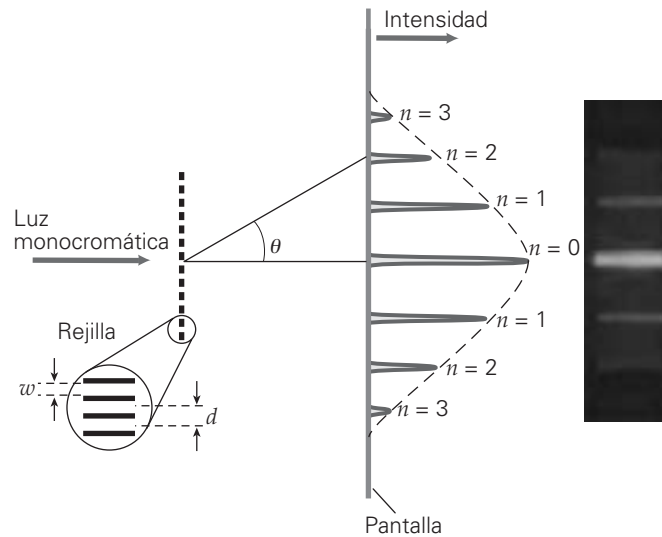
$$\sin \theta_3 = \frac{m\lambda}{w} = \frac{3(5.50 \times 10^{-7} \text{ m})}{5.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 0.033 \quad \text{de manera que} \quad \theta_3 = \sin^{-1} 0.033 = 1.9^\circ$$

$$2y_1 = \frac{2L\lambda}{w} = \frac{2(1.0 \text{ m})(5.50 \times 10^{-7} \text{ m})}{5.0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.2 \text{ cm}$$

Ejercicio de refuerzo. ¿Por qué factor cambiaría el ancho del máximo central si en este ejemplo se usara luz roja ($\lambda = 700$ nm) en lugar de 550 nm?

► **FIGURA 9.15** Rejilla de difracción

Una rejilla de difracción produce una figura de interferencia y difracción con mucha definición. Son dos los parámetros que definen una rejilla: la distancia d entre rendijas y el ancho w de una rendija. La combinación de interferencia por múltiples rendijas y la difracción por una sola rendija determinan la distribución de intensidades de los distintos órdenes de máximos.



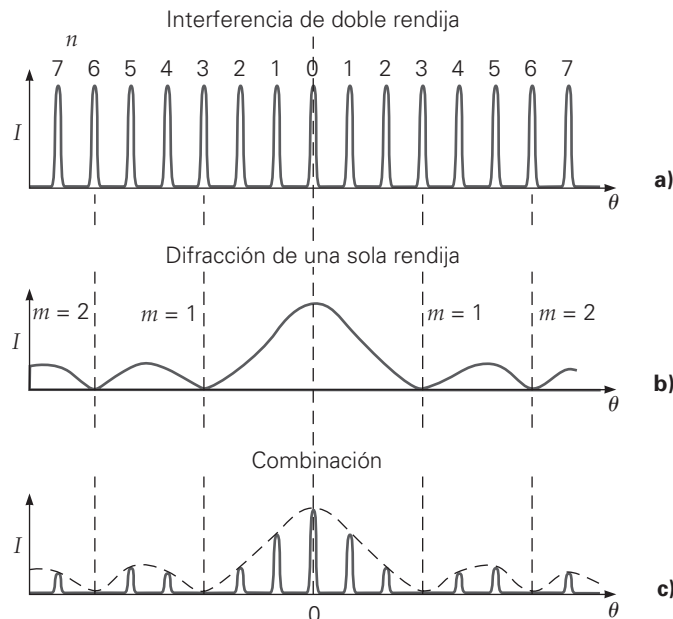
Rejillas de difracción

Las franjas brillantes y oscuras son el resultado de la difracción, acompañada por la interferencia cuando la luz monocromática atraviesa un conjunto de rendijas dobles. Al aumentar la cantidad de rendijas, las franjas brillantes se vuelven más agudas (más angostas) y las franjas oscuras se hacen más anchas. Las franjas brillantes son muy útiles en el análisis óptico de fuentes luminosas, así como en otras aplicaciones. En la **figura 9.15** se ve un experimento típico con luz monocromática que incide en una **rejilla de difracción**, formada por grandes cantidades de rendijas paralelas, muy cercanas entre sí. Hay dos parámetros que definen una rejilla de difracción: la separación d entre dos rendijas sucesivas y el ancho w de cada rendija. La figura resultante de la interferencia y la difracción se presenta en la **figura 9.16**.

Las primeras rejillas de difracción se fabricaban con hilos de alambre. Sus efectos eran similares a lo que se aprecia cuando se ve la llama de una vela a través de una pluma cercana al ojo. Las mejores rejillas tienen una gran cantidad de líneas o ranuras finas, sobre superficies de vidrio o de metal. Si se transmite la luz a través de la rejilla, se tiene una *rejilla de transmisión*. Sin embargo, también son frecuentes las *rejillas de reflexión*. Los surcos cercanos de un disco compacto o de un DVD actúan como rejilla de reflexión, lo que le da su característico brillo iridiscente (**figura 9.17**). Para fabricar las rejillas maestras comerciales se deposita una capa delgada de aluminio sobre una superficie ópticamente plana y luego se elimina parte del metal reflector cortando lí-

► **FIGURA 9.16** Distribución de intensidades en la interferencia y la difracción

a) La interferencia determina las posiciones de los máximos de interferencia: $d \sin \theta = n\lambda$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ **b)** La difracción localiza las posiciones de los mínimos de difracción: $w \sin \lambda = m\lambda$, $m = 1, 2, 3, \dots$, y la intensidad relativa de los máximos. **c)** La combinación (el producto) de la interferencia y la difracción determina la distribución de la intensidad de las franjas.



neas paralelas a distancias regulares. Las rejillas de difracción de precisión se fabrican con dos rayos láser coherentes que se cruzan formando un ángulo. Los rayos dejan expuesto un material fotosensible, que después se graba. La distancia entre las líneas de la rejilla queda determinada por el ángulo de intersección de los rayos. Las rejillas de precisión tienen 30 000 líneas por centímetro o más, por lo que son costosas y difíciles de fabricar. La mayor parte de las rejillas que se usan en los instrumentos de laboratorio son *réplicas*, coladas en plástico en rejillas maestras de alta precisión.

Se puede demostrar que la condición para los máximos de interferencia de una rejilla iluminada con luz monocromática es idéntica a la de las dobles rendijas. La ecuación es

$$d \sin \theta = n\lambda \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{máximos de interferencia} \quad (9.12)$$

donde n es el llamado *máximo de orden de interferencia* y θ es el ángulo en el que se presenta ese máximo para determinada longitud de onda. El máximo de orden cero coincide con el máximo central de la figura de difracción. La distancia d entre ranuras adyacentes se obtiene a partir de la cantidad de líneas o ranuras por unidad de longitud de la rejilla: $d = 1/N$. Por ejemplo, si $N = 5000$ líneas/cm, entonces

$$d = \frac{1}{N} = \frac{1}{5000/\text{cm}} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

Si la luz que incide en una rejilla es blanca (policromática), las franjas son de varios colores (▼ figura 9.18a). No hay desviación de los componentes de la luz para el orden cero ($\sin \theta = 0$ para todas las longitudes de onda), por lo que el máximo central es blanco. Sin embargo, los colores se separan en los órdenes superiores, porque la posición del máximo depende de la longitud de onda (ecuación 9.12). La mayor longitud de onda tiene un θ mayor y esto produce un espectro. Note que es posible que se traslapen los órdenes superiores que se producen en una rejilla de difracción. En otras palabras, es posible que los ángulos de distintos órdenes sean iguales para dos longitudes de onda diferentes.

Sólo se puede ver una cantidad limitada de órdenes espectrales cuando se usa una rejilla de difracción. Esa cantidad depende de la longitud de onda de la luz y del espaciamiento d de la rejilla. De acuerdo con la ecuación 9.12, como $\sin \theta$ no puede exceder los 90° (esto es, $\sin \theta \leq 1$), tenemos

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{d} \leq 1 \quad \text{o} \quad n_{\text{máx}} \leq \frac{d}{\lambda}$$

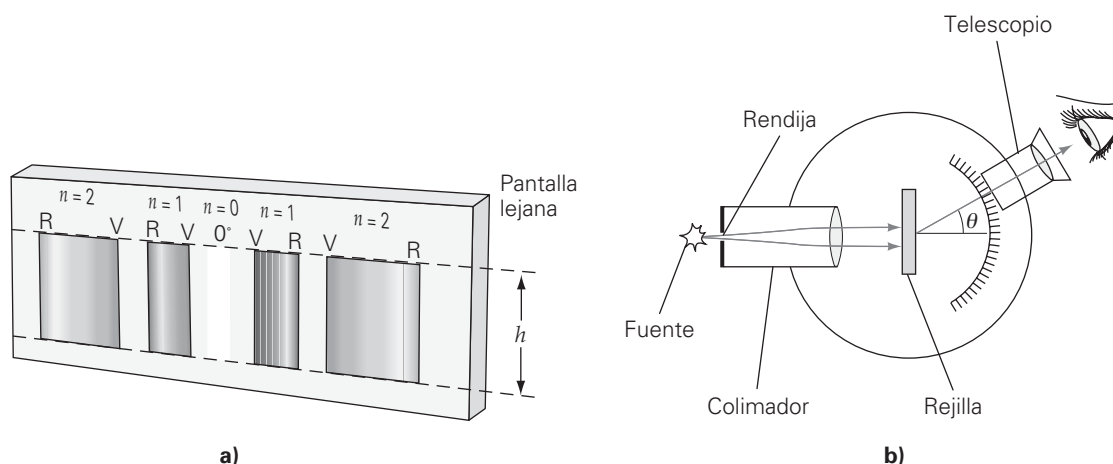
Las rejillas de difracción han reemplazado casi por completo a los prismas en espectroscopia. La creación de un espectro y la medición de longitudes de onda mediante una rejilla sólo dependen de medidas geométricas, como longitudes y/o ángulos. En contraste, la determinación de la longitud de onda con un prisma depende de las características dispersoras del material con que esté hecho el prisma. Así, es fundamental conocer con precisión la dependencia entre el índice de refracción y la longitud de onda de la luz. A diferencia de un prisma, que desvía menos la luz roja y más la violeta, una rejilla de difracción produce el ángulo mínimo con la luz violeta (λ corta) y el máximo con la roja (λ larga). Hay que advertir que un prisma dispersa la luz blanca y



▲ **FIGURA 9.17** Efectos de la difracción Las ranuras angostas de los discos compactos (CD) actúan como rejillas de difracción y producen un despliegue de colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Nota: d es la distancia entre rendijas adyacentes.

▼ **FIGURA 9.18** Espectroscopia **a)** En cada franja brillante lateral se separan los componentes de distintas longitudes de onda (R = rojo y V = violeta), porque la desviación depende de la longitud de onda: $\theta = \sin^{-1}(n\lambda/d)$. **b)** Por esta razón, se usan rejillas en los espectrómetros para determinar las longitudes de onda presentes en un rayo de luz, midiendo sus ángulos de difracción y separando las diversas longitudes de onda para su análisis posterior. (Véase el pliego a color al final del libro.)



forma un solo espectro. Sin embargo, una rejilla de difracción produce varios espectros, uno para cada orden distinto de $n = 0$, y cuanto más alto sea el orden, mayor será la dispersión.

Los espectros nítidos que producen las rejillas de difracción se usan en los instrumentos llamados *espectrómetros* (figura 9.18b). En un espectrómetro se iluminan materiales con luz de diversas longitudes de onda, para determinar cuáles de ellas se transmiten o se reflejan con intensidad. Entonces se mide su absorción para determinar las características del material.

Ejemplo 9.5 ■ Una rejilla de difracción: distancia entre líneas y órdenes espectrales

Determinada rejilla de difracción produce un orden espectral $n = 2$ a un ángulo de 30° , con luz de 500 nm de longitud de onda. a) ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla? b) ¿A qué ángulo se debe ver el orden espectral $n = 3$?

Razonamiento. a) Para calcular la cantidad de líneas por centímetro (N) que tiene la rejilla, se necesita conocer la distancia entre líneas d , ya que $N = 1/d$. Con los datos del problema se puede calcular d mediante la ecuación 9.12. b) Aplicando de nuevo la ecuación 9.12, se calcula θ para $n = 3$.

Solución.

Dado: $\lambda = 500 \text{ nm} = 5.00 \times 10^{-7} \text{ m}$ **Encuentre:** a) N (líneas/cm)
 $n = 2$ b) θ para $n = 3$
 $\theta = 30^\circ$ para $n = 2$

a) Se sustituyen datos en la ecuación 9.12 para calcular la distancia entre líneas:

$$d = \frac{n\lambda}{\sin \theta} = \frac{2(5.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{\sin 30^\circ} = 2.00 \times 10^{-6} \text{ m} = 2.00 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

Entonces

$$N = \frac{1}{d} = \frac{1}{2.00 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 5000 \text{ líneas/cm}$$

b)

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{d} = \frac{3(5.00 \times 10^{-7} \text{ m})}{2.00 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.75$$

de manera que

$$\theta = \sin^{-1} 0.75 = 48.6^\circ$$

Ejercicio de refuerzo. Si se utilizara luz blanca con longitud de onda entre 400 y 700 nm, ¿cuál sería el ancho angular del espectro para el segundo orden?

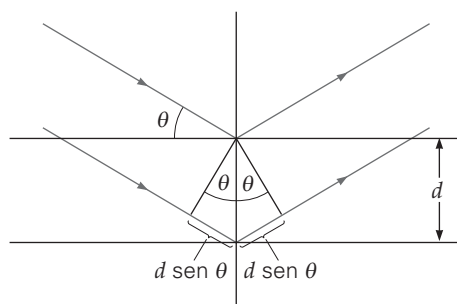
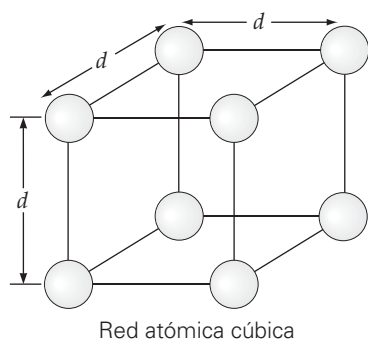
Difracción de rayos X

En principio, es posible calcular la longitud de cualquier onda electromagnética con una rejilla de difracción que tenga la separación adecuada entre ranuras. A principios del siglo XX se usó la difracción para determinar las longitudes de onda de los rayos X. Las pruebas experimentales indicaban que era probable que esas longitudes de onda fueran aproximadamente de 10^{-10} m o 0.1 nm, pero sería imposible construir una rejilla de difracción con este espaciamiento. El físico alemán Max von Laue (1879-1960) sugirió que las distancias regulares entre los átomos de un sólido cristalino podrían hacer que el cristal funcionara como rejilla de difracción para los rayos X, ya que el espaciamiento atómico en los cristales es del orden de 0.1 nm (►figura 9.19). Cuando se dirigieron rayos X hacia cristales, se observaron figuras de difracción (véase la figura 9.19b).

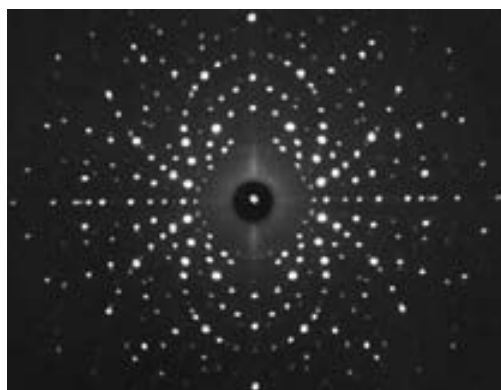
La figura 9.19a ilustra la difracción que causan los planos de átomos en un cristal como el del cloruro de sodio. La diferencia entre longitudes de trayectoria es $2d \sin \theta$, donde d es la distancia entre los planos internos del cristal. Así, la condición para la interferencia constructiva es

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad \begin{array}{l} \text{interferencia constructiva} \\ \text{difracción de rayos X} \end{array} \quad (9.13)$$

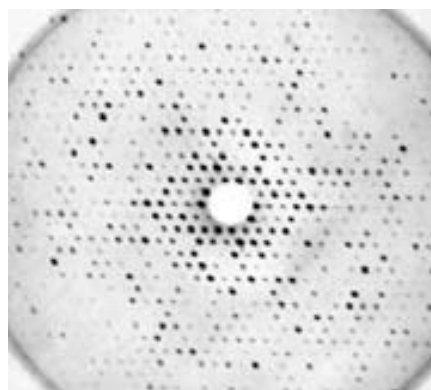
A esta relación se le llama **ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), el físico inglés que la dedujo. Note que θ no se mide a partir de la normal, como es la convención en óptica.



a)



b)



c)

◀ **FIGURA 9.19** Difracción en cristales *a)* El conjunto de átomos en una estructura de red cristalina funciona como rejilla de difracción, y los rayos X se difractan en los planos de los átomos. Cuando el espaciamiento en la red es d , la diferencia de longitudes de trayectoria de los rayos X difractados en planos adyacentes es $2d \sin \theta$. *b)* Figura de difracción de rayos X en un cristal de sulfato de potasio. Si se analizan las características geométricas de esas figuras, es posible deducir la estructura del cristal y la posición de sus diversos átomos. *c)* Figura de difracción de la proteína hemoglobina, que se encarga de transportar el oxígeno en la sangre.

En la actualidad, la difracción de rayos X sirve para investigar la estructura interna no sólo de los cristales sencillos, sino también de las moléculas biológicas grandes y complejas, como las proteínas y el ADN (figura 9.19c). Gracias a sus cortas longitudes de onda, que son comparables con los espacios atómicos *dentro* de las moléculas, los rayos X ofrecen un método para investigar la estructura atómica de las moléculas.

9.4 Polarización

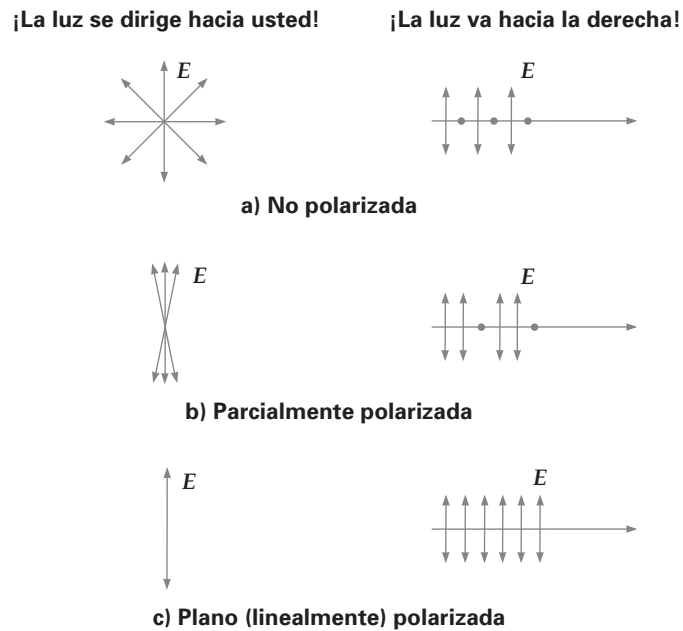
OBJETIVOS: a) Explicar la polarización de la luz y b) describir ejemplos de la polarización, tanto en el ambiente como en sus aplicaciones comerciales.

Cuando pensamos en luz polarizada, quizá visualizamos los anteojos polarizados (o Polaroid) para sol, porque ésta es una de las aplicaciones más comunes de la polarización. Cuando algo se polariza, tiene una dirección u orientación preferente. En términos de ondas luminosas, la **polarización** se refiere a la orientación de las oscilaciones transversales de sus ondas (campo eléctrico).

Recuerde que en el capítulo 6 se explicó que la luz es una onda electromagnética, con vectores de campo eléctrico y magnético (\vec{E} y \vec{B} , respectivamente) oscilatorios, perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación. La luz de la mayor parte de las fuentes consiste en una gran cantidad de ondas electromagnéticas que emiten los átomos de esa fuente. Cada átomo produce una onda con determinada orientación, que corresponde a la dirección de su vibración atómica. Sin embargo, como son muchos los átomos que producen las ondas electromagnéticas de una fuente típica, son posibles muchas orientaciones aleatorias de los campos (\vec{E} y \vec{B} en la luz compuesta que se emite. Cuando los vectores de campo tienen orientación aleatoria, se dice que la luz es *no polarizada*. Por lo regular, esta situación se representa de forma esquemática en función del vector campo eléctrico, como se ve en la figura 9.20a. Visto a lo largo de la dirección de propagación, el campo eléctrico está distribuido al azar, es decir, igualmente en todas las direcciones. Sin embargo, visto paralelamente a la dirección de propagación, esta distribución aleatoria o igual se puede representar por dos direcciones (como las direcciones x y y en un sistema de coordenadas bidimensional). En este caso, las flechas verticales representan los componentes del campo eléctrico en esa direc-

Nota: en muchas figuras, los puntos representan una dirección del campo eléctrico perpendicular al papel y las flechas denotan una dirección a lo largo de la del campo eléctrico.

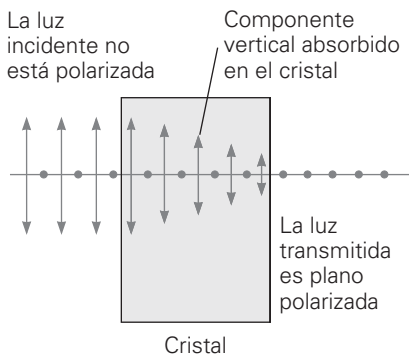
► **FIGURA 9.20 Polarización** La polarización se representa con la orientación del plano de vibración de los vectores de campo eléctrico. **a)** Cuando los vectores tienen orientación aleatoria, la luz no es polarizada. Los puntos representan una dirección del campo eléctrico perpendicular al papel, y las flechas verticales indican una dirección del campo eléctrico hacia arriba y hacia abajo. La luz no polarizada se representa con cantidades iguales de flechas y puntos. **b)** Cuando la orientación de los vectores de campo es preferente, la luz está parcialmente polarizada. En este caso hay menos puntos que flechas. **c)** Cuando los vectores están en un plano, la luz es plano polarizada, o linealmente polarizada. En este caso no se ven puntos.



ción, y los puntos representan componentes que entran al papel o que salen de él. En este apartado se usará esta notación.

Si hay una orientación preferente de los vectores de campo, se dice que la luz está *parcialmente polarizada*. Ambas representaciones de la figura 9.20b muestran que hay más vectores de campo eléctrico en dirección vertical que en dirección horizontal. Si los vectores de campo sólo oscilan en *una* dirección, la luz es *plano polarizada*, o *linealmente polarizada* (figura 9.20c). Note que la polarización es una prueba de que la luz es una onda transversal. Las ondas longitudinales verdaderas, como las ondas sonoras en el aire, no se pueden polarizar porque las moléculas del medio no vibran de forma perpendicular a la dirección de propagación.

La luz se polariza de varias maneras. Aquí se describirá la polarización por absorción selectiva, por reflexión y por doble refracción. En el apartado 9.5 se describirá la polarización por dispersión.



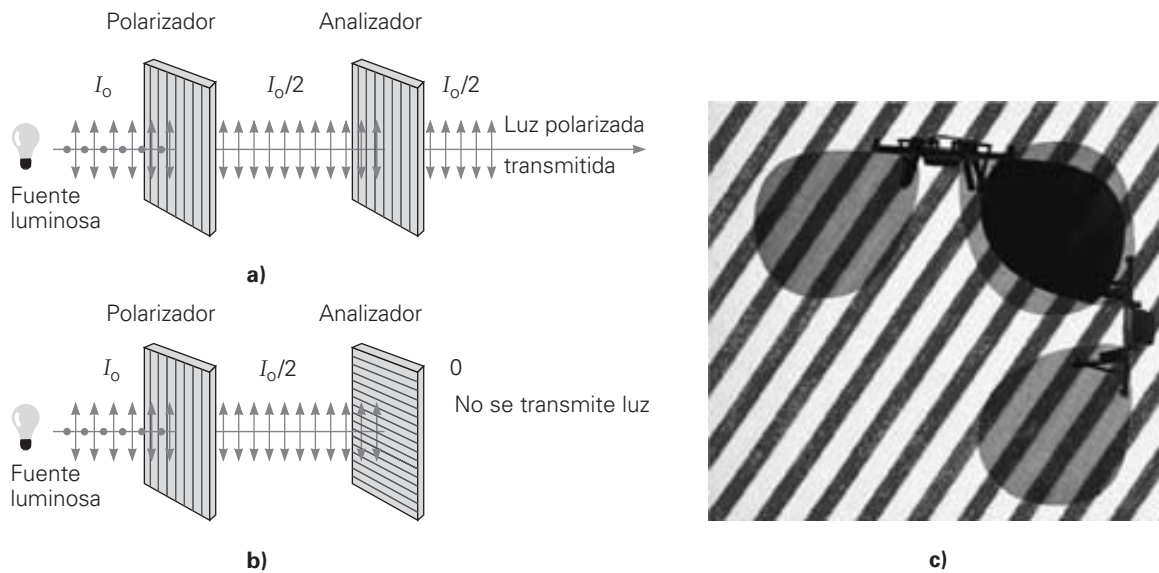
▲ **FIGURA 9.21 Absorción selectiva (dicroísmo)** Los cristales dicroicos absorben de forma selectiva un componente polarizado (aquí, el componente vertical) más que el otro. Si el cristal tiene el suficiente espesor, el rayo que emerge está linealmente polarizado.

Polarización por absorción selectiva (dicroísmo)

Algunos cristales, como los del mineral turmalina, presentan la interesante propiedad de absorber uno de los componentes de campo eléctrico más que el otro. A esta propiedad se le llama **dicroísmo**. Si un cristal dicroico tiene espesor suficiente, se absorberá por completo uno de los componentes y, en ese caso, el haz que emerge es plano polarizado (◀figura 9.21).

Otro cristal dicroico es el del sulfato de iodoquinina (llamado *herapatita*, en honor de W. Herapath, médico inglés que descubrió en 1852 sus propiedades polarizantes). Este cristal tuvo gran importancia práctica en el desarrollo de los polarizadores modernos. Alrededor de 1930, Edwin H. Land (1909-1991), científico estadounidense, encontró una forma de alinear diminutos cristales dicroicos aciculares (en forma de aguja) para formar láminas de celuloide transparente. El resultado fue una película delgada de material polarizante, que recibió el nombre comercial de *Polaroid*.

Se han desarrollado mejores películas polarizantes que, en lugar de celuloide, utilizan polímeros sintéticos. Durante el proceso de manufactura esta clase de películas se estira para alinear las largas cadenas moleculares del polímero. Con un tratamiento adecuado, los electrones externos (de valencia) de las moléculas pueden moverse a lo largo de las cadenas orientadas. El resultado es que se absorbe con facilidad la luz cuyos vectores \vec{E} son paralelos a las cadenas orientadas, pero se transmite la luz con vectores \vec{E} perpendiculares a las cadenas. La dirección *perpendicular* a la orientación de las cadenas moleculares se llama **eje de transmisión**, o **dirección de polarización**. Así, cuando la luz no polarizada llega a una lámina polarizadora, ésta funciona como polarizador y transmite luz polarizada (▶figura 9.22). Como se absorbe uno de los dos componentes del



▲ FIGURA 9.22 Películas polarizantes a) Cuando las películas polarizantes se orientan de tal forma que sus ejes de transmisión tienen la misma dirección, la luz que sale es polarizada. La primera lámina funciona como polarizador y la segunda como analizador. b) Cuando una de las láminas gira 90° y los ejes de transmisión son perpendiculares (polarizadores cruzados), se transmite poca luz (en el caso ideal, nada). c) Polarizadores cruzados hechos con anteojos polarizantes para el sol.

campo eléctrico, la intensidad de la luz después del polarizador es la mitad de la intensidad de la luz incidente ($I_0/2$). El ojo humano no es capaz de distinguir entre luz polarizada y no polarizada. Para saber si la luz está polarizada, se necesita un *analizador*, que puede ser simplemente otra hoja de película polarizante. Como se ve en la figura 9.22a, si el eje de transmisión de un analizador es paralelo al plano de polarización de la luz, la transmisión es máxima. Si el eje de transmisión del analizador es perpendicular al plano de polarización, se transmitirá poca luz (en el caso ideal, ninguna).

En general, la intensidad de la luz transmitida se determina con

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad \text{Ley de Malus} \quad (9.14)$$

donde θ es el ángulo que forman los ejes de transmisión del polarizador y el analizador. Esta expresión se conoce como *ley de Malus*, en honor de su descubridor, el físico francés E. L. Malus (1775-1812).

Los anteojos polarizantes cuyos vidrios tienen distintos ejes de transmisión se usan para ver algunas películas en tercera dimensión. Dos proyectores que transmiten imágenes un poco distintas, tomadas con cámaras a corta distancia entre sí, proyectan las películas en una pantalla. La luz de cada proyector está linealmente polarizada, pero en dirección perpendicular a la de la otra cámara. Las lentes de los anteojos "3D" también tienen ejes de transmisión perpendiculares entre sí. De esta forma, un ojo ve la imagen de un proyector y el otro ve la del otro proyector. El cerebro interpreta como profundidad, o tercera dimensión, la ligera diferencia en la perspectiva (o "ángulo de visión") de las dos imágenes, exactamente igual que en la visión normal.

Ejemplo integrado 9.6 ■ Hacer algo de la nada: tres polarizadores

En las figuras 9.22b y c no hay luz transmitida después del analizador, porque los ejes de transmisión del polarizador y el analizador son perpendiculares. Supongamos que la luz no polarizada que incide en el primer polarizador tiene una intensidad I_0 . Entre el primer polarizador y el analizador se inserta un segundo polarizador, cuyo eje de transmisión forma un ángulo θ con el del primer polarizador. a) ¿Es posible que algo de luz atraviese todo esta configuración? En caso afirmativo, ¿ese paso será cuando 1) $\theta = 0^\circ$, 2) $\theta = 30^\circ$, 3) $\theta = 45^\circ$ o 4) $\theta = 90^\circ$. Explique por qué. ¿Qué sucede si se gira el segundo polarizador? b) Cuando $\theta = 30^\circ$, ¿cuál es la intensidad de la luz que se transmite en términos de la intensidad de la luz que incide?

(continúa en la siguiente página)

a) Razonamiento conceptual. Sí, es posible que algo de luz atraviese esta configuración a cualquier otro ángulo que no sea 0° o 90° . La sección Aprender dibujando que aparece en esta página le ayudará a comprender esta situación.

Sólo con el primer polarizador y el analizador, no se transmite luz, de acuerdo con la ley de Malus (ecuación 9.14), porque el ángulo entre los ejes de transmisión es de 90° . Sin embargo, cuando se inserta un segundo polarizador entre el primero y el analizador, en realidad pasa algo de luz por el sistema. Por ejemplo, si el eje de transmisión del segundo polarizador forma un ángulo θ con el del primer polarizador, entonces el ángulo entre los ejes de transmisión del segundo polarizador y el analizador será $90^\circ - \theta$. (¿Por qué?)

Cuando la luz no polarizada de intensidad I_0 incide en el primer polarizador, la intensidad transmitida por éste es $I_0/2$, porque sólo se transmite uno de los dos componentes del campo eléctrico. Después del segundo polarizador, la intensidad disminuye por un factor de $\cos^2 \theta$. Después del analizador, la intensidad se reduce más por un factor de $\cos^2(90^\circ - \theta) = \sin^2 \theta$. Por lo anterior, la intensidad transmitida es $I = (I_0/2)(\cos^2 \theta)(\sin^2 \theta)$. Así, mientras θ no sea 0° ni 90° , habrá algo de luz que atraviese el sistema.

Puesto que la luz transmitida depende del ángulo θ , si se gira el segundo polarizador cambia la intensidad transmitida.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez comprendida la situación, el inciso b se resuelve con un cálculo directo.

Dado: $\theta = 30^\circ$ **Encuentre:** b) I después de tres polarizadores en términos de I_0

$$\text{Cuando } \theta = 30^\circ, \quad I = \frac{I_0}{2} (\cos^2 30^\circ)(\sin^2 30^\circ) = \frac{I_0}{2} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{3I_0}{32}$$

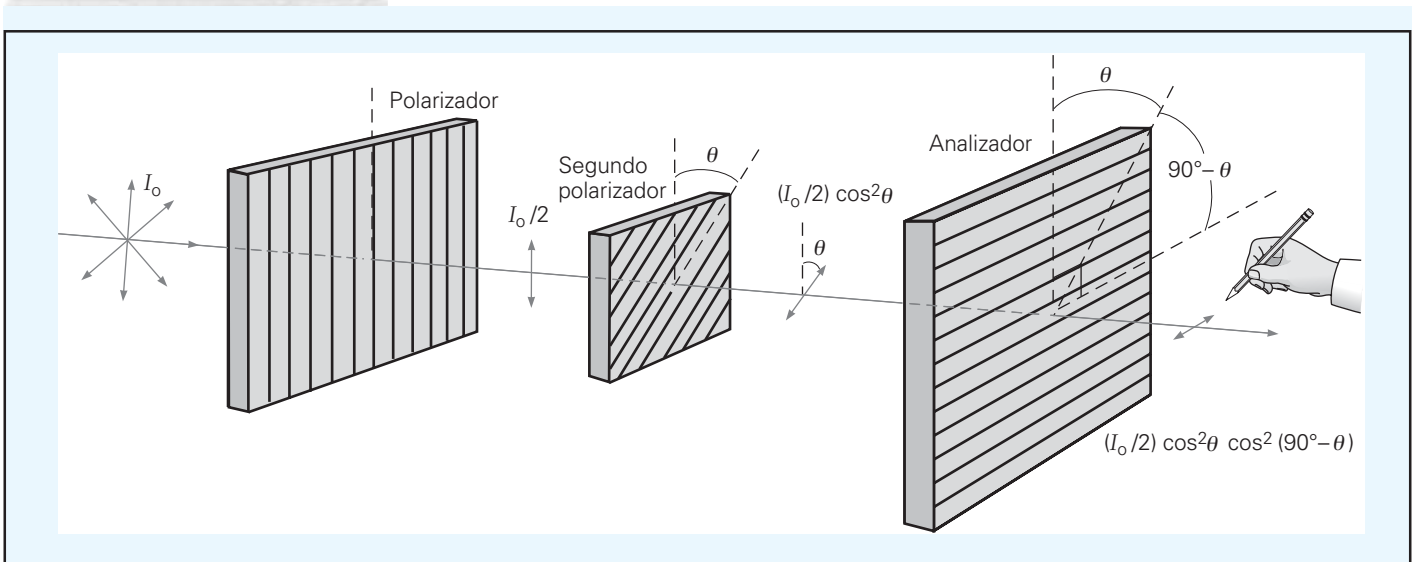
Ejercicio de refuerzo. ¿Para qué valor de θ será máxima la intensidad transmitida en este ejemplo?

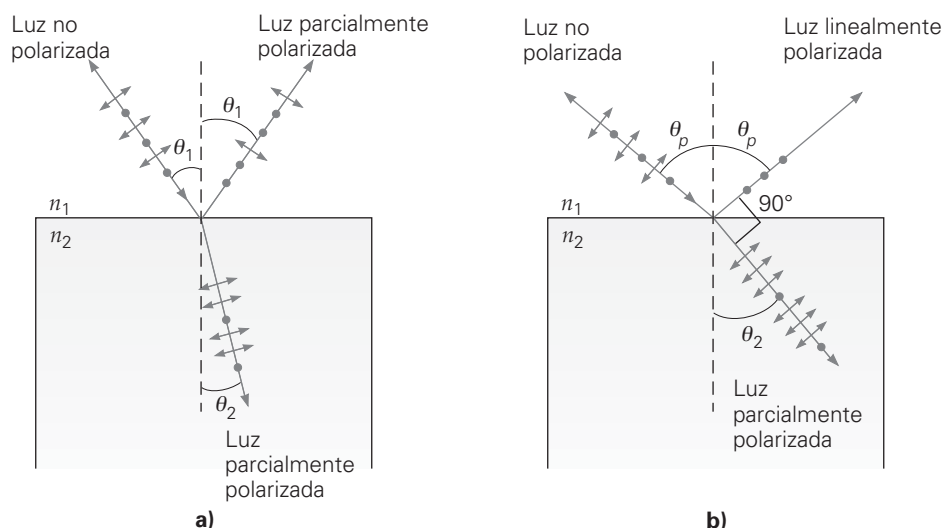
Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada llega a un medio transparente y liso, como el vidrio, por ejemplo, se refleja en forma parcial y se transmite también en forma parcial. La luz reflejada puede estar total o parcialmente polarizada, o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. El caso no polarizado se presenta para 0° , es decir, la incidencia normal. Al variar el ángulo de incidencia a partir de 0° , se polarizan parcialmente tanto la luz reflejada como la refractada. Por ejemplo, los componentes del campo eléctrico normales a la superficie se reflejan con más intensidad y producen polarización parcial (► figura 9.23a). Sin embargo, en determinado ángulo de incidencia, el haz re-

APRENDER DIBUJANDO

TRES POLARIZADORES (VÉASE EL EJEMPLO INTEGRADO 9.6)





▲ **FIGURA 9.23 Polarización por reflexión** *a)* Cuando un haz de luz incide en una interfase, la luz reflejada y la refractada normalmente están parcialmente polarizadas. *b)* Cuando los rayos reflejado y refractado forman 90° , la luz reflejada es linealmente polarizada y la refractada es parcialmente polarizada. Esta situación ocurre cuando $\theta_1 = \theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$.

flejado está totalmente polarizado (figura 9.23b). (En este ángulo, sin embargo, el haz refractado sólo está parcialmente polarizado.)

David Brewster (1781-1868), un físico escocés, descubrió que la polarización total del rayo reflejado se presenta cuando los rayos reflejado y refractado son perpendiculares entre sí. El ángulo de incidencia al que ocurre esta polarización se llama **ángulo de polarización** (θ_p) o **ángulo de Brewster**, y depende de los índices de refracción de los dos medios. En la figura 9.23b, los rayos reflejado y refractado forman 90° , y el ángulo de incidencia θ_1 es el ángulo de polarización θ_p ; por consiguiente, $\theta_1 = \theta_p$, y

$$\theta_1 + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \quad \text{o} \quad \theta_2 = 90^\circ - \theta_1$$

Según la ley de Snell (capítulo 7),

$$n_1 \sen \theta_1 = n_2 \sen \theta_2$$

En este caso, $\sen \theta_2 = \sen(90^\circ - \theta_1) = \cos \theta_1$. Por consiguiente,

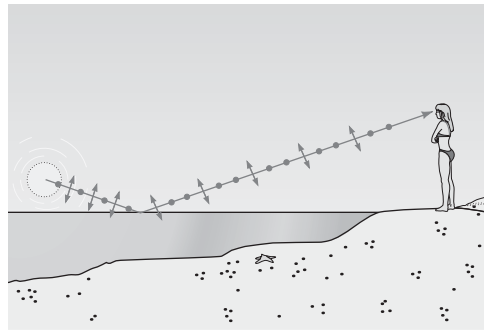
$$\frac{\sen \theta_1}{\sen \theta_2} = \frac{\sen \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

Cuando $\theta_1 = \theta_p$, el resultado es

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{o bien} \quad \theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (9.15)$$

Si el primer medio es aire ($n_1 = 1$), entonces $\tan \theta_p = \frac{n_2}{1} = n_2 = n$, donde n es el índice de refracción del segundo medio.

Ahora con seguridad usted comprende el principio en que se basan los anteojos polarizadores. La luz que se refleja en una superficie lisa está parcialmente polarizada. La dirección de polarización es, en su mayor parte, paralela a la superficie. (Véase la figura 9.23b.) La luz que se refleja en la superficie del asfalto o del agua puede tener tal intensidad que produce resplandores (▼ figura 9.24a). Para reducir este efecto, las lentes polarizantes de los anteojos tienen la orientación vertical de su eje de transmisión, para que se absorba algo de la luz parcialmente polarizada que proviene de las superficies reflectoras. Por otra parte, los filtros polarizantes permiten a las cámaras tomar fotos “limpias”, es decir, sin la interferencia del resplandor (figura 9.24b).



a)



b)

▲ **FIGURA 9.24 Reducción del resplandor** *a)* La luz reflejada en una superficie horizontal está parcialmente polarizada en el plano horizontal. Cuando los anteojos solares se orientan de tal forma que su eje de transmisión es vertical, el componente polarizado horizontalmente de esa luz no se transmite, y se reduce el resplandor. *b)* En los filtros polarizantes de las cámaras se usa el mismo principio. La foto de la derecha se tomó con uno de esos filtros. Note la reducción de los reflejos en el escaparate de una tienda. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Ejemplo 9.7 ■ Luz solar en un estanque: polarización por reflexión

La luz solar se refleja en la superficie lisa de un estanque. ¿Cuál es la altitud del Sol (el ángulo entre el Sol y el horizonte) cuando es máxima la polarización de la luz reflejada?

Razonamiento. Como el ángulo de incidencia se mide con respecto a la normal y el ángulo de altitud se mide con respecto al horizonte, el ángulo de incidencia y el ángulo de altitud son complementarios (trace un diagrama para visualizar la situación). La luz que incide en el ángulo de Brewster tiene la máxima polarización al reflejarse, por lo que la altitud del Sol debe estar a $90^\circ - \theta_p$ con el horizonte.

Solución. El índice de refracción del agua está en la tabla 7.1.

Dado: $n_1 = 1$

$n_2 = 1.33$ (tabla 7.1)

Encuentre: θ (ángulo de altitud para que la polarización sea máxima)

El Sol debe estar a un ángulo $\theta = 90^\circ - \theta_p$, donde θ_p es el ángulo de Brewster. Se usa la ecuación 9.15:

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1.33}{1}\right) = 53.1^\circ$$

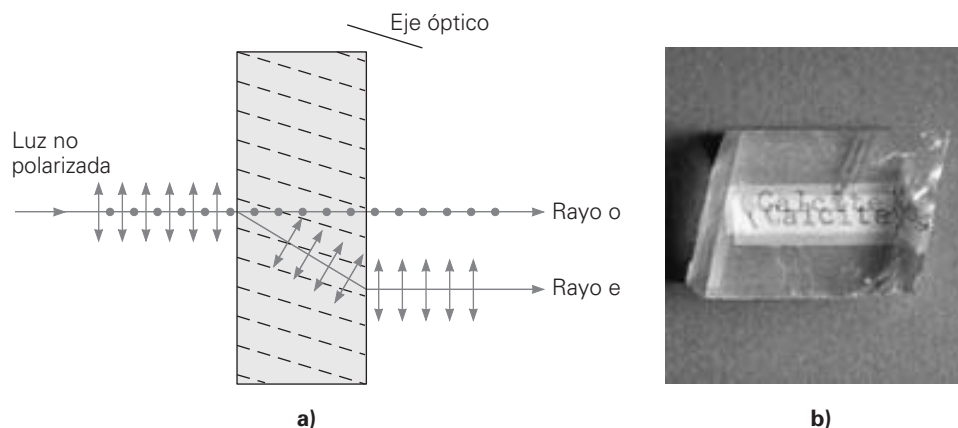
Así,

$$\theta = 90^\circ - \theta_p = 90^\circ - 53.1^\circ = 36.9^\circ$$

Ejercicio de refuerzo. La luz incide en un material plano y transparente cuyo índice de refracción es 1.52. ¿En qué ángulo de refracción la luz transmitida tendrá la máxima polarización si el material transparente está en agua?

Polarización por doble refracción (birrefringencia)

Cuando la luz monocromática se propaga en el vidrio, su velocidad es igual en todas direcciones, y el vidrio se caracteriza por tener un solo índice de refracción. Todo material que tiene esta propiedad se llama *isotrópico*, lo que significa que tiene las mismas



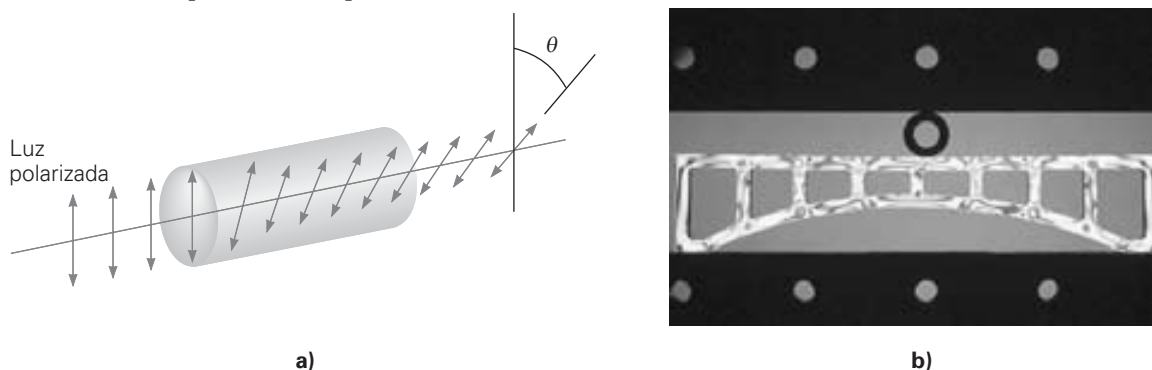
▲ **FIGURA 9.25** Doble refracción o birrefringencia *a)* La luz no polarizada que incide normal a la superficie de un cristal birrefringente, formando cierto ángulo con determinada dirección en el cristal (líneas punteadas), se separa en dos componentes: el rayo ordinario (o) y el rayo extraordinario (e), que están plano polarizados en direcciones perpendiculares entre sí. *b)* Doble refracción en un cristal de calcita.

características ópticas en todas las direcciones. Algunos materiales cristalinos, como el cuarzo, la calcita y el hielo, son *anisotrópicos*; esto es, la rapidez de la luz —y por consiguiente el índice de refracción— es diferente en direcciones distintas dentro del material. La anisotropía origina algunas propiedades ópticas interesantes. Se dice que esos materiales son doblemente refringentes, o que poseen **birrefringencia**, y en este fenómeno interviene la polarización.

Por ejemplo, un haz de luz no polarizada que incide en un cristal birrefringente de calcita (CaCO_3 , carbonato de calcio) se ilustra en la ▲ figura 9.25. Cuando el haz se propaga formando un ángulo respecto a determinado eje cristalino, el haz se refracta doblemente y se separa en dos componentes o rayos. Esos dos rayos están linealmente polarizados en direcciones perpendiculares entre sí. Uno, llamado *rayo ordinario* (o), pasa en línea recta por el cristal y se caracteriza por un índice de refracción n_o . El segundo rayo, llamado *rayo extraordinario* (e), se refracta y se caracteriza por un índice de refracción n_e . La dirección particular del eje, indicada por las líneas punteadas de la figura 9.25a, se llama *eje óptico*. A lo largo de esta dirección, $n_o = n_e$, y no se nota nada extraordinario en la luz transmitida.

Algunos materiales transparentes tienen la capacidad de *hacer girar* el plano de polarización de la luz plano polarizada. Esta propiedad se llama **actividad óptica**, y se debe a la estructura molecular del material (▼ figura 9.26a). La rotación puede ser en

▼ **FIGURA 9.26** Actividad óptica y detección de tensión *a)* Algunas sustancias tienen la propiedad de hacer girar el plano de polarización de la luz linealmente polarizada. Esta propiedad, que depende de la estructura molecular de la sustancia, se llama *actividad óptica*. *b)* Los vidrios y los plásticos se tornan ópticamente activos cuando se someten a tensión, y los puntos de máxima tensión se aprecian cuando el material se ve a través de polarizadores cruzados. Los ingenieros pueden entonces probar modelos de elementos estructurales en plástico, para ver dónde se presentarán las tensiones máximas cuando se “carguen” los modelos. En el caso que se ilustra se está analizando un modelo de la armadura de suspensión de un puente

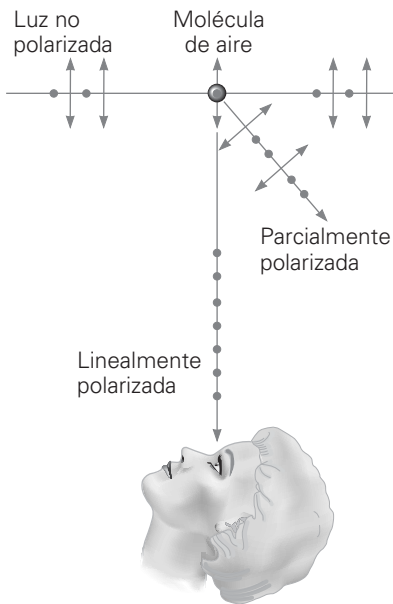


el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, dependiendo de la orientación molecular. Entre las moléculas ópticamente activas están algunas proteínas, aminoácidos y azúcares.

Los vidrios y los plásticos se vuelven ópticamente activos cuando están sometidos a tensión. La máxima rotación de la dirección de polarización de la luz transmitida se realiza en las regiones donde la tensión es máxima. Al ver un trozo de material sometido a tensión, a través de polarizadores cruzados, es posible identificar los puntos de tensión máxima. A esta determinación se le llama *análisis óptico de tensión* (figura 9.26b). Otra aplicación de las películas polarizantes es la pantalla de cristal líquido (LCD), que se describe en la sección A fondo 9.2.

*9.5 Dispersión atmosférica de la luz

OBJETIVOS: a) Describir la dispersión y b) explicar por qué el cielo es azul y los crepúsculos son rojos.



▲ **FIGURA 9.27 Polarización por dispersión** Cuando una molécula de gas en el aire dispersa la luz solar no polarizada que incide en la atmósfera, la luz perpendicular a la dirección del rayo incidente está linealmente polarizada. La luz que se dispersa en cierto ángulo arbitrario está parcialmente polarizada. Un observador que vea en ángulo recto (90°) con respecto a la dirección de la luz solar incidente recibe luz linealmente polarizada.

Cuando la luz incide en una suspensión de partículas, como las moléculas del aire, parte de ella se absorbe y se vuelve a irradiar. A este proceso se le llama *dispersión*. La dispersión de la atmósfera produce algunos efectos interesantes, que incluyen la polarización de la luz celeste (la luz que ha dispersado la atmósfera), el color azul del cielo y el color rojo de los crepúsculos y los amaneceres.

La dispersión atmosférica hace que la luz del cielo esté polarizada. Cuando llega la luz solar no polarizada a las moléculas de aire, el campo eléctrico de la onda luminosa pone a vibrar los electrones de las moléculas. Las vibraciones son complejas, pero esas cargas aceleradas emiten radiación, de igual forma que los electrones en vibración de una antena de radiodifusión (véase la sección 6.4). La intensidad de esta radiación emitida es más intensa a lo largo de una perpendicular a la oscilación y, como se ve en la figura 9.27, un observador cuya visual forme 90° con la dirección de la luz solar recibirá luz linealmente polarizada, porque las oscilaciones de la carga son normales a la superficie. En otros ángulos de la visual, están presentes ambos componentes, y la luz del cielo, vista a través de un filtro polarizante, parece parcialmente polarizada, a causa del componente más intenso.

Como la dispersión de la luz con el máximo grado de polarización forma un ángulo recto con la dirección del Sol, en el amanecer y en el ocaso la luz dispersa, directamente sobre uno, tiene el grado máximo de polarización. La polarización del cielo se aprecia cuando éste se ve a través de un filtro polarizador (o unos anteojos polarizantes), que se hace girar. La luz que procede de distintas regiones del cielo se transmitirá en diversos grados que dependen de su grado de polarización. Se cree que algunos insectos, como las abejas, usan la luz polarizada del cielo para determinar sus direcciones de navegación en relación con el Sol.

Por qué el cielo es azul

La dispersión de la luz solar por las moléculas de aire también hace que el cielo se vea azul. Este efecto no se debe a la polarización, sino a la absorción selectiva de la luz. Como los osciladores, las moléculas de aire tienen frecuencias de resonancia (a las cuales dispersan con máxima eficiencia) en la región ultravioleta. En consecuencia, cuando se dispersa la luz del Sol, la luz del extremo azul de la región visible se dispersa más que la del extremo rojo.

Para partículas como las moléculas de aire, que son mucho menores que la longitud de onda de la luz, la intensidad de la luz que se dispersa es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (I/λ^4). Esta relación entre longitud de onda e intensidad de dispersión se llama **dispersión de Rayleigh**, en honor de Lord Rayleigh (1842-1919), el físico inglés que la dedujo. Esta relación inversa predice que la luz de menor longitud de onda del espectro, es decir, la luz azul, se dispersa más que la de mayor longitud de onda, la roja. La luz azul dispersada se vuelve a dispersar en la atmósfera y al final se dirige hacia el suelo. Ésta es la causa de que el cielo se vea azul.

A FONDO

9.2 LAS PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO Y LA LUZ POLARIZADA

Las *pantallas de cristal líquido* (o pantallas LCD, por *liquid crystal displays*) son comunes en relojes, calculadoras, televisores y computadoras. El nombre "cristal líquido" parece ser contradictorio. Por lo regular, cuando se funde un sólido cristalino, el líquido que resulta ya no tiene una configuración atómica o molecular ordenada. Sin embargo, hay ciertos compuestos orgánicos que pasan por un estado intermedio en el que las moléculas se reordenan en cierto grado, pero manteniendo el orden general característico de un cristal.

Una clase común de LCD, llamada *pantalla de cristal nemático torcido*, emplea el efecto de un cristal líquido sobre la luz polarizada (figura 1). Estos cristales líquidos especiales son activos desde el punto de vista óptico y girarán en la dirección de la polarización de la luz 90° si no se aplica voltaje a través de ellos. Sin embargo, si se aplica voltaje, los cristales perderán esta actividad óptica.

A continuación los cristales líquidos se colocan entre hojas polarizantes cruzadas, y se respaldan con una superficie de espejo. Cuando no hay voltaje, la luz que entra y pasa por la LCD se polariza, gira 90° , se refleja y de nuevo gira 90° . Después del viaje de regreso a través del cristal líquido, la dirección de polarización de la luz es la misma que la del polarizador inicial. Así, la luz se transmite y sale de la pantalla. A causa de la reflexión y

la transmisión, la pantalla parece tener color claro (por lo general, gris claro) cuando se ilumina con luz blanca no polarizada.

Cuando se aplica un voltaje, la luz polarizada que pasa a través del cristal líquido es absorbida por el segundo polarizador. Por eso, el cristal líquido es opaco y oscuro. Al cristal líquido se le aplican recubrimientos de una película transparente y conductora de la electricidad, arreglados en bloques de siete capas. Cada bloque, o segmento de la pantalla, tiene una conexión eléctrica por separado. Los números o letras oscuros en una pantalla LCD se forman al aplicar un voltaje eléctrico a ciertos segmentos del cristal líquido. Observe que todos los números, del 0 al 9, se forman con piezas de la pantalla segmentada.

Si se usa un analizador se demuestra con facilidad que la luz procedente de las regiones claras de una LCD está polarizada (figura 2). La pantalla se ve o se deja de ver si se hace girar el analizador sobre el reloj. Usted seguramente habrá notado este efecto, si alguna vez ha tratado de ver la hora en un reloj de pulso con LCD usando lentes polarizantes para el sol.

Una de las ventajas principales de las LCD es su bajo consumo de energía. Otras pantallas equivalentes, como las que usan diodos emisores de luz (LED), producen luz y usan cantidades relativamente grandes de energía. Las LCD no producen luz, pero utilizan la luz reflejada.

Los monitores de computadora y televisión planos y a color, que se basan en la tecnología LCD, son cada vez más comunes. Ocupan una cuarta parte del espacio, consumen menos de la mitad de la energía y son más benignos para la vista que los monitores que dependen de un tubo de rayos catódicos (CRT) y las pantallas de televisión tradicionales del mismo tamaño. Las pantallas de las computadoras y de los televisores se miden en *pixeles*, que se parecen mucho a un cuadro pequeño de papel milimétrico. Para producir color, los tres segmentos de LCD (rojo, verde y azul) de un monitor plano se agrupan en cada píxel. Al controlar las intensidades de los tres colores, cada píxel puede generar cualquier color del espectro visible.

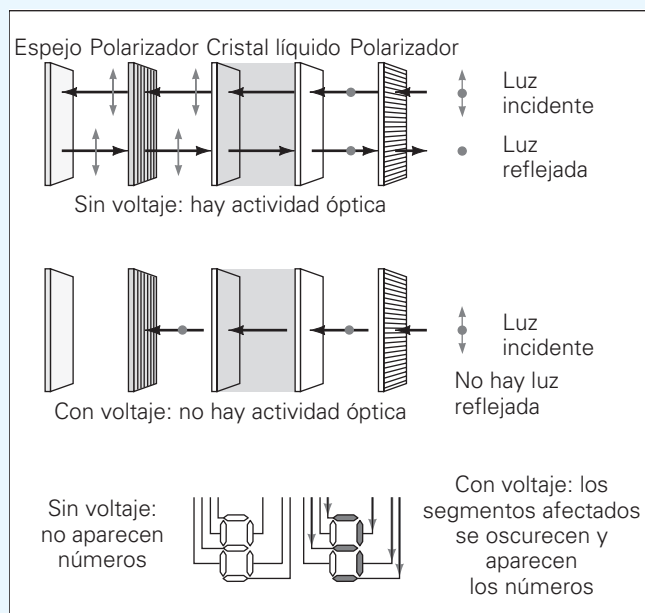


FIGURA 1 Pantalla de cristal líquido (LCD) Una pantalla nemática torcida es una aplicación donde intervienen la actividad óptica de un cristal líquido y los polarizadores cruzados. Cuando un campo eléctrico de un voltaje aplicado desorienta el orden cristalino, el cristal líquido pierde su actividad óptica en esa región, y la luz no se transmite ni se refleja. Los números y las letras se forman aplicando voltajes a segmentos de una pantalla.

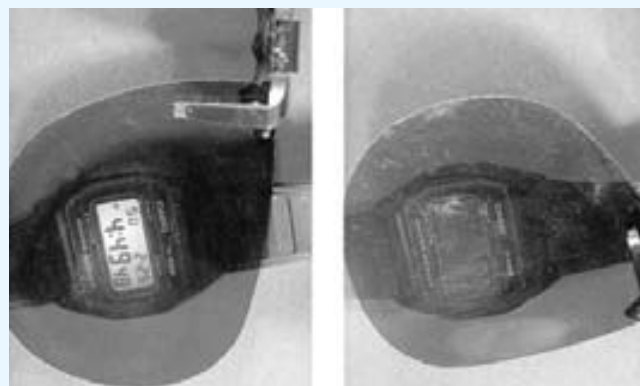


FIGURA 2 Luz polarizada La luz de una pantalla de cristal líquido está polarizada, lo que se puede ver usando anteojos polarizantes a modo de analizador.

Ejemplo 9.8 ■ El rojo y el azul: dispersión de Rayleigh

¿Cuánta más luz dispersan las moléculas de aire en el extremo azul del espectro visible que en el extremo rojo?

Razonamiento. Se sabe que la dispersión de Rayleigh es proporcional a I/λ^4 , y que la luz del extremo azul del espectro (con menor longitud de onda) se dispersa más que la del extremo rojo. La expresión “cuánta más”, que abre la pregunta, implica un factor o una relación.

Solución. La relación de dispersión de Rayleigh es $I \propto 1/\lambda^4$, donde I es la cantidad o intensidad de dispersión para determinada longitud de onda. Así, se puede establecer la relación

$$\frac{I_{\text{azul}}}{I_{\text{rojo}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{azul}}} \right)^4$$

El extremo azul del espectro (luz violeta) tiene una longitud de onda aproximada de $I_{\text{azul}} = 400$ nm, y la luz roja tiene una longitud de onda aproximada de $I_{\text{rojo}} = 700$ nm. Al sustituir estos valores se obtiene

$$\frac{I_{\text{azul}}}{I_{\text{rojo}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{azul}}} \right)^4 = \left(\frac{700 \text{ nm}}{400 \text{ nm}} \right)^4 = 9.4 \quad \text{o} \quad I_{\text{azul}} = 9.4 I_{\text{rojo}}$$

Se ve que la luz azul se dispersa casi 10 veces más que la luz roja.

Ejercicio de refuerzo. ¿Qué longitud de onda de la luz se dispersa el doble que la luz roja? ¿De qué color es?



▲ **FIGURA 9.28** Cielo rojo al atardecer Una espectacular puesta de sol, de tonalidades rojizas, en un observatorio ubicado en la cima de una montaña en Chile. El cielo rojo es el resultado de la dispersión de la luz solar por los gases atmosféricos y las pequeñas partículas sólidas. El enrojecimiento del Sol, cuando se observa en forma directa, se debe a la dispersión de las longitudes de onda hacia el extremo azul del espectro, en línea directa hacia el Sol. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Por qué los amaneceres y los crepúsculos son rojos

Con frecuencia se observan hermosos amaneceres y crepúsculos. Cuando el Sol está cerca del horizonte, la luz solar recorre mayor distancia atravesando el aire más denso cerca de la superficie de la Tierra. Como en ese proceso la luz sufre mucha dispersión, quizá usted piense que sólo la luz que se dispersa menos, la roja, llega a los observadores en la superficie terrestre. Así se explicarían los crepúsculos rojos. Sin embargo, se ha demostrado que el color dominante de la luz blanca después de la dispersión molecular es el anaranjado. En consecuencia, debe haber otras clases de dispersión que cambian la luz del Sol poniente (o naciente) hacia el extremo rojo del espectro (◀figura 9.28).

Se sabe que la dispersión de la luz solar por los gases atmosféricos y por las pequeñas partículas son la causa de los crepúsculos rojos. Esas partículas no son necesarias para el azul celeste, pero son indispensables para los crepúsculos y los amaneceres rojos. (Por eso es que se observan amaneceres y crepúsculos espectacularmente rojos en los meses posteriores a una gran erupción volcánica, que emite muchas toneladas de materia en forma de partículas a la atmósfera.) Los crepúsculos rojos suceden con más frecuencia cuando hay una masa de aire de alta presión hacia el oeste, porque la concentración de las partículas es mayor en las masas de aire con alta presión, que cuando la presión es baja. De forma similar, los amaneceres rojos suceden con más frecuencia cuando hay una masa de aire de alta presión hacia el este.

Ahora se comprende el antiguo adagio “Cielo rojo por la noche, deleite de los marineros. Cielo rojo por la mañana, advertencia a los marineros”. En general, el buen tiempo acompaña a las masas de alta presión, porque se asocian con menos formación de nubes. La mayor parte del territorio de Estados Unidos está en la zona de los vientos alisios, donde en general las masas de aire se mueven del oeste al este. Un cielo rojo al anochecer probablemente indica que hay una masa de aire de alta presión al oeste, que se acerca. Un cielo rojo por la mañana quiere decir que la masa de aire de alta presión ha pasado, y que podría haber mal tiempo.

Como nota final, ¿a usted le gustaría que el cielo fuera rojo? Si su respuesta es sí, entonces debería ir a Marte, el “planeta rojo”. La delgada atmósfera marciana tiene un 95% de dióxido de carbono (CO_2). La molécula de CO_2 es más masiva que la de oxígeno (O_2) o la de nitrógeno (N_2). En consecuencia, las moléculas de CO_2 tienen menor frecuencia de resonancia (mayor longitud de onda) y tienden a dispersar el extremo rojo del espectro visible. Por consiguiente, el cielo marciano es rojo durante el día. ¿Y cómo son entonces los amaneceres y los ocasos en Marte? Piense en ello...

Y, por último, veamos cómo se utiliza la luz en una aplicación biomédica, la biopsia óptica, que se describe en la sección A fondo 9.3.

A FONDO 9.3 BIOPSIA ÓPTICA

Una de las formas más confiables de detectar enfermedades es practicar una biopsia, que consiste en extraer muestras de tejido, y luego buscar si hay *cambios* anormales en esas muestras. La “biopsia óptica”, o dispersión biomédica, es una herramienta prometedora para diagnosticar y tener control en el caso de enfermedades como el cáncer, *sin* necesidad de practicar ese procedimiento quirúrgico.

Las biopsias ópticas se basan en el siguiente principio físico. Las partículas en los tejidos absorben y reemiten luz; por esa razón, la luz dispersada contiene información acerca de la constitución del tejido. Lograr una dispersión a partir de un tejido depende de las estructuras internas, como la presencia de fibras de colágeno y el estado de hidratación en el tejido. La medición de la luz dispersada como una función de la longitud de onda, polarización o ángulo se convierte entonces en una importante herramienta de diagnóstico.

Un ejemplo de una biopsia óptica es el diagnóstico y medición de las fibras de colágeno. Un componente principal de la piel y de los huesos es el colágeno, una proteína fibrosa que se encuentra en las células animales. Las fibras de la forma inactiva del colágeno (que miden entre 2 y 3 μm de diámetro) se componen de haces de pequeñas fibrillas de colágeno, que miden aproximadamente 0.3 μm de diámetro, como se observa en la figura 1. Las fibrillas están hechas de moléculas entrelazadas de tropocolágeno y forman figuras en forma de bandas de estrías con una periodicidad de 70 nm, que se deben a la alineación es-

calonada de las moléculas de tropocolágeno. Cada una de estas moléculas tiene un “grupo frontal” denso en electrones, que aparece oscuro en la micrografía de electrones. Esta variación periódica en el índice de refracción a este nivel dispersa la luz fuertemente en las regiones visible y ultravioleta. La información contenida en la luz dispersada revelará si existen condiciones anormales en las fibras de colágeno

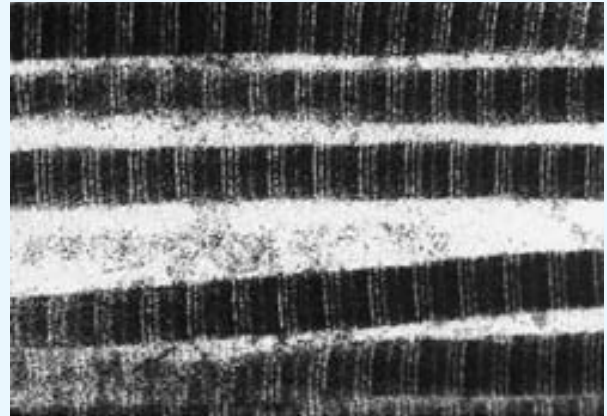


FIGURA 2 Una micrografía de electrones de las fibras de colágeno. Los detalles de las fibras de colágeno muestran la presencia de fibrillas de colágeno y de moléculas de tropocolágeno.

Repaso del capítulo

- El **experimento de Young de la doble rendija** es una prueba de la naturaleza ondulatoria de la luz, y una forma de medir su longitud de onda ($\approx 10^{-7}$ m).

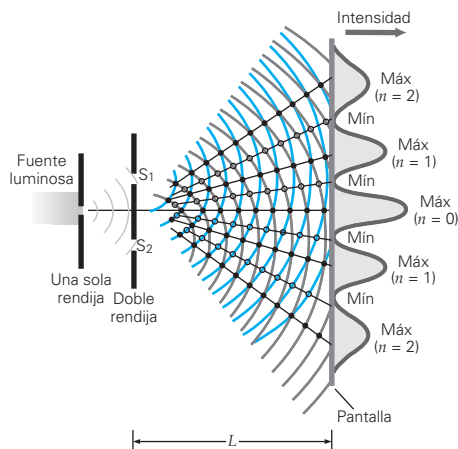
La posición angular (θ) de las **franjas brillantes (máxima)** satisface la condición

$$d \sin \theta = n\lambda \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (9.3)$$

donde d es la distancia entre las rendijas.

Cuando θ es pequeño, la distancia entre la n -ésima franja brillante (máxima) y el máximo central es

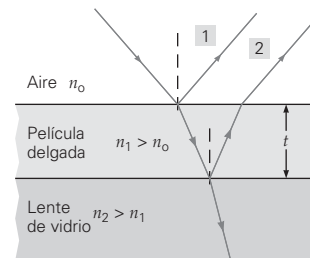
$$y_n \approx \frac{nL\lambda}{d} \quad \text{para } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (9.4)$$



- La luz reflejada en la interfase entre medios, cuando $n_2 > n_1$ experimenta un **cambio de fase** de 180° . Si $n_2 < n_1$ no hay cambio de fase en la reflexión. Los cambios de fase afectan la interferencia en películas delgadas, que también depende del espesor de la película y del índice de refracción.

El **espesor mínimo de una película antirreflejante** es

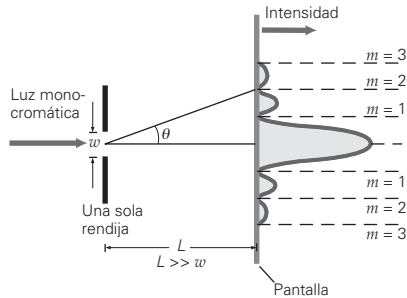
$$t_{\text{mín}} = \frac{\lambda}{4n_1} \quad (\text{para } n_2 > n_1 > n_0) \quad (9.7)$$



- En un experimento de **difracción en una sola rendija**, los **mínimos** que están en el lugar θ satisfacen

$$w \sin \theta = m\lambda \quad \text{para } m = 1, 2, 3, \dots \quad (9.8)$$

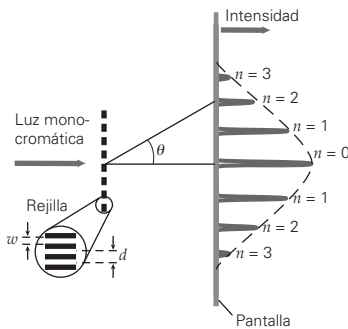
donde w es el ancho de la rendija. En general, cuanto mayor es la longitud de onda en comparación con el ancho w de una abertura o de un objeto, mayor será la difracción.



- Con una **rejilla de difracción**, los **máximos** (franjas brillantes) satisfacen

$$d \sin \theta = n\lambda \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (9.12)$$

donde $d = 1/N$, y N es la cantidad de líneas por unidad de longitud.



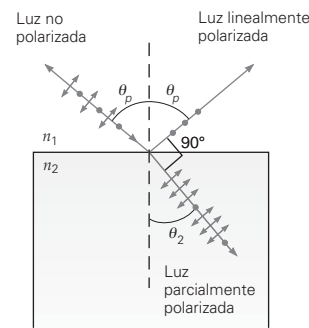
- La **polarización** es la orientación preferente de los vectores de campo eléctrico que constituyen una onda luminosa, y hay pruebas de que la luz es una onda transversal. La luz puede polarizarse mediante absorción selectiva, reflexión, doble refracción (**birrefringencia**) y dispersión.

Cuando los ejes de transmisión de un polarizador y un analizador forman un ángulo θ , la intensidad de la luz transmitida se determina con la **ley de Malus**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (9.14)$$

En la reflexión, si el ángulo de incidencia es igual al **ángulo de Brewster (de polarización)** θ_p , la luz reflejada es plano polarizada:

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{o} \quad \theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (9.15)$$



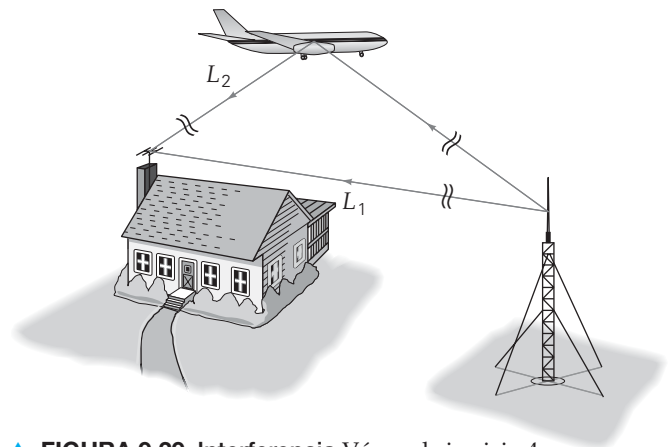
- La intensidad de la **dispersión de Rayleigh** es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de la onda de la luz. El azul del cielo terrestre es el resultado de la dispersión preferencial de la luz solar por las moléculas de aire.

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

9.1 El experimento de Young de la doble rendija

- OM** En un experimento de Young con luz monocromática, si disminuye la distancia d entre rendijas, la distancia entre franjas de interferencia a) disminuye, b) aumenta, c) permanece constante o d) desaparece.
- OM** Si la diferencia de longitudes de trayectorias de dos rayos idénticos y coherentes es 2.5λ cuando llegan a un punto de una pantalla, el punto será a) brillante, b) oscuro, c) multicolor o d) gris.
- PC** Cuando se usa luz blanca en el experimento de Young de doble rendija, se ven muchas bandas brillantes con un espectro de colores. En determinada franja, el color más cercano al máximo central es a) rojo, b) azul, c) todos los colores.
- PC** Con frecuencia, las imágenes de televisión aérea vibran cuando pasa cerca un avión (►figura 9.29). Explique una causa probable de esta vibración, con base en efectos de interferencia.



▲ FIGURA 9.29 Interferencia Véase el ejercicio 4.

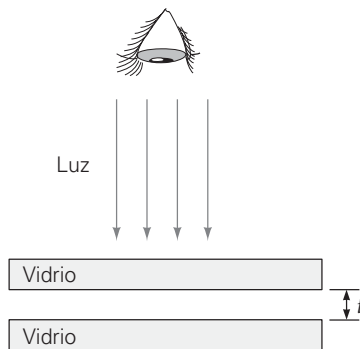
- PC** Describa lo que sucedería a la figura de interferencia en el experimento de Young de doble rendija si aumentara la longitud de onda de la luz monocromática.

6. **PC** La intensidad del máximo (o franja brillante) central en la figura de interferencia de un experimento de Young de doble rendija es unas cuatro veces mayor que la de cualquier onda luminosa. ¿Viola esto la conservación de la energía? Explique por qué.
7. ● En el desarrollo del experimento de Young se usó una aproximación para ángulo pequeño ($\tan \theta \approx \sin \theta$) para determinar los desplazamientos laterales de las franjas brillantes y oscuras. ¿Qué tan buena es esta aproximación? Por ejemplo, ¿cuál es el porcentaje de error cuando $\theta = 15^\circ$?
8. ● Para estudiar la interferencia entre ondas, un alumno usa dos altavoces o bocinas activadas por la misma onda sonora de 0.50 m de longitud. Si las distancias de un punto a las bocinas difieren en 0.75 m, las ondas interferirán ¿en forma constructiva o destructiva en ese punto? ¿Y si las distancias difieren en 1.0 m?
9. ● Dos rendijas paralelas a 0.075 mm de distancia están iluminadas con luz monocromática de 480 nm de longitud de onda. Determine el ángulo entre el centro del máximo central y el centro de la primera franja brillante lateral.
10. ●● *a)* Deduzca una relación que defina los lugares de las franjas oscuras en un experimento de Young de doble rendija. ¿Cuál es la distancia entre las franjas oscuras? *b)* Para que haya una franja oscura de tercer orden (la tercera a partir del máximo central), ¿cuál es la diferencia de longitudes de onda entre ese lugar y las dos rendijas?
11. ●● En un experimento de doble rendija donde se usa luz monocromática, la separación angular entre el máximo central y la franja brillante de segundo orden es 0.160° . ¿Cuál es la longitud de onda de la luz, si la distancia entre las rendijas es 0.350 mm?
12. **EI** ●● Una luz monocromática pasa a través de dos rendijas angostas y forma una figura de interferencia en una pantalla. *a)* Si aumenta la longitud de onda de la luz que se use, la distancia entre las franjas brillantes 1) aumentará, 2) permanecerá constante, 3) disminuirá. Explique por qué. *b)* Si la separación entre rendijas es 0.25 mm, la pantalla está a 1.5 m de éstas, y si se usa luz de 550 nm, ¿cuál es la distancia del centro del máximo central al centro de la franja brillante de tercer orden? *c)* ¿Y si la longitud de onda es de 680 nm?
13. ●● En un experimento con doble rendija y luz monocromática, una pantalla se coloca a 1.25 m de las rendijas, cuya separación es 0.0250 mm. La franja brillante de tercer orden está a 6.60 cm del centro del máximo central. Calcule *a)* la longitud de onda de la luz y *b)* la posición de la franja brillante de segundo orden.
14. **EI** ●● *a)* Si la longitud de onda utilizada en un experimento de doble rendija disminuye, la distancia entre franjas brillantes adyacentes 1) aumentará, 2) también disminuirá, 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b)* La separación entre las dos rendijas es de 0.20 mm. Las franjas brillantes adyacentes de la figura de interferencia en una pantalla (colocada a 1.5 m de las rendijas) están separadas 0.45 cm. ¿Cuál es la longitud de onda y el color de la luz? *c)* Si la longitud de onda es de 550 nm, ¿cuál será la distancia entre franjas brillantes adyacentes?
15. **EI** ●● Se iluminan con luz monocromática dos rendijas paralelas, y se observa una figura de interferencia en una pantalla. *a)* Si la distancia entre las rendijas disminuye, la distancia entre las franjas brillantes 1) aumenta, 2) permanece constante o 3) disminuye. Explique por qué. *b)* Si la separación de las rendijas es de 1.0 mm, la longitud de onda es 640 nm y la distancia de las rendijas a la pantalla es de 3.00 m, ¿cuál es la distancia entre los máximos de interferencia adyacentes? *c)* ¿Y si la separación entre las rendijas es de 0.80 mm?
16. **EI** ●● *a)* En un experimento de doble rendija, si la distancia de las rendijas a la pantalla aumenta, la separación entre franjas brillantes adyacentes 1) aumenta, 2) disminuye, o 3) permanece constante. Explique por qué. *b)* La luz verde amarillenta ($\lambda = 550$ nm) se usa en un experimento de doble rendija, en el que la separación de las rendijas es 1.75×10^{-4} m. Si la pantalla está a 2.00 m de las rendijas, determine la separación entre franjas brillantes adyacentes. *c)* ¿Y si la pantalla está a 3.00 m de las rendijas?
17. ●● En un experimento de doble rendija con luz monocromática y una pantalla a 1.50 m de las rendijas, el ángulo entre la franja brillante de segundo orden y el máximo central es de 0.0230 rad. Si la distancia entre las rendijas es de 0.0350 mm, ¿cuáles son *a)* la longitud de onda y el color de la luz y *b)* el desplazamiento lateral de la franja?
18. **EI** ●●● *a)* Si el aparato de un experimento de Young de doble rendija se sumerge por completo en agua, la distancia entre las franjas de interferencia 1) aumenta, 2) permanece constante o 3) disminuye. Explique por qué. *b)* ¿Cuál sería el desplazamiento lateral en el ejercicio 12, si todo el sistema se sumergiera en agua tranquila?
19. ●●● En un experimento de doble rendija se usa luz de dos longitudes de onda distintas. El lugar de la franja brillante de tercer orden, para la primera luz, que es amarillo naranja ($\lambda = 600$ nm), coincide con el lugar de la franja brillante de cuarto orden de la otra luz. ¿Cuál es la longitud de onda de la otra luz?

9.2 Interferencia en películas delgadas

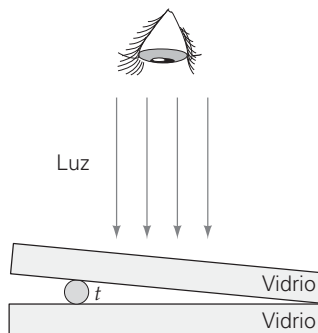
20. **OM** Para una película delgada con $n_1 > n_0$ y $n_1 > n_2$, donde n_1 es el índice de refracción de la película, el espesor adecuado para que haya interferencia constructiva de la luz reflejada es *a)* $\lambda'/4$, *b)* $\lambda'/2$, *c)* λ' o *d)* *a* y *b*.
21. **OM** Para una película delgada con $n_0 < n_1 < n_2$, donde n_1 es el índice de refracción de la película, el espesor mínimo para que haya interferencia destructiva de la luz reflejada es *a)* $\lambda'/4$, *b)* $\lambda'/2$ o *c)* λ' .
22. **OM** Cuando se extiende una película delgada de queroseno en agua, la parte más delgada se ve brillante. El índice de refracción del queroseno es *a)* mayor, *b)* menor o *c)* igual que el del agua.
23. **PC** La mayor parte de las lentes de las cámaras están recubiertas con películas delgadas que les dan una tonalidad azul púrpura con la luz reflejada. ¿Cuáles longitudes de onda no se ven en la luz reflejada?

24. **PC** Cuando se presenta interferencia destructiva de dos ondas en cierto lugar, ahí no hay energía. ¿Viola eso la conservación de la energía? Explique por qué.
25. **PC** Al centro de una figura de anillos de Newton (figura 9.10a), el espesor de la cuña de aire es cero. ¿Por qué siempre es oscura esta zona?
26. **EI** ● Un recubrimiento de una lente con un índice de refracción de 1.5 mide 1.0×10^{-7} m de espesor, y se ilumina con luz blanca. El índice de refracción de la capa es 1.4.
 a) El número de ondas que experimentan el cambio de fase de 180° es 1) cero, 2) uno o 3) dos. Explique por qué.
 b) ¿Para qué longitud de onda de la luz visible la lente será no reflectante?
27. ● Una luz de 550 nm en aire incide normalmente en una placa de vidrio ($n = 1.5$), cuyo espesor es 1.1×10^{-5} m.
 a) ¿Cuál es el grosor del vidrio en función de la longitud de onda de la luz en el vidrio? b) La luz ¿interferirá en forma constructiva o destructiva?
28. ● Se va a recubrir una lente con índice de refracción de 1.60 con un material ($n = 1.40$) que la haga no reflectora para la luz roja ($\lambda = 700$ nm), que incide normalmente. ¿Cuál es el espesor mínimo requerido para el recubrimiento?
29. ●● El fluoruro de magnesio ($n = 1.38$) se utiliza con frecuencia como recubrimiento de lentes, para hacerlos anti-reflectantes. ¿Cuál es la diferencia en el espesor mínimo de la película necesario para la transmisión máxima de la luz azul ($\lambda = 400$ nm) y de la luz roja ($\lambda = 700$ nm)?
30. ●● Una celda solar debe tener un recubrimiento no reflectante de un material transparente. a) El espesor del recubrimiento ¿dependerá del índice de refracción del sustrato en la celda solar? Describa los posibles escenarios. b) Si $n_{\text{solar}} > n_{\text{película}}$ y $n_{\text{película}} = 1.22$, ¿cuál es el espesor mínimo de la película cuando se usa luz con una longitud de onda de 550 nm?
31. **EI** ●● Sobre el agua flota una película delgada de aceite ($n = 1.50$). Se observa interferencia destructiva con luz de 480 nm y de 600 nm, cada una en distinto lugar. a) Si el número de orden es el mismo para ambas longitudes de onda, ¿cuál longitud de onda está en el mayor espesor? 1) 480 nm, 2) 600 nm o 3) ambas. Explique por qué. b) Calcule los dos espesores mínimos de la película de aceite, suponiendo que la incidencia es normal.
32. ●● Una lente de cámara ($n = 1.50$) está recubierta con una capa delgada de un material cuyo índice de refracción es 1.35. Ese recubrimiento hace que la lente no refleje luz de 450 nm de longitud de onda (en aire) que incide normalmente sobre ella. ¿Cuál es el espesor de la capa más delgada que hará no reflectante a la lente?
33. ●● Dos placas paralelas de vidrio están separadas por una distancia pequeña, como se ve en la ►figura 24.30. Si se ilumina la placa superior con luz de un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm), ¿para qué distancias mínimas de separación la luz a) se reflejará constructivamente y b) se reflejará destructivamente? [Nota: $t = 0$ no es una respuesta en el inciso b.]



◀ **FIGURA 9.30**
 ¿Reflexión o transmisión? Véase el ejercicio 33.

34. **EI** ●●● En la ▼figura 9.31 se ve una cuña de aire, que se podría usar para medir dimensiones pequeñas, como el diámetro de un alambre delgado. a) Si el vidrio superior se ilumina con luz monocromática, la figura de interferencia que se observará es 1) brillante, 2) oscura o 3) líneas brillantes y oscuras de acuerdo con el espesor de la película de aire. Explique por qué. b) Expresé los lugares de las franjas brillantes de interferencia en términos del espesor de la cuña, medido desde el vértice de ésta.



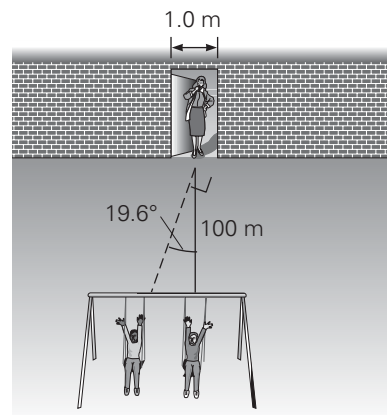
◀ **FIGURA 9.31** Cuña de aire Véanse los ejercicios 34 y 35.

35. ●●● Las placas de vidrio de la figura 9.31 están separadas por un filamento delgado y redondo. Cuando la placa superior se ilumina en dirección normal con luz cuya longitud de onda es de 550 nm, el filamento queda directamente debajo de la sexta franja brillante. ¿Cuál es el diámetro del filamento?

9.3 Difracción

36. **OM** En una figura de difracción con una sola rendija, a) todos los máximos tienen el mismo ancho, b) el máximo central tiene ancho doble con respecto a los máximos laterales, c) los máximos laterales tienen ancho doble con respecto al máximo central o d) ninguna de las opciones anteriores es válida.
37. **OM** Al aumentar la cantidad de líneas de una rejilla de difracción por unidad de longitud, el espacio entre las franjas brillantes a) aumenta, b) disminuye o c) permanece constante.
38. **OM** En una figura de difracción de una sola rendija, si la longitud de onda de la luz aumenta, el ancho del máximo central, a) aumenta, b) disminuye o c) permanece constante.
39. **PC** De acuerdo con la ecuación 9.8, ¿se pueden ver los mínimos $m = 2$ si $w = \lambda$? ¿Y la franja oscura $m = 1$?

40. **PC** Al explicar la difracción en una sola rendija, se supuso que la longitud de la rendija es mucho mayor que su ancho. ¿Qué cambiaría en la figura de difracción si la longitud fuera aproximadamente igual al ancho de la rendija?
41. **PC** En una rejilla de difracción, las rendijas están muy próximas entre sí. ¿Qué ventaja tiene este diseño?
42. ● Se ilumina una rendija de 0.20 mm de ancho con luz monocromática de 480 nm de longitud de onda, y se forma una figura de difracción en una pantalla a 1.0 m de la rendija. *a)* ¿Cuál es el ancho del máximo central? *b)* ¿Cuáles son los anchos de las franjas brillantes (máximos) de segundo y tercer orden?
43. ● Se ilumina una rendija de 0.025 mm de ancho con luz roja ($\lambda = 680$ nm). ¿Cuál es el ancho de *a)* el máximo central y *b)* los máximos laterales de la figura de difracción que se forma en una pantalla a 1.0 m de la rendija?
44. ● ¿A qué ángulo se verá el máximo de difracción de segundo orden, usando una rejilla de difracción con espaciamiento de $1.25 \mu\text{m}$, cuando se ilumina con luz de 550 nm de longitud de onda?
45. ● Una persiana veneciana es, en esencia, una rejilla de difracción, no para la luz visible sino para ondas de mayores longitudes. Si la distancia entre las hojas de una persiana veneciana es de 2.5 cm, *a)* ¿para qué longitud de onda habrá un máximo de primer orden en un ángulo de 10° y *b)* ¿qué clase de radiación es ésa?
46. **EI** ●● Se ilumina una sola rendija con luz monocromática, y se coloca detrás de ella una pantalla, para observar la figura de difracción. *a)* Si el ancho de la rendija aumenta, el ancho del máximo central 1) aumentará, 2) no cambiará o 3) disminuirá. ¿Por qué? *b)* Si el ancho de la rendija es de 0.50 mm, la longitud de onda es de 680 nm y la pantalla está a 1.80 m de la rendija, ¿cuál es el ancho del máximo central? *c)* ¿Y si el ancho de la rendija fuera de 0.60 mm?
47. ●● Una rejilla de difracción debe tener los máximos de segundo orden a 10° del máximo central para el extremo rojo ($\lambda = 700$ nm) del espectro visible. ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla?
48. ●● Cierta red produce un ángulo de desviación de 25° para el máximo de primer orden de rayos X monocromáticos, cuya frecuencia es de 5.0×10^{17} Hz. ¿Cuál es el espaciamiento de la red cristalina?
49. ●● Calcule los ángulos de difracción que produce una rejilla con 7500 líneas/cm con los componentes azul ($\lambda = 420$ nm) y rojo ($\lambda = 680$ nm) de los espectros de primer y segundo orden.
50. **EI** ●● *a)* Sólo es posible observar un número limitado de franjas brillantes con una rejilla de difracción. El factor (o factores) que limita el número de franjas brillantes que se observan es 1) la longitud de onda, 2) el espaciamiento de la rejilla o 3) ambos. Explique por qué. *b)* ¿Cuántas franjas brillantes se ven cuando una luz monocromática de 560 nm de longitud de onda ilumina una rejilla de difracción que tiene 10 000 líneas/cm, y cuáles son sus números de orden?
51. ●● En determinada figura de difracción, el componente rojo (700 nm) del espectro de segundo orden se desvía formando un ángulo de 20° . *a)* ¿Cuántas líneas por centímetro tiene la rejilla? *b)* Si la rejilla se ilumina con luz blanca, ¿cuántas franjas brillantes del espectro visible completo se producen?
52. ●● Una luz blanca cuyos componentes tienen longitudes de onda de 400 a 700 nm ilumina una rejilla de difracción, con 4000 líneas/cm. ¿Se traslapan los espectros de primer y segundo orden? Justifique la respuesta.
53. **EI** ●● Una luz blanca cuyas longitudes de onda van del azul (400 nm) al rojo (700 nm) ilumina una rejilla de difracción con 8000 líneas/cm. *a)* Para el primer orden espectral, ¿cuál color, el azul o el rojo, estará más cerca del máximo central? ¿Por qué? *b)* ¿Cuáles son los ángulos del primer orden para el azul y el rojo?
54. ●● Una rejilla de difracción con 8000 líneas/cm se ilumina con un haz de luz roja monocromática de un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm). ¿Cuántos máximos laterales se forman en la figura de difracción, y en qué ángulos se observan?
55. ●●● Demuestre que para una rejilla de difracción, la parte violeta ($\lambda = 400$ nm) del espectro de tercer orden se traslapa con la parte amarillo-anaranjada ($\lambda = 600$ nm) del espectro de segundo orden, independientemente de la distancia entre líneas.
56. **EI** ●●● Una maestra de pie en el umbral de una puerta de 1.0 m de ancho sopla un silbato con una frecuencia de 1000 Hz para que se reúnan los niños que están jugando en el patio (▼ figura 9.32). Dos niños juegan en los columpios a 100 m del edificio de la escuela. Uno de ellos está a un ángulo de 0° y el otro a un ángulo de 19.6° en relación con la normal de la puerta. *a)* No escuchará el silbato 1) sólo el niño a 0° , 2) sólo el niño a 19.6° o 3) ninguno de los dos niños. Explique por qué. *b)* Si la rapidez del sonido en el aire es de 335 m/s, ¿el niño ubicado a 19.6° escuchará el silbato?



▲ FIGURA 9.32 El momento de la verdad Véase el ejercicio 56. (El dibujo no se trazó a escala.)

9.4 Polarización

57. **OM** Se puede polarizar la luz por *a*) reflexión, *b*) refracción, *c*) absorción o *d*) todo lo anterior.
58. **OM** El ángulo de Brewster depende de *a*) el índice de refracción del material, *b*) la ley de Bragg, *c*) la reflexión interna, o *d*) la interferencia.
59. **OM** Una onda sonora no puede polarizarse. Esto es porque el sonido *a*) no es una onda de luz, *b*) es una onda transversal, *c*) es una onda longitudinal, *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.
60. **PC** Dados dos pares de anteojos para el sol, ¿podría usted decir si uno o los dos son polarizantes?
61. **PC** Supongamos que sostiene dos láminas polarizantes frente a usted, y que mira a través de ellas. ¿Cuántas veces se vería que las láminas se aclaran y oscurecen, si *a*) una de ellas girara una revolución completa, *b*) si las dos giraran una revolución completa, con la misma rapidez pero en sentidos contrarios, *c*) si ambas se giraran una vuelta completa con la misma rapidez y con el mismo sentido y *d*) si una girara el doble de rápido que la otra, y la más lenta girara una revolución completa?
62. **PC** ¿Cómo produce luz polarizada la absorción selectiva?
63. **PC** Si se pone un par de anteojos polarizantes frente a la pantalla de cristal líquido de una calculadora, y se hacen girar, ¿qué se observa?
64. ● Algunas clases de vidrio tienen un intervalo de índices de refracción entre 1.4 y 1.7, aproximadamente. ¿Cuál es el intervalo del ángulo de polarización (de Brewster) para esos vidrios cuando la luz incide en ellos procedente del aire?
65. **EI** ● Una luz incide en un cierto material en aire. *a*) Si el índice de refracción del material aumenta, el ángulo de polarización (de Brewster) 1) aumentará también, 2) disminuirá o 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b*) ¿Cuáles son los ángulos de polarización si el índice de refracción es 1.6 y 1.8?
66. ● Un par de polarizador-analizador puede tener los ejes de transmisión formando ángulos de 30° o 45°. ¿Cuál ángulo permite la mayor transmisión de luz?
67. **EI** ●● Una luz no polarizada de intensidad I_0 incide en un par polarizador-analizador. *a*) Si el ángulo entre el polarizador y el analizador aumenta en el intervalo que va de 0 a 90°, la intensidad de la luz transmitida 1) también aumentará, 2) disminuirá o 3) permanecerá constante. Explique por qué. *b*) Si el ángulo entre el polarizador y el analizador es de 30°, ¿qué intensidad de luz se transmite a través del polarizador y del analizador, respectivamente? *c*) ¿Y si el ángulo es de 60°?
68. ●● Un rayo de luz incide en una placa de vidrio ($n = 1.62$) en aire, y el rayo reflejado se polariza por completo. ¿Cuál es el ángulo de refracción del rayo?
69. ●● El ángulo crítico para reflexión interna en cierto medio es de 45°. ¿Cuál es el ángulo de polarización (de Brewster) para la luz que incide externamente en ese medio?
70. **EI** ●● El ángulo de incidencia se ajusta de tal forma que haya polarización lineal máxima en la reflexión de la luz en una pieza de plástico transparente en aire. *a*) ¿Habrá luz transmitida? 1) No, 2) habrá transmisión máxima o 3) se transmitirá algo de luz a través del plástico. Explique por qué. *b*) Si el índice de refracción del plástico es 1.22, ¿cuál es el ángulo de refracción en él?
71. ●● La luz solar se refleja en los vidrios verticales de una ventana ($n = 1.55$). ¿Cuál será la altitud (el ángulo sobre el horizonte) del Sol para que la luz reflejada esté totalmente polarizada?
72. **EI** ●● Una pieza de vidrio ($n = 1.60$) podría estar en el aire o sumergida en agua. *a*) El ángulo de polarización (de Brewster) en el agua 1) es mayor, 2) menor o 3) igual que en el aire. Explique por qué. *b*) ¿Cuál es el ángulo de polarización cuando la pieza está en el aire y cuando está sumergida en el agua?
73. ●●● Se cubre una placa de vidrio crown con una capa de agua. Un rayo de luz viene del aire e incide en el agua, donde se transmite en forma parcial. ¿Hay algún ángulo de incidencia para el que la luz que se refleja en la interfase agua-vidrio tenga polarización lineal máxima? Justifique matemáticamente la respuesta.

*9.5 Dispersión atmosférica de la luz

74. **OM** ¿Cuál de los siguientes colores de dispersa más en la atmósfera? *a*) azul, *b*) amarillo, *c*) rojo, *d*) no hay diferencia entre los colores.
75. **OM** La dispersión implica *a*) la reflexión de la luz en las partículas, *b*) la refracción de la luz en las partículas, *c*) la absorción e irradiación de la luz por las partículas o *d*) ninguna de las opciones anteriores es válida.
76. **PC** Explique por qué el cielo es rojo al amanecer y al atardecer, y azul durante el día.
77. **PC** *a*) ¿Por qué no es uniforme el azul del cielo en un día claro y sin nubes? *b*) ¿De qué color sería el cielo o el espacio para un astronauta en la Luna?

Ejercicios adicionales

78. Una cuña delgada de aire entre dos placas planas de vidrio forma bandas de interferencia claras y oscuras cuando se ilumina con una luz monocromática en incidencia normal. (Véase la figura 9.9.) *a*) Demuestre que el espesor de la cuña de aire varía $\lambda/2$ de una banda brillante a la siguiente; λ es la longitud de onda de la luz. *b*) ¿Cuál sería el cambio de espesor de la cuña entre las franjas claras, si el espacio estuviera lleno con un líquido con índice de refracción n ?

79. Un vendedor está tratando de venderle una fibra óptica y le dice que ésta da luz linealmente polarizada cuando la luz se refleja internamente por completo en la interfase fibra-aire. *a)* ¿La compraría? Explique por qué. *b)* Si la reflexión total interna ocurre a un ángulo de 35° , ¿cuál es el ángulo de polarización (de Brewster)?
80. Tres rendijas paralelas de ancho w tienen una separación d entre ellas, donde $d = 3w$. *a)* ¿Sería posible ver todos los máximos de interferencia? Explique por qué. *b)* Si no es así, ¿cuáles máximos de interferencia faltarían? [*Sugerencia:* véase la figura 9.16.]
81. Si se aumentara al doble el ancho de la rendija en un experimento con una sola rendija, la distancia a la placa se redujera una tercera parte y la longitud de onda de la luz cambiara de 600 a 450 nm, ¿cómo resultaría afectado el ancho de las franjas brillantes?
82. Demuestre que cuando la luz reflejada está completamente polarizada, la suma del ángulo de incidencia y del ángulo de refracción es igual a 90° .
83. ¿Cuál es el máximo orden espectral que se puede ver en una rejilla de difracción con 9000 líneas/cm cuando se ilumina con luz blanca?

| | |
|------------------------------|-----|
| 10.1 El ojo humano | 275 |
| 10.2 Microscopios | 281 |
| 10.3 Telescopios | 285 |
| 10.4 Difracción y resolución | 289 |
| *10.5 Color | 292 |



HECHOS DE FÍSICA

- Alrededor del 80% de la capacidad de refracción de un ojo humano proviene de la córnea, mientras que el otro 20% proviene del cristalino. Este último modifica su forma para enfocar objetos más cercanos o más alejados, gracias a los músculos ciliares.
- El ojo humano capta una gran cantidad de información. Si se le compara con una cámara digital, el ojo humano es equivalente a una de 500 megapíxeles. Una cámara digital común ofrece una resolución de entre 2 y 10 megapíxeles.
- Un glóbulo rojo tiene un diámetro aproximado de $7\ \mu\text{m}$ ($7 \times 10^{-6}\ \text{m}$). Cuando se observa con un microscopio compuesto de $1000\times$, parece medir $7\ \text{mm}$ ($7 \times 10^{-3}\ \text{m}$).
- Algunas cámaras instaladas en satélites artificiales tienen una excelente resolución. Desde el espacio son capaces de leer las placas de los automóviles.

La visión es uno de los medios principales de que disponemos para adquirir información sobre el mundo que nos rodea. Sin embargo, las imágenes que muchos ojos ven no son claras ni están enfocadas, y son necesarios los anteojos o algún otro remedio. En la última década se han conseguido grandes avances en la terapia a base de lentes de contacto y en la corrección quirúrgica de defectos de la visión. Un procedimiento muy difundido es la cirugía con láser, que se ilustra en la fotografía de esta página. (Véase el pliego a color al final del libro.) Esa cirugía es recomendable en procedimientos tales como la reparación de retinas desprendidas, destrucción de tumores oculares y la detención de crecimiento anormal de los vasos sanguíneos, que pueden poner en riesgo la visión.

Los instrumentos ópticos tienen la función básica de mejorar y ampliar el poder de la observación con el ojo humano, y aumentan nuestra visión. En una variedad de instrumentos ópticos, que incluyen los microscopios y los telescopios, se usan espejos y lentes.

Las primeras lentes de aumento fueron gotas de agua en un agujero pequeño. Para el siglo xvii, los artesanos podían tallar lentes de regular calidad para microscopios simples o para vidrios de aumento, que se utilizaban sobre todo en estudios botánicos. (Estas primeras lentes también se usaban en las gafas.) Pronto se desarrolló el microscopio compuesto básico, que requiere de dos lentes. Los microscopios compuestos modernos, capaces de aumentar un objeto hasta 200 veces, permitieron a nuestra visión penetrar en el mundo de los microbios.

Alrededor de 1609 Galileo usó lentes para construir un telescopio astronómico que le permitió observar los valles y las montañas de la Luna, las manchas solares y los cuatro satélites mayores de Júpiter. Actualmente existen telescopios gigantes que usan lentes y espejos, que nos permiten remontarnos en el pasado conforme vemos las galaxias más alejadas tal y como eran tiempo atrás.

¿Qué conoceríamos del universo y de nuestro mundo si esos instrumentos no se hubieran inventado? No conoceríamos las bacterias, y los planetas, estrellas y galaxias seguirían siendo para nosotros sólo puntos misteriosos de luz.

Los espejos y las lentes se describieron en el capítulo 8, y otros fenómenos ópticos en el capítulo 9. Las bases establecidas en esos capítulos se aplicarán ahora en el estudio de la visión y de los instrumentos ópticos. En este capítulo conoceremos el instrumento óptico fundamental: el ojo humano, sin el cual los demás casi hubieran sido inútiles. También aprenderemos más acerca del diseño de microscopios y telescopios, y acerca de los factores que limitan la visión con esos dispositivos.

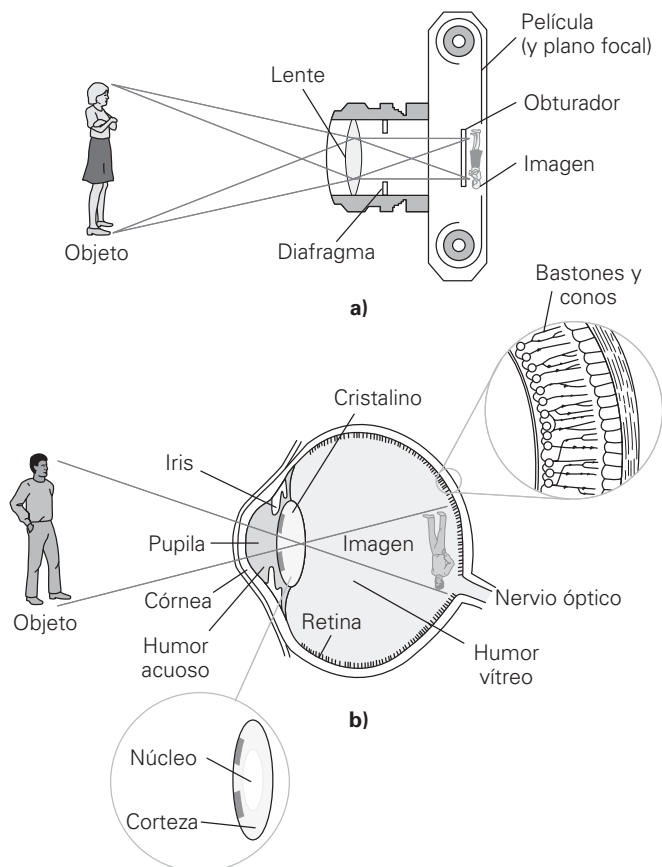
10.1 El ojo humano

OBJETIVOS: a) Describir el funcionamiento óptico del ojo y b) explicar algunos defectos frecuentes de la visión, y la forma en que se corrigen.

El ojo humano es el instrumento óptico más fundamental, porque sin él no existiría el campo de la óptica. El ojo humano se asemeja en muchos aspectos a una cámara sencilla (▼figura 10.1). Una cámara sencilla está formada por una lente convergente, que se utiliza para enfocar las imágenes en una película sensible a la luz (en el caso de las cámaras tradicionales), o en un *dispositivo de cargas interconectadas* o CCD (en las cámaras digitales), en la parte posterior del interior de la cámara. (Recuerde que en el capítulo 8 se dijo que para objetos relativamente lejanos, una lente convergente produce una imagen real, invertida y más pequeña.) La cámara tiene un diafragma para ajustar la abertura, y un obturador para controlar la cantidad de luz que entra a la cámara.

También el ojo tiene una lente convergente que enfoca las imágenes en el recubrimiento sensible a la luz (la retina) en la superficie posterior del globo ocular. El párpado se puede considerar como un obturador; sin embargo, el obturador de una cámara, que controla el tiempo de exposición de la película, se abre en general sólo durante una fracción de segundo, mientras que el párpado está normalmente abierto y la exposición es continua. El sistema nervioso humano hace una función análoga a la de un obturador: analiza las señales de la imagen que produce el ojo, con una frecuencia de 20 a 30 veces por segundo. El ojo más bien debería compararse con una cámara de cine o de video, que exponen una cantidad similar de cuadros (o imágenes) por segundo.

Nota: en la sección 8.3 se describió la formación de imágenes por una lente convergente; véase la figura 8.15a.



◀ **FIGURA 10.1** Analogía de una cámara con el ojo En algunos aspectos, a) una cámara se parece al b) ojo humano. Se forma una imagen en la película, en una cámara y en la retina en el ojo. (Las propiedades refringentes complejas del ojo no se muestran aquí, porque intervienen varios medios con refracción.) Para una descripción comparativa, véase el texto.

Aunque las funciones ópticas del ojo son relativamente sencillas, sus funciones fisiológicas son bastante complejas. Como se ve en la figura 10.1b, el globo ocular es una cámara casi esférica. Tiene un diámetro interior aproximado de 1.5 cm, y está lleno de una sustancia parecida a la jalea, llamada *humor vítreo*. Tiene una cubierta externa blanca, llamada *esclerótica*, parte de la cual es visible y forma el “blanco” del ojo. La luz entra en el ojo a través de un tejido curvo y transparente llamado *córnea*, y pasa a un fluido transparente llamado *humor acuoso*. Detrás de la *córnea* hay un diafragma circular, el *iris*, cuya abertura central se llama *pupila*. El iris contiene el pigmento que determina el color del ojo. Mediante acción muscular, el iris puede cambiar el área de la pupila (de 2 a 8 mm de diámetro) controlando así la cantidad de luz que entra al ojo.

Detrás del iris está el *crystalino*, que es una lente convergente formada por fibras vítreas microscópicas. (Véase el ejemplo conceptual 7.5 en la p. 195 acerca de los elementos internos, el núcleo y la corteza, dentro del cristalino.) Cuando los músculos fijos al cristalino ejercen tensión sobre éste, las fibras vítreas se deslizan una sobre la otra, modificando la forma de la lente y, por consiguiente, su distancia focal; de esta forma, ayudan a enfocar la imagen sobre la retina adecuadamente. Note que la imagen está *invertida* (figura 10.1b). Sin embargo, no vemos una imagen invertida porque el cerebro reinterpreta esta imagen como si estuviera derecha.

En la pared interna trasera del globo ocular hay una superficie sensible a la luz, llamada **retina**, desde donde el nervio óptico transmite señales al cerebro. La retina está formada por nervios y por dos tipos de receptores de luz, o células fotosensibles, llamadas **bastones** y **conos**, por sus formas. Los bastones son más sensibles a la luz que los conos, y distinguen la luz de la oscuridad con bajas intensidades luminosas (visión crepuscular). Los conos pueden distinguir intervalos de frecuencia de luz con suficiente intensidad, que el ojo interpreta como colores (visión de color). La mayoría de los conos están agrupados en torno a una región central de la retina llamada *mácula*. Los bastones, más numerosos que los conos, están fuera de esa región, y se distribuyen en la retina de manera no uniforme.

El ajuste del foco del ojo difiere del de una cámara. Una lente de cámara tiene distancia focal constante, y se varía la distancia a la imagen moviendo la lente con respecto a la película, para producir imágenes nítidas cuando las distancias al objeto son distintas. En el ojo, la distancia a la imagen es constante y se varía la distancia focal del cristalino (porque actúan los músculos adyacentes para variar la forma del ojo) para producir imágenes nítidas, independientemente de las distancias al objeto. Cuando el ojo está enfocado en objetos distantes, los músculos están relajados y el cristalino es más delgado; tiene una potencia aproximada de 20 D (dioptrías). Recuerde que, como vimos en el capítulo 8, la potencia (P) de una lente, en dioptrías (D), es igual al recíproco de su distancia focal *en metros*. Entonces 20 D corresponde a una distancia focal de $f = 1/(20 \text{ D}) = 0.050 \text{ m} = 5.0 \text{ cm}$. Cuando el ojo está enfocado en objetos más cercanos, el cristalino es más grueso y disminuyen el radio de curvatura y la distancia focal. Para un acercamiento, el poder de la lente puede aumentar hasta 30 D ($f = 0.033 \text{ m}$) o más en los niños pequeños. El ajuste de la distancia focal del cristalino se llama *acomodamiento*. (Vea un objeto cercano y después uno en la lejanía, y note lo rápido que es el acomodamiento. Prácticamente es instantáneo.)

Los extremos del intervalo en el que es posible tener una visión clara (enfoque agudo) se llaman *punto lejano* y *punto cercano*. El *punto lejano* es la máxima distancia a la que puede ver el ojo los objetos con claridad, y se supone que es el infinito para el ojo normal. El *punto cercano* es el lugar más cercano al ojo en el que los objetos se pueden ver con claridad. Esta posición depende del grado con el que se puede deformar (engrosar) el cristalino por acomodamiento. El intervalo de acomodamiento disminuye en forma gradual al aumentar la edad, porque el cristalino pierde su elasticidad. En general, el punto cercano se aleja en forma gradual con la edad. En la tabla 10.1 se ven las posiciones aproximadas del punto cercano a diversas edades.

Los niños pueden ver imágenes nítidas de objetos que están a menos de 10 cm de sus ojos, y el cristalino de un adulto joven normal es capaz de hacer lo mismo con objetos ubicados a una distancia de entre 12 y 15 cm. Sin embargo, los adultos a la edad aproximada de 40 años sufren un corrimiento en el punto cercano, hasta más allá de los 25 cm. Es probable que usted haya notado que las personas de más de 40 años apartan de sus ojos el material de lectura, para ponerlo dentro de su intervalo de acomodamiento. Cuando las letras son demasiado pequeñas o los brazos demasiado cortos, la solución son las lentes especiales para leer. La recesión del punto cercano con la edad no se considera defecto o visión anormal, porque avanza más o menos al mismo ritmo en la mayor parte de los ojos normales; en cambio, se considera una parte normal del proceso de envejecimiento.

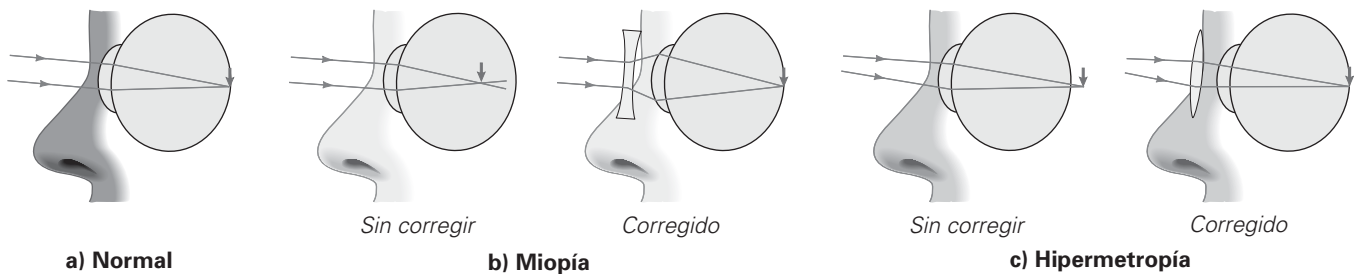
TABLA 10.1

Puntos cercanos aproximados del ojo normal a distintas edades

| Edad (años) | Punto cercano (centímetros) |
|-------------|-----------------------------|
| 10 | 10 |
| 20 | 12 |
| 30 | 15 |
| 40 | 25 |
| 50 | 40 |
| 60 | 100 |

Nota: la relación entre potencia de una lente en dioptrías y distancia focal se presenta en la ecuación 8.9, en la sección 8.4.

Nota: el ojo ve con claridad entre su punto cercano y su punto lejano.



Defectos de la visión

Hablar del ojo “normal” (▲figura 10.2a) implica que algunos ojos producen visión deficiente. Ése es precisamente el caso, y se manifiesta en la cantidad aparente de personas que usan anteojos o lentes de contacto. Los ojos de muchas personas no se pueden acomodar dentro del intervalo normal (de 25 cm al infinito). Esas personas tienen uno de los dos defectos de la visión más comunes: miopía o visión cercana, o hipermetropía o visión lejana. Los dos defectos se pueden corregir con anteojos, lentes de contacto o cirugía.

La **miopía** o visión cercana es la capacidad de ver con claridad objetos cercanos, pero no objetos lejanos. Esto es, el punto lejano no es el infinito, sino uno más cercano. Cuando un miope ve un objeto más allá de su punto lejano, los rayos se enfocan *frente* a la retina (figura 10.2b). En consecuencia, la imagen sobre la retina es borrosa, o fuera de foco. Al acercar el objeto hacia el ojo, la imagen retrocede hacia la retina. Cuando el objeto alcanza el punto lejano para ese ojo, se forma una imagen nítida sobre la retina.

La miopía se origina cuando el globo ocular es demasiado largo, o porque la curvatura de la córnea es demasiado pronunciada. Sea cual fuere la razón, las imágenes de objetos lejanos se enfocan frente a la retina. Esta condición se corrige con lentes divergentes adecuadas, que hacen que los rayos diverjan antes de alcanzar la córnea. Entonces el ojo enfoca la imagen más atrás, para que caiga en la retina.

La **hipermetropía** o visión lejana es la capacidad de ver con claridad objetos lejanos, pero no objetos cercanos. Esto es, el punto cercano está más alejado del ojo de lo normal. La imagen de un objeto que está más cercano al ojo que el punto cercano se formaría detrás de la retina (figura 10.2c). La hipermetropía se produce porque el globo ocular es demasiado corto, porque la córnea tiene una curvatura insuficiente, o porque el cristalino ha perdido elasticidad. Si esto ocurre como parte del proceso de envejecimiento, como se explicó antes, se le llama *presbiopía* o vista cansada.

La visión lejana se corrige con anteojos de lentes convergentes. De esta forma, los rayos convergen y el ojo puede enfocar la imagen en la retina. También se prescriben lentes convergentes a personas de mediana edad que padecen presbiopía, una condición de la visión en la cual el cristalino pierde su flexibilidad, lo que dificulta enfocar los objetos cercanos.

Ejemplo integrado 10.1 ■ Corrección de la miopía: uso de lentes divergentes

a) Un optometrista tiene la opción de prescribir anteojos convencionales o lentes de contacto a un paciente, para corregir su miopía (▼figura 10.3). Normalmente, los anteojos convencionales se ponen a algunos centímetros frente al ojo, y los lentes de contacto sobre el mismo ojo. La potencia de los lentes de contacto que prescribe debe ser 1) igual, 2) mayor o 3) menor que la de los anteojos convencionales. ¿Por qué? b) Cierta persona miope no puede ver con claridad los objetos que están a más de 78.0 cm de sus ojos. ¿Qué potencia deben tener los anteojos convencionales o los lentes de contacto para que esta persona vea con claridad los objetos lejanos? Supongamos que los anteojos están a 3.0 cm del ojo.

a) Razonamiento conceptual. Para la miopía, los lentes de corrección son divergentes (figura 10.3). El lente debe poner la imagen de un objeto lejano ($d_o = \infty$) en el punto lejano del ojo, esto es, a d_i . La imagen, que actúa como objeto para el ojo, queda entonces dentro del intervalo de acomodamiento. Como la distancia a la imagen se *mide a partir del lente*, un lente de contacto debe tener una *mayor* distancia a la imagen. Para un lente de contacto $d_i = -(d_i)$, y para los anteojos convencionales $d_i = -|d_i - d|$, donde d es la distancia entre los lentes normales y el ojo. Para especificar la distancia a la imagen se usa signo menos y valores absolutos, porque la imagen es virtual y está en el lado del objeto del lente. (Como recordará, en el capítulo 8 se explicó que las lentes divergentes sólo pueden formar imágenes virtuales.)

▲ FIGURA 10.2 Miopía e hipermetropía

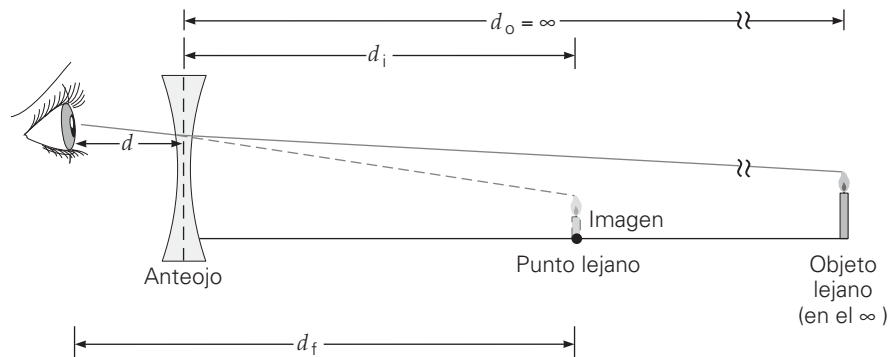
a) El ojo normal produce imágenes nítidas en la retina de objetos ubicados entre su punto cercano y su punto lejano. La imagen es real, invertida y siempre es menor que el objeto. (¿Por qué?) Aquí el objeto es una flecha lejana, que apunta hacia arriba (y que no se muestra); y los rayos de luz provienen de su punta. b) En un ojo miope, la imagen de un objeto *lejano* se enfoca *frente* a la retina. Este defecto se corrige con una lente divergente. c) En un ojo hipermetrópe, la imagen de un objeto *cercano* se enfocaría *atrás* de la retina. Este defecto se corrige con una lente convergente. (El dibujo no está a escala.)

Nota: repase los ejemplos 8.6 y 8.8.

Nota: la formación de imágenes mediante lentes convergentes se explicó en la sección 8.3; véase la figura 8.18.

(continúa en la siguiente página)

► **FIGURA 10.3 Corrección de la miopía** Se usan lentes divergente. Véase el Ejemplo integrado 10.1. Sólo se muestran anteojos normales. Si los lentes son de contacto, están directamente frente al ojo ($d = 0$).



Advierta que d_i es negativa. Recuerde que la potencia de una lente es $P = 1/f$ (ecuación 8.9). Si se pueden determinar las distancias al objeto y a la imagen, d_o y d_i , se aplica la ecuación de la lente delgada (ecuación 8.5) para calcular P :

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{|d_i|}$$

Esto es, una mayor $|d_i|$ causará una menor P , por lo que los lentes de contacto deben tener menor potencia que los anteojos convencionales. Por consiguiente, la respuesta es 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Una vez comprendido el funcionamiento de los lentes correctivos, el cálculo de la parte *b* es directo.

Dado: $d_i = 78 \text{ cm} = 0.780 \text{ m}$ (punto lejano)
 $d = 3.0 \text{ cm} = 0.0300 \text{ m}$

Encuentre: P (en dioptrías) para anteojos normales
 P (en dioptrías) para lentes de contacto

Para anteojos normales,

$$|d_i| = |d_f - d| = 0.780 \text{ m} - 0.0300 \text{ m} = 0.750 \text{ m}$$

(Véase la figura 10.3, considerando que no está a escala.) Por consiguiente, $d_i = -0.750 \text{ m}$.

Entonces, aplicando la ecuación de la lente delgada, se obtiene

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.750 \text{ m}} = -\frac{1}{0.750 \text{ m}} = -1.33 \text{ D}$$

Se necesita una lente negativa, o divergente, con una potencia de 1.33 D.

Para lentes de contacto:

$$|d_i| = |d_f| = 0.780 \text{ m}$$

(ya que $d = 0$). Entonces, $d_i = -0.78 \text{ m}$.

Entonces se aplica la ecuación de la lente delgada para obtener

$$P = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-0.780 \text{ m}} = -\frac{1}{0.780 \text{ m}} = -1.28 \text{ D}$$

Ejercicio de refuerzo. Supongamos que se cometió un error en los anteojos normales de este ejemplo de manera que se usarán lentes “de corrección” de $+1.33 \text{ D}$. ¿Qué sucederá con la imagen de objetos en el infinito? (*Las respuestas a todos los ejercicios de refuerzo aparecen al final del libro.*)

Si el punto lejano cambia utilizando anteojos o lentes de contacto de corrección (véase el ejemplo 10.1), también se afectará el punto cercano. Esto hace que la visión cercana empeore, pero en tal caso se pueden usar *lentes bifocales* para resolver el problema. Benjamin Franklin inventó los bifocales al pegar dos lentes. En la actualidad se fabrican tallando o moldeando lentes con diferentes curvaturas en dos regiones distintas. Con los bifocales se corrige tanto la miopía como la hipermetropía. También existen trifocales, que tienen lentes con tres curvaturas distintas. El lente superior es para la visión lejana y el inferior para la visión cercana. El lente de en medio es para la visión intermedia.

Técnicas más modernas implican la terapia con lentes de contacto o el uso del láser para corregir la miopía. Esto se explica en detalle en la sección A fondo 10.1 de la siguiente página, sobre cirugía y corrección de la córnea. La finalidad de cualquiera de las dos técnicas es cambiar la forma de la superficie expuesta de la córnea, que entonces modifica sus características refringentes. El resultado, en el caso de la miopía, es que la imagen de un objeto lejano cae en la retina.

A FONDO 10.1 CORRECCIÓN DE LA CÓRNEA Y CIRUGÍA

Las formas o superficies imperfectas de la córnea son causa frecuente de errores de refringencia que, a su vez, provocan defectos de visión. Por ejemplo, una córnea con demasiada curvatura causa miopía, mientras que una más aplanada de lo normal causa hipermetropía; y una superficie irregular de la córnea provoca astigmatismo (sección 8.4).

En fecha reciente se ha desarrollado un tratamiento no quirúrgico, a base de lentes de contacto, para mejorar la visión en cuestión de horas. Este procedimiento, llamado *ortoqueratología*, u *Ortho-K*, se realiza en una forma única, pues supone usar lentes de contacto especialmente diseñadas para el paciente. Estas lentes de contacto modifican lentamente la forma de la córnea por medio de una suave presión que mejora la visión de manera rápida y segura. Una buena analogía para describir el procedimiento Ortho-K es el de “ortodoncia para el ojo”.

También se utiliza la cirugía con láser para modificar la forma de la córnea. El procedimiento quirúrgico corrige la for-



FIGURA 1 Cirugía del ojo La cirugía con láser se practica para corregir la forma de la córnea. Cabe destacar que el cirujano no usa guantes de látex. El talco fino que se utiliza en ellos como lubricante podría contaminar el ojo.

ma defectuosa o la superficie irregular de la córnea para que ésta pueda enfocar mejor la luz en la retina, lo que reduce o incluso elimina los defectos de visión (figura 1).

En la cirugía con láser primero se emplea un instrumento muy preciso, llamado *microqueratomo* para producir una capa delgada de la córnea, que queda unida a ésta por un lado (figura 2a). Una vez hecha la capa y doblada hacia atrás, se usa un láser ultravioleta pulsado y enfocado con precisión para dar la forma deseada a la córnea. Cada impulso de láser quita una capa microscópica de la córnea interna del área que se va a modificar para corregir los defectos de la visión (figura 2b). Luego se reinstala la capa de la córnea en su posición original sin necesidad de dar puntadas (figura 2c). El procedimiento suele ser indoloro y los pacientes sólo padecen incomodidades mínimas. Algunos pacientes han reportado que su problema de visión se corrigió al día siguiente de que se realizó el procedimiento.

Todavía se prevén más avances en el tratamiento de la visión. Por ejemplo, se han desarrollado técnicas para reemplazar una córnea dañada con tejidos que se producen gracias a la bioingeniería. Si el paciente tiene un ojo saludable, se cosechan células primarias de él para cultivarlas. Las células crecerán y formarán una capa robusta de tejido, que servirá para reemplazar los tejidos de la córnea dañada. Si el paciente tiene ambos ojos dañados, es posible obtener tejidos donados por los parientes más cercanos.

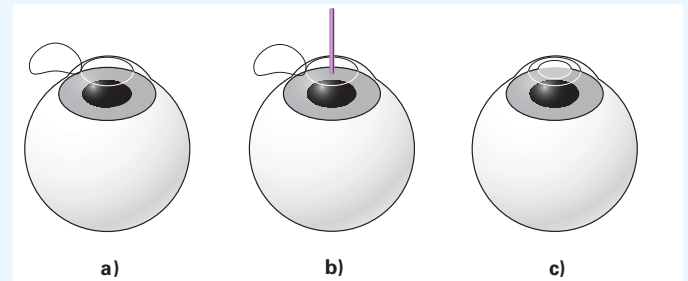


FIGURA 2 Moldeado de la córnea a) Se levanta una capa en la superficie de la córnea. b) Se usa un rayo láser para moldear la córnea. c) Se vuelve a colocar la capa.

Ejemplo integrado 10.2 ■ Corrección de hipermetropía: uso de una lente convergente

Una persona hipermetrope tiene un punto cercano de 75 cm en el ojo izquierdo, y de 100 cm en el derecho. a) Si usa lentes de contacto, la potencia del lente para el ojo izquierdo debe ser 1) mayor, 2) igual o 3) menor que la potencia del lente para el ojo derecho. Explique por qué. b) ¿Qué potencias deben tener los lentes de contacto para que le permitan ver con claridad un objeto a 25 cm de distancia?

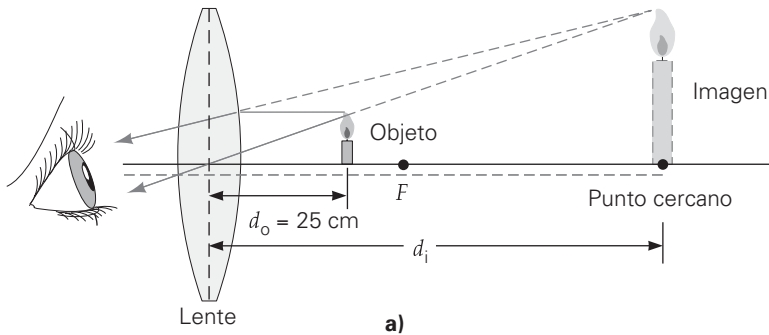
a) Razonamiento conceptual. El punto cercano de un ojo normal es de 25 cm. Para la hipermetropía, el lente de corrección debe ser convergente, y debe formar la imagen en el punto cercano del ojo que coincida con el punto cercano normal. Como el punto cercano del ojo izquierdo (75 cm) está más cercano a la posición normal de 25 cm que el ojo derecho, el lente izquierdo debería tener menor potencia, así que la respuesta correcta es la 3.

b) Razonamiento cuantitativo y solución. Se identificarán los ojos como L (izquierdo) y R (derecho). Las distancias a la imagen son negativas. (¿Por qué?)

Dado: $d_{iL} = -75 \text{ cm} = -0.75 \text{ m}$
 $d_{iR} = -100 \text{ cm} = -1.0 \text{ m}$
 $d_o = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$

Encuentre: P_1 y P_2 (la potencia del lente para cada ojo)

(continúa en la siguiente página)



▲ FIGURA 10.4 Anteojo para lectura y corrección de la hipermetropía *a)* Cuando se ve un objeto en el punto cercano normal (25 cm) con anteojos para lectura que tengan lentes convergentes, la imagen se forma más lejos, pero dentro del intervalo de acomodamiento del ojo (más allá del punto cercano, que ya está atrasado). Véase el Ejemplo integrado 10.2. *b)* Letras pequeñas vistas con anteojos para lectura. La cámara que se usó para tomar esta foto está enfocada atrás de la página, donde se ubica la imagen virtual.

Las ópticas de los ojos de una persona suelen ser distintas, como en este problema, y normalmente se requiere una receta distinta para cada uno. En este caso, cada lente debe formar una imagen en el punto cercano del ojo para un objeto que esté a la distancia (d_o) de 0.25 m. Entonces la imagen actuará como objeto dentro del intervalo de acomodamiento del ojo. Este caso es el de una persona que usa anteojos para leer (▲ figura 10.4). (Para tener mayor claridad, el lente de la figura 10.4a no está en contacto con el ojo.)

Las distancias a la imagen son negativas, porque las imágenes son virtuales (es decir, la imagen está en el mismo lado que el objeto). Con los lentes de contacto, la distancia del ojo al objeto y la del lente al objeto se suponen iguales. Entonces

$$P_L = \frac{1}{f_L} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_{iL}} = \frac{1}{0.25 \text{ m}} - \frac{1}{0.75 \text{ m}} = \frac{2}{0.75 \text{ m}} = +2.7 \text{ D}$$

y

$$P_R = \frac{1}{f_R} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_{iR}} = \frac{1}{0.25 \text{ m}} - \frac{1}{1.0 \text{ m}} = \frac{3}{1.0 \text{ m}} = +3.0 \text{ D}$$

Note que el lente izquierdo tiene menor potencia que el derecho, como se esperaba.

Ejercicio de refuerzo. Se cometió un error al tallar o moldear los lentes de corrección de este ejemplo: el lente para el ojo derecho se talló con la receta para el ojo izquierdo, y viceversa. Analice qué sucede a las imágenes de un objeto a una distancia de 25 cm.

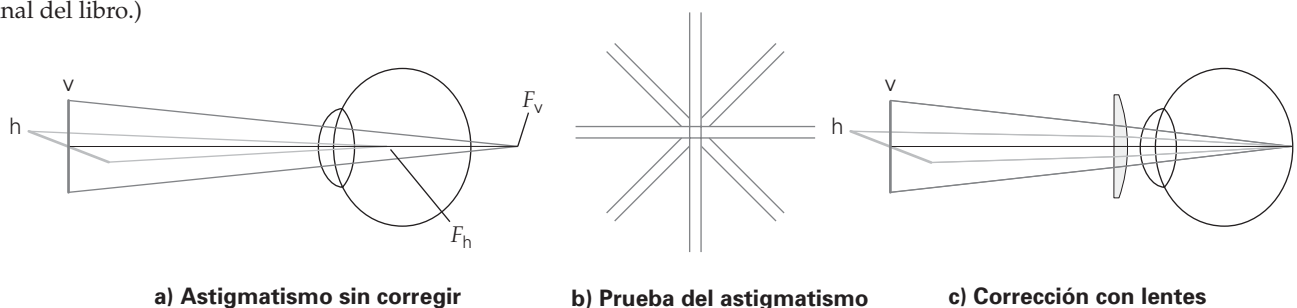
▼ FIGURA 10.5 Astigmatismo

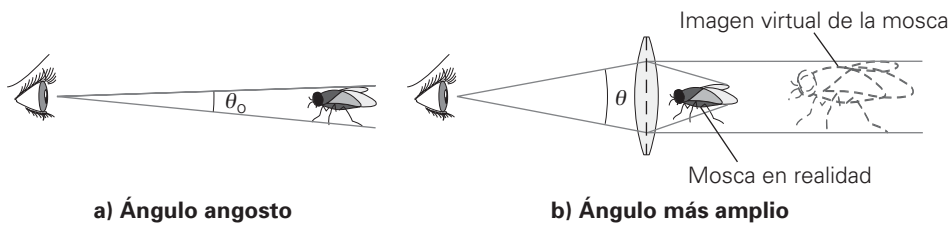
Cuando una de las partes refringentes del ojo no es esférica, el ojo tiene diferentes distancias focales en distintos planos. *a)* El efecto se debe a que los rayos en el plano vertical (rojo) y en el plano horizontal (azul) se enfocan en puntos distintos: F_v y F_h , respectivamente. *b)* Para alguien que tenga ojos astigmáticos, algunas o todas las líneas de este diagrama le parecerán borrosas. *c)* Los lentes no esféricos, como los cilíndricos planoconvexos, se usan para corregir el astigmatismo. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Otro defecto común de la visión es el **astigmatismo**, que se presenta cuando una superficie refringente, como la córnea o el cristalino, no es esférica. En consecuencia, el ojo tiene distancias focales diferentes en distintos planos (▼ figura 10.5a). Los puntos pueden aparecer como rayas, y la imagen de una raya puede estar bien definida en una dirección y borrosa en otra, o borrosa en ambas direcciones. En la figura 10.5b se muestra una prueba para el astigmatismo.

El astigmatismo se corrige con lentes que tengan mayor curvatura en el plano en el que la curvatura del cristalino o la córnea sean deficientes (figura 10.5c). El astigmatismo se reduce con la luz brillante, porque la pupila del ojo se hace más pequeña y al ojo sólo entran rayos cercanos al eje, evitando las orillas de la córnea.

Es probable que usted haya oído hablar de la *visión 20/20*. Pero, ¿qué es? La *agudeza visual* es una medida de cómo se afecta la visión en función de la distancia al objeto. Esta cantidad se determina con una tabla de letras, que se coloca a cierta distancia de los ojos. El resultado se expresa como una fracción: el *numerador* es la distancia a la cual el ojo que se somete a prueba ve con claridad un símbolo común, como la letra “E”; el *denominador* es la distancia a la cual un ojo *normal* ve con claridad la letra. Una califica-





◀ **FIGURA 10.6** Aumento y ángulo
a) Lo grande que parece un objeto se relaciona con el ángulo que subtende o abarca. **b)** El ángulo y el tamaño de la imagen virtual de un objeto aumentan con un lente convergente.

ción de 20/20 (prueba/normal), que a veces se llama visión “perfecta”, quiere decir que a 20 pies de distancia el ojo que se prueba distingue letras de tamaño estándar con tanta claridad como un ojo normal.

10.2 Microscopios

OBJETIVOS: *a)* Diferenciar entre aumento lateral y aumento angular y *b)* describir los microscopios simples y compuestos, así como sus aumentos.

Los microscopios se usan para amplificar los objetos y así poder verlos con más detalle y observar características que, de otra forma, no se podrían estudiar. A continuación se describirán dos tipos básicos de microscopio.

La lente de aumento (microscopio simple)

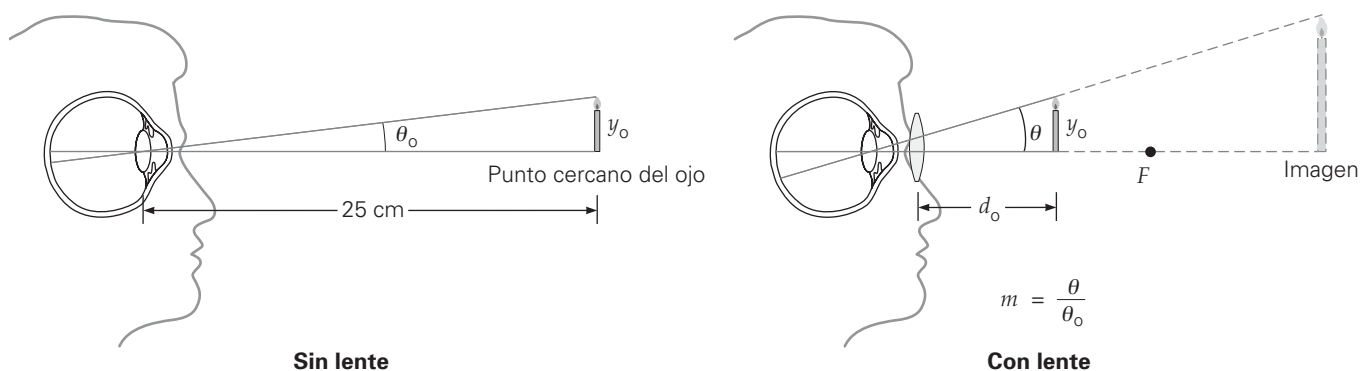
Cuando vemos un objeto lejano, parece muy pequeño. Conforme nuestros ojos se acercan, el objeto parece mayor. Esa dimensión depende del tamaño de la imagen en la retina, que se relaciona con el ángulo que subtende el objeto (▲figura 10.6): cuanto mayor es el ángulo, más grande resulta la imagen.

Cuando se desea examinar los detalles de un objeto u observar algo con detenimiento, acercamos nuestros ojos para que el objeto subtenda un ángulo mayor. Por ejemplo, usted podrá examinar el detalle de una figura en este libro, acercándola a sus ojos. Verá la máxima cantidad de detalle cuando el libro esté en su punto cercano. Si sus ojos se pueden acomodar a menores distancias, un objeto muy cercano a ellos aparecería aún mayor. Sin embargo, como se demuestra con facilidad si acerca este libro a sus ojos, cuando los objetos están más próximos que el punto cercano, las imágenes son borrosas.

Una **lupa o lente de aumento**, que no es más que una simple lente convergente (a veces se le llama *microscopio simple*), forma una imagen clara de un objeto cuando está más próximo que el punto cercano (figura 8.15b). En esa posición, la imagen de un objeto subtende un ángulo mayor y, en consecuencia, parece mayor o aumentada (▼figura 10.7). La lente produce una imagen virtual más allá del punto cercano que enfoca el ojo. Si se usa una lupa manual, es posible ajustar su posición hasta que la imagen se vea con claridad.

Como se ilustra en la figura 10.7, el ángulo subtendido por la imagen virtual de un objeto es mucho mayor cuando se usa una lupa. El aumento de un objeto *visto a través de una lupa* se expresa en función de este ángulo. Este **aumento angular** o poder de aumento, se representa con el símbolo m . El aumento angular se define como la relación

▼ **FIGURA 10.7** Aumento angular
 El aumento angular (m) de una lente se define como la relación entre el tamaño angular de un objeto, visto a través de la lente, y el tamaño angular sin la lente:
 $m = \theta / \theta_0$.



Nota: el aumento angular no es igual al aumento lateral, que se describió en la sección 8.1 (véase la ecuación 8.1).

entre el tamaño angular del objeto visto a través de la lupa (θ) y el tamaño angular del objeto visto sin la lupa (θ_o):

$$m = \frac{\theta}{\theta_o} \quad \text{aumento angular} \quad (10.1)$$

(Esta m no es igual a la M que representa el aumento lateral y es una relación entre alturas: $M = h_i/h_o$.)

El aumento angular máximo se presenta cuando la imagen vista con la lupa está en el punto cercano del ojo, $d_i = -25$ cm, porque esa posición es la más cercana a la que se puede ver con claridad. (Se supondrá un valor de 25 cm como el normal del punto cercano en esta descripción. El signo menos se usa porque la imagen es virtual; véase el capítulo 8.) La distancia correspondiente al objeto se calcula con la ecuación de la lente delgada (ecuación 8.5) como sigue:

$$d_o = \frac{d_i f}{d_i - f} = \frac{(-25 \text{ cm})f}{-25 \text{ cm} - f}$$

esto es,

$$d_o = \frac{(25 \text{ cm})f}{25 \text{ cm} + f} \quad (10.2)$$

donde f se debe expresar en centímetros.

Los tamaños angulares del objeto se relacionan con su altura como sigue:

$$\tan \theta_o = \frac{y_o}{25} \quad \text{y} \quad \tan \theta = \frac{y_o}{d_o}$$

(Véase la figura 10.7.) Suponiendo válida una aproximación para ángulo pequeño ($\tan \theta \approx \theta$), se obtiene

$$\theta_o \approx \frac{y_o}{25} \quad \text{y} \quad \theta \approx \frac{y_o}{d_o}$$

Entonces, el aumento angular máximo se expresa como sigue:

$$m = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{y_o/d_o}{y_o/25} = \frac{25}{d_o}$$

Al sustituir d_o de la ecuación 10.2, se obtiene

$$m = \frac{25}{25f/(25 + f)}$$

que se simplifica a

$$m = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad \text{aumento angular con la imagen en el punto cercano (25 cm)} \quad (10.3)$$

donde f está en centímetros. Las lentes con menores distancias focales producen mayores aumentos angulares.

Para deducir la ecuación 10.3 se supuso que el objeto visto por el ojo sin ayuda está en el punto cercano, al igual que la imagen que se ve en la lente. En realidad, el ojo normal puede enfocar una imagen ubicada en cualquier lugar entre el punto cercano y el infinito. En el extremo, cuando la imagen está en el infinito, el ojo está más relajado; los músculos fijos al cristalino están relajados y el cristalino es delgado. Para que la imagen esté en el infinito, el objeto debe estar en el punto focal de la lente. En este caso,

$$\theta \approx \frac{y_o}{f}$$

y el aumento angular es

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad \text{aumento angular con la imagen en el infinito} \quad (10.4)$$

Desde el punto de vista matemático, parece que el poder de aumento se puede incrementar hasta cualquier valor que se desee, usando lentes que tengan distancias focales suficientemente cortas. Sin embargo, desde el punto de vista físico, las aberraciones de las lentes limitan el intervalo práctico de empleo de las lupas, hasta 3 o 4×, es decir, una imagen aumentada a 3 o 4 veces el tamaño del objeto, cuando se usan normalmente.

Ejemplo 10.3 ■ Elemental: aumento angular de una lupa

Sherlock Holmes usa una lupa con 12 cm de distancia focal, para examinar el detalle fino de unas fibras textiles en la escena de un crimen. a) ¿Cuál es el aumento máximo que da la lupa? b) ¿Cuál es el aumento para ver con ojo relajado?

Razonamiento. En este caso se aplican las ecuaciones 10.3 y 10.4. El inciso a pide el aumento máximo, que se describió al deducir la ecuación 10.3, y se presenta cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo. Para contestar la parte b, note que el ojo está más relajado cuando ve objetos lejanos.

Solución.

Dado: $f = 12 \text{ cm}$ **Encuentre:** a) m ($d_i = \text{punto cercano}$)
b) m ($d_i = \infty$)

a) Se supuso que el punto cercano está a 25 cm en la ecuación 10.3:

$$m = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{12 \text{ cm}} = 3.1\times$$

b) La ecuación 10.4 determina el aumento de la imagen que forma la lente en el infinito:

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{12 \text{ cm}} = 2.1\times$$

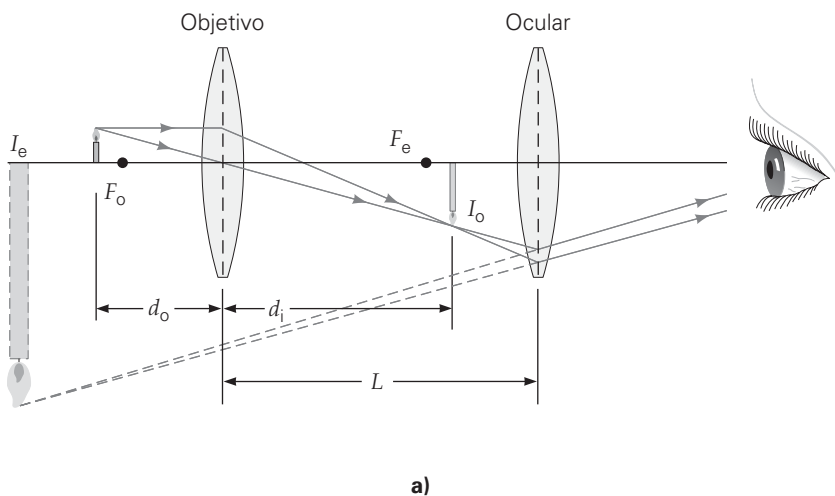
Ejercicio de refuerzo. Suponiendo que el aumento práctico máximo de una lupa es $4\times$, ¿qué tendría más distancia focal, una lupa para ver el punto cercano, o una para punto lejano? ¿Cuánta distancia más?

El microscopio compuesto

Un microscopio compuesto da más aumento que el que se consigue con una sola lente, o microscopio simple. Un **microscopio compuesto** básico consiste en un par de lentes convergentes, cada una de las cuales contribuye al aumento (▼ figura 10.8a). La lente convergente con distancia focal relativamente corta ($f_o < 1 \text{ cm}$) se llama **objetivo**. Produce una imagen real, invertida y agrandada de un objeto colocado un poco más allá de su foco. La otra lente, llamada **ocular**, tiene mayor distancia focal (f_e de algunos centímetros) y se coloca de manera que la imagen que forma el objetivo cae justo *dentro* de su foco, es decir, un poco más cerca que su foco. Esta lente forma una imagen virtual, aumentada e invertida, que ve el observador. En esencia, el objetivo produce una imagen real, y el ocular no es más que una lupa.

El **aumento total** (m_{total}) de una combinación de lentes es igual al *producto* de los aumentos que produce cada una. La imagen formada por el objetivo es mayor que su objeto por un factor M_o igual al aumento lateral ($M_o = -d_i/d_o$). Note que en la figura 10.8a la distancia a la imagen, para la lente objetivo, es aproximadamente igual a L , la distancia entre las lentes; esto es, $d_i \approx L$. (El objetivo forma la imagen I_o justo dentro

▼ **FIGURA 10.8** El microscopio compuesto a) En el sistema óptico de un microscopio compuesto, la imagen real formada por el objetivo está justo atrás del foco del ocular (F_e) y funciona como objeto para esta lente. Un observador que vea por el ocular verá una imagen ampliada. b) Un microscopio compuesto.



Nota: sería de ayuda repasar la sección 8.3 y la figura 8.15.

del foco del ocular.) Además, como el objeto está muy cercano al foco del objetivo, $d_o \approx f_o$. Con estas aproximaciones

$$M_o \approx -\frac{L}{f_o}$$

La ecuación 10.4 define el aumento angular de un ocular para una imagen en el infinito:

$$m_e = \frac{25 \text{ cm}}{f_e}$$

Como el objeto para el ocular (que es la imagen formada por el objetivo) está muy cerca de su foco, una buena aproximación es

$$m_{\text{total}} = M_o m_e = -\left(\frac{L}{f_o}\right)\left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e}\right)$$

o bien

$$m_{\text{total}} = -\frac{(25 \text{ cm})L}{f_o f_e} \quad \text{aumento angular del} \quad \text{microscopio compuesto} \quad (10.5)$$

donde f_o , f_e y L se expresan en centímetros.

El aumento angular de un microscopio compuesto es negativo, lo que indica que la imagen final está invertida, en comparación con la orientación inicial del objeto. Sin embargo, con frecuencia sólo se menciona el aumento (un microscopio de $100\times$, y no de $-100\times$).

Ejemplo 10.4 ■ Microscopio compuesto: cálculo del aumento

Un microscopio tiene un objetivo, cuya distancia focal es de 10 mm, y un ocular con 4.0 cm de distancia focal. Las lentes se colocan a 20 cm de distancia entre sí, en el tubo. Calcule el aumento total aproximado del microscopio.

Razonamiento. Se trata de una aplicación directa de la ecuación 10.5.

Solución.

Dado: $f_o = 10 \text{ mm} = 1.0 \text{ cm}$ **Encuentre:** m_{total} (aumento total)
 $f_e = 4.0 \text{ cm}$
 $L = 20 \text{ cm}$

Al usar la ecuación 10.5, se obtiene

$$m_{\text{total}} = -\frac{(25 \text{ cm})L}{f_o f_e} = -\frac{(25 \text{ cm})(20 \text{ cm})}{(1.0 \text{ cm})(4.0 \text{ cm})} = -125\times$$

Note la distancia focal relativamente corta del objetivo. El signo negativo indica que la imagen está invertida.

Ejercicio de refuerzo. Si la distancia focal del ocular en este ejemplo aumentara al doble, ¿cómo tendría que modificarse la longitud del microscopio para obtener el mismo aumento? (Expresé el cambio como un porcentaje.)

En la figura 10.8b se observa un microscopio compuesto moderno. Existen objetivos intercambiables con aumentos desde $5\times$ hasta más de $100\times$. Para el trabajo normal en biología o los laboratorios médicos se utilizan objetivos de 5 y $10\times$. Con frecuencia, los microscopios tienen revólveres para tres objetivos que ofrecen distintos aumentos, por ejemplo, 10, 43 y $97\times$. Estos objetivos se pueden usar con oculares de 5 y $10\times$ en diversas combinaciones para obtener aumentos de 50 hasta $970\times$. El aumento máximo que se obtiene con un microscopio compuesto es, aproximadamente, $2000\times$.

Por lo regular, los objetos opacos se iluminan con una fuente de luz que se coloca sobre ellos. Los especímenes que son transparentes, como las células o los cortes delgados de tejidos que se colocan en el portaobjetos, se iluminan con la fuente de luz bajo la platina del microscopio para que la luz atraviese al espécimen. Un microscopio moderno tiene un condensador de luz (lente convergente) y un diafragma bajo la platina, con los que se concentra la luz y se controla su intensidad. Algunos microscopios tienen una fuente luminosa interna. La luz se refleja de un espejo al condensador. Los

microscopios antiguos tenían dos espejos: uno era plano, para reflejar la luz de una fuente externa de gran intensidad, y el otro cóncavo para la luz convergente de baja intensidad, como la de la luz del cielo.

10.3 Telescopios

OBJETIVOS: a) Diferenciar entre telescopios refractores y reflectores y b) describir las ventajas de cada uno.

En los telescopios se aplican los principios ópticos de los espejos y las lentes para mejorar nuestra capacidad de ver objetos lejanos. Se utilizan para hacer observaciones terrestres y astronómicas, para ver algunos objetos con mayor detalle, o simplemente para distinguir otros objetos más distantes. En esencia, hay dos clases de telescopios: los refractores y los reflectores, que se caracterizan por usar lentes o espejos, respectivamente, para reunir la luz y hacerla converger.

Telescopio refractor

El principio en el que se basa un tipo de **telescopio refractor** es similar al de un microscopio compuesto. Los componentes principales de un telescopio refractor son las lentes objetivo y ocular, como se ve en la **figura 10.9**. El objetivo es una lente convergente grande, con gran distancia focal, y el ocular móvil tiene una distancia focal relativamente corta. Los rayos procedentes de un objeto lejano son paralelos en esencia, y forman una imagen (I_o) en el foco (F_o) del objetivo. Esta imagen funciona como objeto para el ocular, que se mueve hasta que la imagen está justo dentro de su foco (F_e). El observador ve una imagen grande, invertida y virtual (I_e).

Para tener una visión relajada, el ocular se ajusta de tal forma que su imagen (I_e) esté en el infinito, lo que significa que la imagen del objetivo (I_o) está en el foco del ocular (f_e). Como se ilustra en la figura 10.9, la distancia entre las lentes es entonces la suma de las distancias focales ($f_o + f_e$), que es la longitud del tubo del telescopio. El **poder de aumento de un telescopio refractor** enfocado para que la imagen final esté en el infinito es

$$m = -\frac{f_o}{f_e} \quad \text{aumento angular del telescopio refractor} \quad (10.6)$$

donde se intercala el signo menos para indicar que la imagen es invertida, de acuerdo con la convención de signos para lentes, en la sección 8.3. Así, para alcanzar el aumento máximo, la distancia focal del objetivo debe ser la mayor posible, y la distancia focal del ocular la menor posible.

El telescopio de la figura 10.9 se llama **telescopio astronómico**. La imagen final que produce un telescopio astronómico es invertida, pero esta condición no significa un problema para los astrónomos. (¿Por qué?) Sin embargo, para quien vea en la Tie-

Nota: los telescopios astronómicos producen una imagen invertida.

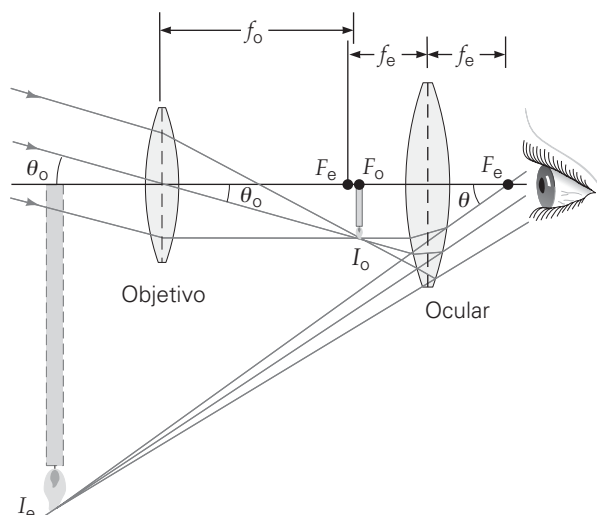
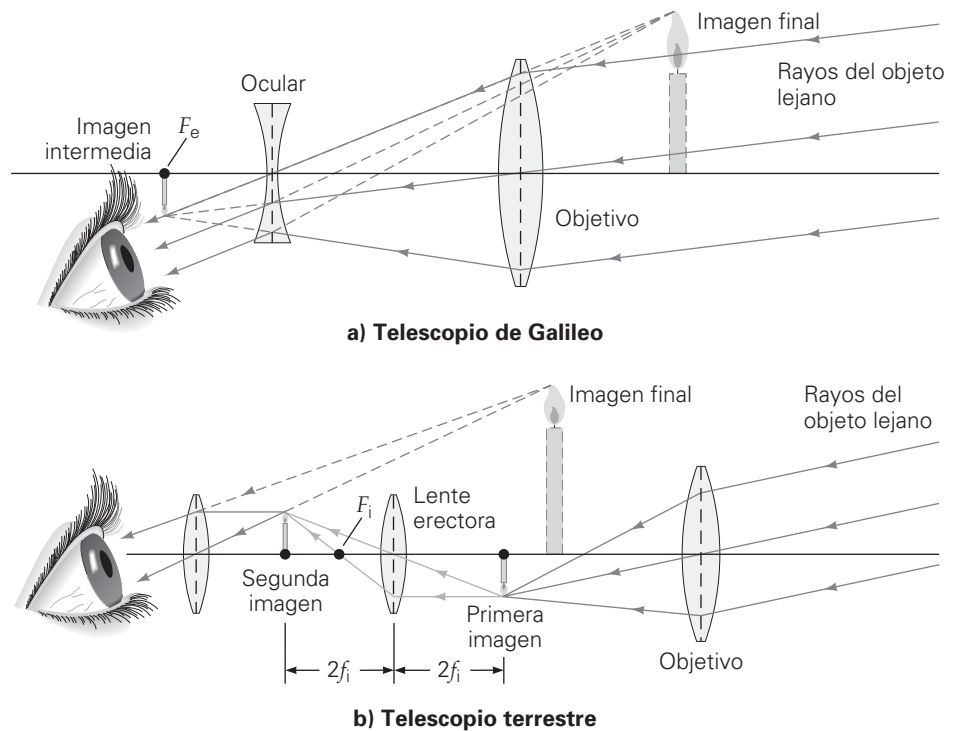


FIGURA 10.9 El telescopio astronómico refractor En un telescopio astronómico, los rayos de un objeto lejano forman una imagen intermedia (I_o) en el foco del objetivo (F_o). El ocular se mueve de tal forma que la imagen quede en su punto focal (F_e), o un poco más cerca. Un observador ve una imagen ampliada en el infinito (I_e , que aquí se muestra a una distancia finita con fines ilustrativos).

► **FIGURA 10.10 Telescopios terrestres** *a)* En un telescopio de Galileo se usa una lente divergente como ocular, y se producen imágenes virtuales derechas. *b)* Otra forma de producir imágenes derechas es usar una lente “erectora” convergente (con distancia focal f_i) entre el objetivo y el ocular, en un telescopio astronómico. Esta adición alarga el telescopio, pero la longitud se puede acortar usando prismas de reflexión interna.

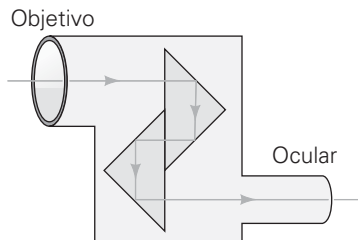


Para un objeto con un telescopio lo más conveniente es que la imagen esté derecha. Un telescopio en el que la imagen final es derecha se llama **telescopio terrestre**. Una imagen final derecha se puede obtener de varias formas; dos de ellas se ilustran en la **figura 10.10**.

En el telescopio de la figura 10.10a hay una lente divergente que se usa como ocular. Esta clase de telescopio terrestre se llama *telescopio de Galileo*, porque Galileo construyó uno así en 1609. El objetivo forma una imagen real a la izquierda del ocular, y esta imagen funciona como objeto “virtual” para el ocular (véase la sección 8.3). Un observador ve una imagen aumentada, derecha y virtual. (Note que con una lente divergente y distancia focal negativa, la ecuación 10.6 da como resultado una m positiva, lo que indica que la imagen es derecha.)

Los telescopios de Galileo tienen varias desventajas; una es que sus campos de visión son muy estrechos, y la otra, que su aumento es limitado. En la figura 10.10b se muestra un tipo mejor de telescopio terrestre, que usa una tercera lente, llamada *lente erectora* o *lente inversora*, entre las lentes convergentes objetivo y ocular. Si el objetivo forma la imagen a una distancia que sea el doble de la distancia focal de la lente erectora intermedia ($2f_i$), la lente sólo invierte la imagen sin aumentarla y el aumento del telescopio se sigue calculando con la ecuación 10.6.

Sin embargo, para obtener la imagen derecha con este método, se requiere una mayor longitud del telescopio. Al usar la lente erectora intermedia para invertir la imagen, la longitud del telescopio aumenta cuatro veces la distancia focal de la lente erectora ($2f_i$ a cada lado). Esta longitud inconveniente se puede evitar utilizando prismas de reflexión interna. Éste es el principio de los binoculares prismáticos, que en realidad son telescopios dobles, uno para cada ojo (véase la figura 10.11).



▲ **FIGURA 10.11 Prismáticos** Corte esquemático de un ocular (la mitad de un par de binoculares prismáticos) donde se indican las reflexiones internas en los prismas, que reducen la longitud física general.

Ejemplo 10.5 ■ Telescopio astronómico (y un telescopio terrestre más largo)

Un telescopio astronómico tiene un objetivo con 30 cm de distancia focal, y un ocular con 9.0 cm de distancia focal. *a)* ¿Cuál es el aumento del telescopio? *b)* Si se emplea una lente erectora con una distancia focal de 7.5 cm para convertir al telescopio en uno terrestre, ¿cuál será la longitud general del tubo del telescopio?

Razonamiento. La ecuación 10.6 se aplica directamente en el inciso *a*. En la parte *b*, la lente inversora alarga el telescopio en cuatro veces su distancia focal ($4f_i$) (figura 10.10b).

Solución. La lista de datos es la siguiente:

Dado: $f_o = 30$ cm
 $f_e = 9.0$ cm
 $f_i = 7.5$ cm (lente erectora intermedia)

Encuentre: a) m (aumento)
 b) L (longitud del tubo del telescopio)

a) El aumento se calcula con la ecuación 10.6:

$$m = -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{30 \text{ cm}}{9.0 \text{ cm}} = -3.3\times$$

donde el signo menos indica que la imagen es invertida.

b) Suponiendo que la longitud del tubo del telescopio sea la distancia entre las lentes, se ve que esa longitud no es más que la suma de las distancias focales de éstas:

$$L_1 = f_o + f_e = 30 \text{ cm} + 9.0 \text{ cm} = 39 \text{ cm}$$

Entonces, la longitud total será

$$L = L_1 + L_2 = 39 \text{ cm} + 4f_i = 39 \text{ cm} + 4(7.5 \text{ cm}) = 69 \text{ cm}$$

Por consiguiente, el telescopio mide más de dos terceras partes de un metro y produce imágenes derechas, pero con el mismo aumento de $3.3\times$. (¿Por qué?)

Ejercicio de refuerzo. Un telescopio terrestre mide 66 cm de longitud, con una lente erectora intermedia con una distancia focal de 12 cm. ¿Cuál es la distancia focal de una lente erectora que podría reducir la longitud del telescopio a 50 cm, una longitud más cómoda?

Ejemplo conceptual 10.6 ■ Construcción de un telescopio

A un alumno se le dan dos lentes convergentes, una con distancia focal de 5.0 cm y la otra con 20 cm de distancia focal. Con este material tiene que construir un telescopio, que le permita ver mejor objetos lejanos; el alumno debe montar las lentes a) a más de 25 cm de distancia, b) a una distancia comprendida entre 20 y 25 cm, c) a una distancia comprendida entre 5.0 y 20 cm o d) a menos de 5.0 cm de distancia. Especifique cuál lente se debe usar como ocular.

Razonamiento y respuesta. Primero veamos cuál lente se debe usar como ocular. El único tipo de telescopio que se puede construir con dos lentes convergentes es un telescopio astronómico. En esta clase de telescopios, la lente con mayor distancia focal se usa como objetivo, para formar una imagen real de un objeto lejano. A continuación esta imagen se examina con la lente de menor distancia focal, que es el ocular y que se utiliza como si fuera una lupa simple.

Si el objeto está a gran distancia, el objetivo forma una imagen real en su plano focal (figura 10.9). Esta imagen constituye el objeto para el ocular, que se coloca en tal forma que la imagen-objeto esté justo dentro de su foco, para producir una segunda imagen invertida.

Sin embargo, las dos lentes deben estar a *poco menos* de 25 cm de distancia, por lo que la respuesta a es incorrecta. Tampoco las respuestas c y d son correctas, porque el ocular estaría demasiado cerca del objetivo para producir la gran imagen secundaria necesaria para ver un objeto distante en forma óptima. En esos casos, los rayos pasarían por la segunda lente antes de formar la imagen y producirían una imagen *reducida* (véase la sección 8.3). Por todo lo anterior, la respuesta correcta es la b, con la imagen del objetivo justamente dentro del foco del ocular.

Ejercicio de refuerzo. Para obtener un telescopio terrestre se usa una tercera lente convergente, con una distancia focal de 4.0 cm, en combinación con las dos lentes antes mencionadas; la función de la tercera lente es la de invertir la imagen. ¿Cómo se deben montar las lentes y a qué distancia deben estar entre sí para que se forme una imagen final derecha y de tamaño máximo?

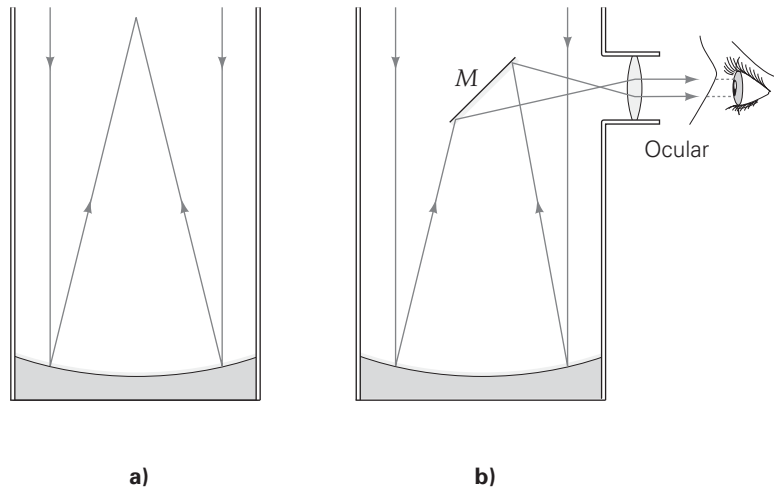
Telescopio reflector

Para ver el Sol, la Luna y los planetas cercanos es importante tener muchos aumentos para apreciar los detalles. Sin embargo, aun con el aumento máximo posible, las estrellas aparecen en el cielo sólo como débiles puntos de luz. Para observar las estrellas y las galaxias distantes, es más importante reunir la luz suficiente que tener un mayor aumento; de esta forma, se podrá no sólo ver el objeto, sino también analizar su espectro más rápidamente. La intensidad de la luz procedente de una fuente lejana es muy baja. En muchos casos, esa fuente sólo se detecta cuando su luz se reúne y enfoca en una placa fotográfica durante largo tiempo.

► FIGURA 10.12 Telescopios reflectores

En un telescopio se puede usar un espejo cóncavo para reunir la luz y formar una imagen de un objeto lejano.

a) La imagen puede estar en el foco primario, o bien, *b)* se utilizan un espejo y una lente pequeños para enfocar la imagen fuera del telescopio; a esta configuración se le llama *foco newtoniano*.



La intensidad es la energía por unidad de tiempo y por unidad de *área*. Por lo tanto, será posible reunir más luz si se aumenta el tamaño del objetivo. Eso aumenta la distancia a la cual el telescopio puede detectar objetos con luz débil, como las galaxias lejanas. (Recuerde que la intensidad luminosa de una fuente puntual es inversamente proporcional al *cuadrado* de la distancia entre la fuente y el observador.) Sin embargo, la producción de una lente grande implica dificultades relacionadas con la calidad, el tallado y el pulido del vidrio. Se requieren sistemas de lentes compuestas, para reducir aberraciones; además, una lente muy grande podría “colgarse” bajo el influjo de su propio peso, produciendo más aberraciones. La lente objetivo de mayor tamaño que está en uso tiene 40 pulgadas (102 cm) de diámetro, y es parte del telescopio refractor del Observatorio Yerkes en Williams Bay, Wisconsin.

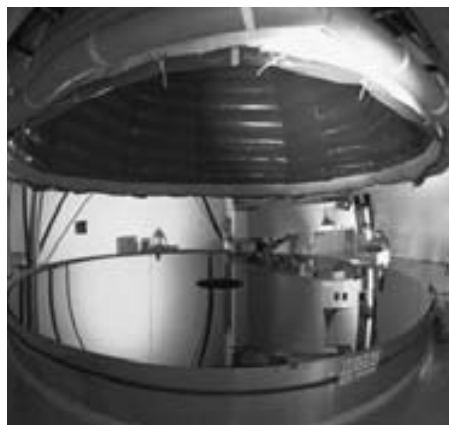
Los problemas anteriores se reducen con un **telescopio reflector** que usa un espejo parabólico grande y cóncavo (▲ figura 10.12). Un espejo parabólico no tiene aberración esférica; y, en general, un espejo no tiene aberración cromática inherente. (¿Por qué?) No se necesita un vidrio de alta calidad, porque la luz se refleja en una superficie frontal de tipo especular. Sólo hay que tallar, pulir y platear una superficie.

El mayor telescopio de un solo espejo, que mide 8.2 m (323 in.) de diámetro, es el del Observatorio Europeo Meridional en Chile (▼ figura 10.13a). El mayor telescopio reflector en Estados Unidos tiene un espejo de 5.1 m (200 in.) de diámetro y es el del Observatorio Hale, en Monte Palomar, California.

Aun cuando los telescopios reflectores tienen ventajas en comparación con los refractores, también presentan desventajas. Al igual que una lente grande, un espejo grande se puede colgar bajo su propio peso, y este último aumenta, necesariamente, con el tamaño del espejo. El factor peso también eleva los costos de construcción, porque los elementos de soporte para un espejo más pesado son enormes.

Estos problemas se están solucionando con las nuevas tecnologías. Un método consiste en usar un conjunto de espejos pequeños, configurados para que funcionen como un solo espejo enorme. Como ejemplos están los telescopios Keck gemelos en

► FIGURA 10.13 Observatorio Europeo Meridional, cerca de Paranal, Chile *a)* Un espejo de 8.2 m de diámetro en la fase final del pulido. *b)* Cuatro telescopios de 8.2 m formarán un telescopio VLT (*very large telescope*) con diámetro equivalente de 16 m.



Mauna Kea, Hawai. Cada uno tiene un espejo formado por 36 segmentos hexagonales, que se posicionan por medio de una computadora para obtener el equivalente a un espejo de 10 m de diámetro. El Observatorio Europeo Meridional tiene planes para construir cuatro espejos de 8.2 m de diámetro y formar un telescopio VLT (siglas para *very large telescope*) con un diámetro equivalente de 16 m (figura 10.13b).

Otra forma de ampliar nuestra visión en el espacio es enviar telescopios en órbita en torno a la Tierra. Sobre la atmósfera, la visión no se afecta por el efecto de centelleo que provocan la turbulencia y refracción atmosféricas, ni tampoco se presentan los problemas que suponen las luces de las ciudades. En 1990 se puso en órbita el Telescopio Espacial Hubble (►figura 10.14). Aun cuando su espejo tiene un diámetro de sólo 2.4 m, su posición privilegiada le ha permitido obtener imágenes siete veces más nítidas que las que forman los telescopios en Tierra.

Por último, hay que hacer notar que no todos los telescopios funcionan en la región visible. Para ver más sobre esto, véase la sección A fondo 10.2 acerca de los telescopios que utilizan radiación no visible, en la p. 290.

10.4 Difracción y resolución

OBJETIVOS: a) Describir la relación entre difracción y resolución y b) enunciar y explicar el criterio de Rayleigh.

La difracción de la luz establece un límite a nuestra capacidad de distinguir objetos cercanos entre sí, cuando usamos microscopios o telescopios. Este efecto se comprende mejor si imaginamos dos fuentes puntuales situadas lejos de una rendija angosta de ancho w (▼figura 10.15). Las fuentes podrían ser, por ejemplo, estrellas lejanas. En ausencia de la difracción se observarían dos manchas brillantes, o imágenes, en una pantalla. Sin embargo, como se explicó en la sección 9.3, la rendija difracta la luz y cada imagen consiste en un máximo central con una distribución de franjas brillantes y oscuras a cada lado. Si las fuentes están cercanas entre sí, es probable que los dos máximos centrales se traslapen. En tal caso, no se distinguen las imágenes; en otras palabras, las imágenes *no están resueltas*. Para *resolver* las imágenes, los máximos centrales no se deben traslapar en forma apreciable.

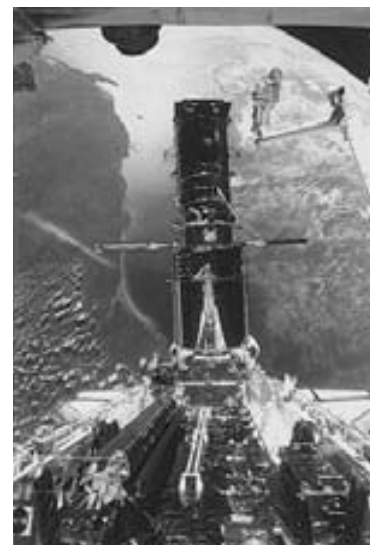
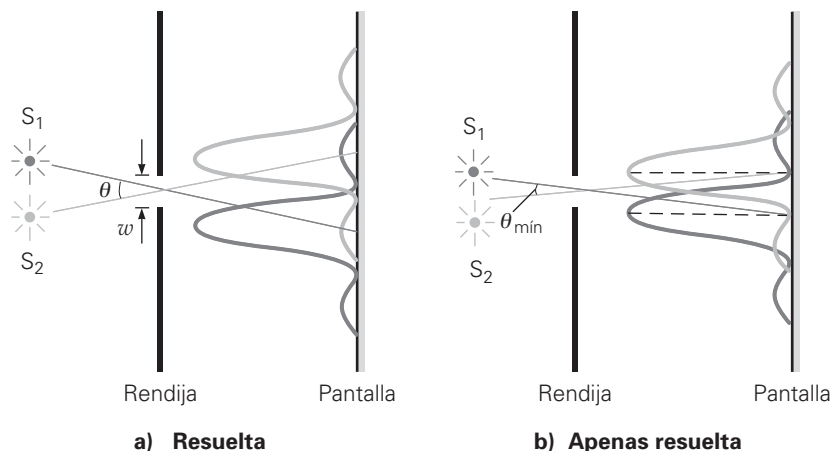
En general, es factible resolver imágenes de dos fuentes si el máximo central de una está en la primera franja oscura (o mínimo) de la otra o más allá. Fue Lord Rayleigh (1842-1919), un físico inglés, quien propuso por primera vez esta condición limitante para la **resolución** de dos imágenes —esto es, la capacidad de distinguir las por separado—. Por eso, la condición se llama **criterio de Rayleigh**:

Se dice que dos imágenes apenas se resuelven cuando el máximo central de una cae en el primer mínimo de la figura de difracción de la otra.

El criterio de Rayleigh se puede expresar en función de la separación angular (θ) de las fuentes (véase la figura 10.15). El primer mínimo ($m = 1$) de una figura de difracción formada por una sola rendija satisface la relación:

$$w \sin \theta = m\lambda = \lambda \quad \text{o bien} \quad \sin \theta = \frac{\lambda}{w}$$

De acuerdo con la figura 10.15, ésta es la separación angular mínima para que dos imágenes apenas se resuelvan, según el criterio de Rayleigh. En general, para la luz vi-



▲ **FIGURA 10.14** Telescopio espacial Hubble (HST) A fines de 1993, los astronautas del transbordador espacial *Endeavor* visitaron el HST en órbita. Instalaron equipo corrector que compensó muchos de los errores ópticos del telescopio y reemplazaron otros sistemas que presentaban fallas. Actualmente, el HST de nuevo necesita reparaciones.

◀ **FIGURA 10.15** La resolución Dos fuentes luminosas frente a una rendija producen figuras de difracción. a) Cuando el ángulo que subtenden las fuentes en la rendija es suficientemente grande para distinguir las figuras de difracción, se dice que las imágenes están resueltas. b) Cuando los ángulos son menores, los máximos centrales están próximos entre sí. En θ_{min} , el máximo central de la figura de difracción de una imagen cae en la primera franja oscura de la figura de la otra imagen, y se dice que las imágenes están apenas resueltas. Cuando los ángulos son menores, se dice que las figuras no están resueltas.

A FONDO 10.2 TELESCOPIOS PARA RADIACIÓN NO VISIBLE

La palabra *telescopio* se relaciona casi siempre con el acto de observar. Sin embargo, la región visible es una parte muy pequeña del espectro electromagnético, y los objetos celestes emiten radiaciones de muchas otras clases, incluyendo las ondas de radio. Fue el ingeniero Carl Jansky quien descubrió este hecho de manera fortuita en 1931, mientras trabajaba en el problema de la estática de interferencia en las radiocomunicaciones intercontinentales. Jansky encontró un ruido molesto de estática que provenía de una dirección fija en el espacio, aparentemente de una fuente celeste. Pronto se vio que las ondas de radio son otra fuente de información astronómica, y se construyeron radiotelescopios para investigar esa fuente.

Un radiotelescopio funciona en forma parecida a un telescopio óptico reflector. Un reflector de área grande reúne y enfoca las ondas de radio en un punto, donde un detector capta la señal (figura 1). El colector parabólico, llamado *plato*, está recubierto con malla de alambre metálico, o de placas metálicas. Como las longitudes de onda de radio van desde algunos milímetros hasta varios metros, la malla metálica es suficientemente “lisa” como para formar una buena superficie reflectora para las ondas de radio.

Los radiotelescopios complementan la labor de los telescopios ópticos, y tienen algunas ventajas definitivas sobre ellos. Por ejemplo, las ondas de radio atraviesan libremente las gigantescas nubes de polvo que esconden una gran parte de nuestra galaxia. Además, las ondas de radio penetran con facilidad a la atmósfera terrestre, que refleja y dispersa un gran porcentaje de la luz visible que le llega.

La luz infrarroja también resulta afectada por la atmósfera terrestre. Por ejemplo, el vapor de agua absorbe la radiación infrarroja. Así, las observaciones con telescopios infrarrojos se hacen a veces desde aviones que vuelan a gran altura, o en naves espaciales en órbita, que están más allá de la influencia del vapor de agua de la atmósfera. El primer observatorio infrarrojo *en órbita* fue lanzado en 1983. No sólo se eliminan las interferencias atmosféricas, sino que un telescopio puede enfriarse a temperaturas muy bajas sin cubrirse de vapor de agua condensado de la atmósfera. El enfriamiento del telescopio ayuda a eliminar



FIGURA 1 Radiotelescopios Algunas de las antenas de plato que forman el radiotelescopio VLA (*Very Large Array*) cerca de Socorro, Nuevo México. Hay 27 platos móviles, cada uno de 25 m de diámetro, que forman el conjunto dispuesto en una red en forma de Y. Los datos de todas las antenas se combinan para producir una sola imagen de radio. De esta forma, se logra una resolución equivalente a la de una antena gigante de radio (de unos 200 pies o 60 metros de diámetro).

la interferencia por radiación infrarroja generada por el telescopio mismo. El telescopio infrarrojo en órbita, lanzado en 1983, se enfriaba con helio líquido hasta unos 10 K; hizo un reconocimiento infrarrojo de todo el firmamento.

La atmósfera es virtualmente opaca a la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma procedentes de fuentes lejanas, así que los telescopios que detectan estos tipos de radiaciones no tienen su base en la Tierra. Los satélites en órbita, con telescopios sensibles a esas radiaciones, han cartografiado partes del cielo, y se planea realizar más estudios. Los observatorios que funcionan dentro de satélites en órbita en la región visible no se ven afectados por la turbulencia del aire o la refracción. Quizá en un futuro no muy lejano, un observatorio tripulado en órbita, con varios telescopios, reemplace al Hubble y contribuya a aumentar nuestro conocimiento del universo.

sible, la longitud de onda es mucho menor que el ancho de la rendija ($\lambda < w$), por lo que θ es pequeño y $\sin \theta \approx \theta$. En este caso, el **ángulo limitante** o **mínimo de resolución** (θ_{\min}) para una rendija de ancho w es

$$\theta_{\min} = \frac{\lambda}{w} \quad \begin{array}{l} \text{ángulo mínimo de resolución} \\ \text{(para una rendija)} \end{array} \quad (10.7)$$

(Note que θ_{\min} es un número puro, por lo que debe expresarse en radianes.) Entonces, las imágenes de dos fuentes se resuelven *en forma distinta* si la separación angular de las fuentes es mayor que λ/w .

En general, las aberturas de las cámaras, los microscopios y los telescopios son circulares. Por esa razón, hay una figura de difracción *circular* en torno al máximo central, que tiene la forma de un disco circular brillante (►figura 10.16). El análisis detallado para una abertura circular indica que el **ángulo mínimo de resolución para una abertura circular** para que apenas se resuelvan las imágenes de dos objetos es similar, aunque ligeramente diferente, al de la ecuación 10.7. Esto es

$$\theta_{\min} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad \begin{array}{l} \text{ángulo mínimo de resolución} \\ \text{(para una abertura circular)} \end{array} \quad (10.8)$$

en donde D es el diámetro de la abertura y θ_{\min} está en radianes.

La ecuación 10.8 se aplica al objetivo de un microscopio o un telescopio, o al iris del ojo, que se consideran aberturas circulares para la luz. De acuerdo con las ecuaciones 10.7 y 10.8, cuanto menor es θ_{\min} , mejor es la resolución. El ángulo mínimo de reso-

lución, $\theta_{\text{mín}}$, debe ser pequeño para resolver los objetos cercanos entre sí; por consiguiente, la abertura debe ser tan *grande* como sea posible. Ésta es otra de las razones por las que se utilizan lentes (y espejos) grandes en los telescopios.

Ejemplo 10.7 ■ El ojo y el telescopio: evaluación de la resolución con el criterio de Rayleigh

Calcule el ángulo mínimo de resolución, con el criterio de Rayleigh, para *a*) la pupila del ojo (su diámetro en luz diurna es de unos 4.0 mm) con luz visible de 660 nm de longitud de onda; *b*) el telescopio reflector del Observatorio Europeo Meridional (de 8.2 m de diámetro), para la luz visible de la misma longitud de onda que la del inciso *a*, y *c*) un radiotelescopio de 25 m de diámetro, para radiación con 21 cm de longitud de onda.

Razonamiento. Ésta es una comparación de $\theta_{\text{mín}}$ para aberturas de distintos diámetros: una aplicación directa de la ecuación 10.8.

Solución.

Dado: a) $D = 4.0 \text{ mm} = 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $\lambda = 660 \text{ nm} = 6.60 \times 10^{-7} \text{ m}$
 b) $D = 8.2 \text{ m}$
 $\lambda = 660 \text{ nm} = 6.60 \times 10^{-7} \text{ m}$
 c) $D = 25 \text{ m}$
 $\lambda = 21 \text{ cm} = 0.21 \text{ m}$

Encuentre: a) $\theta_{\text{mín}}$ (ángulos mínimos de resolución)
 b) $\theta_{\text{mín}}$
 c) $\theta_{\text{mín}}$

a) Para el ojo,

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{1.22(6.60 \times 10^{-7} \text{ m})}{4.0 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

b) Para el telescopio óptico,

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22(6.60 \times 10^{-7} \text{ m})}{8.2 \text{ m}} = 9.8 \times 10^{-8} \text{ rad}$$

(Nota: la resolución de los telescopios terrestres con objetivos de gran diámetro no suele limitarse por la difracción, sino por otros efectos como la turbulencia atmosférica. Por eso, en la actualidad, estos telescopios tienen un $\theta_{\text{mín}}$ del orden de 10^{-6} rad, o una resolución tan buena como un décimo de la que se obtendría sin la atmósfera.)

c) Para el radiotelescopio

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22(0.21 \text{ m})}{25 \text{ m}} = 0.010 \text{ rad}$$

Cuanto menor es la separación angular, mejor es la resolución. ¿Qué indican estos resultados?

Ejercicio de refuerzo. Como se dijo en la sección 10.3, el Telescopio Espacial Hubble tiene un diámetro de espejo de 2.4 m. ¿Cómo se compara su resolución con la de los mayores telescopios terrestres? (Véase la nota en la parte *b* de este ejemplo.)

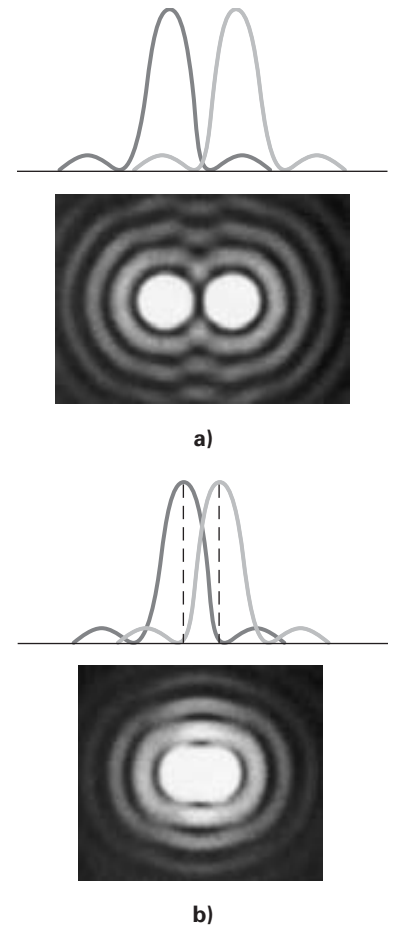
En el caso de un microscopio, es más conveniente especificar la separación real (*s*) entre dos fuentes puntuales. Como los objetos por lo regular están cerca del plano focal del objetivo, entonces, con buena aproximación

$$\theta_{\text{mín}} = \frac{s}{f} \quad \text{o} \quad s = f\theta_{\text{mín}}$$

donde *f* es la distancia focal de la lente y $\theta_{\text{mín}}$ se expresa en radianes. (Aquí, *s* se considera la longitud del arco subtendido por $\theta_{\text{mín}}$ y $s = r\theta_{\text{mín}} = f\theta_{\text{mín}}$.) Entonces, usando la ecuación 10.8, se obtiene

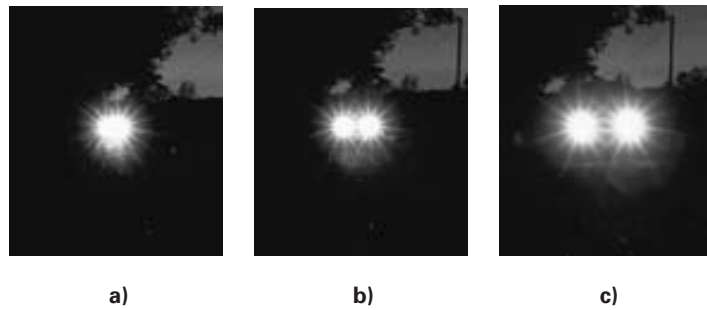
$$s = f\theta_{\text{mín}} = \frac{1.22\lambda f}{D} \quad \text{poder de resolución de un microscopio} \quad (10.9)$$

Esta distancia mínima entre dos puntos cuyas imágenes apenas pueden resolverse se llama **poder de resolución** del microscopio. Observe que *s* es directamente proporcional a λ , así que una menor longitud de onda produce una mejor resolución. En la práctica, el poder de resolución de un microscopio indica la capacidad que tiene el objetivo para distinguir las estructuras de detalle fino en los especímenes. Véase en la figura 10.17 otro ejemplo de la resolución en la vida real.



▲ FIGURA 10.16 Resolución con abertura circular *a*) Cuando la separación angular de dos objetos es suficientemente grande, las imágenes están bien resueltas. (Compare con la figura 10.15a.) *b*) Criterio de Rayleigh: el máximo central de la figura de difracción de una imagen cae en la primera franja oscura de la figura de difracción de la otra imagen. (Compare con la figura 10.15b.) Las imágenes de los objetos con menores separaciones angulares no se distinguen con claridad como imágenes individuales.

► **FIGURA 10.17** La resolución en la vida real *a*), *b*), *c*) Una secuencia de los faros de un automóvil que se acerca. En *a*), los faros casi no están resueltos por la abertura circular de la cámara (o de los ojos). Conforme el automóvil se acerca, la imagen de los faros se resuelve.



▲ **FIGURA 10.18** La Gran Muralla China, que fue construida como fortificación a lo largo de la frontera norte de China.

Nota: la relación entre la longitud de onda y el índice de refracción se explicó en la sección 7.3; véase la ecuación 7.4.

Ejemplo conceptual 10.8 ■ Paisaje desde el espacio: la Gran Muralla China

La Gran Muralla China medía originalmente 2400 km (1500 mi) de longitud, y su ancho aproximado en la base era de 6.0 m y de 3.7 m en la parte superior. En la actualidad, varios cientos de kilómetros de la muralla permanecen intactos (◀ figura 10.18). Se dice que la muralla es la única construcción que un astronauta en órbita terrestre puede ver a ojo desnudo. Con el resultado de la parte *a* del ejemplo 10.7, compruebe si eso es cierto. (Ignore los efectos atmosféricos.)

Razonamiento y respuesta. A pesar de la longitud de la muralla, no sería visible desde el espacio a menos que su *ancho* ocupara el ángulo mínimo de resolución del ojo de un astronauta ($\theta_{\min} = 2.0 \times 10^{-4}$ rad, según el ejemplo 10.7). Las torres de vigilancia con techos mayores de 7.0 m de ancho estaban a cada 180 m a lo largo de la muralla, por lo que supondremos que la dimensión del ancho máximo observable debe ser de 7.0 m. (En realidad, es la longitud del arco circular que subtiende el ángulo, pero a ese radio, la longitud de la cuerda es casi igual a la longitud del arco circular. Véase el ejemplo 5.2 de *Física 11* y elabore un esquema.)

Supongamos que el astronauta apenas puede distinguir la torre de vigilancia. Recuerde que $s = r\theta$ (ecuación 5.3 de *Física 11*), donde s es una aproximación del ancho máximo observable de la muralla, y r es la distancia radial (la altura, en este caso). Entonces, el astronauta tendría que estar, a lo sumo, a una distancia de

$$r = \frac{s}{\theta} = \frac{7.0 \text{ m}}{2.0 \times 10^{-4} \text{ (rad)}} = 3.5 \times 10^4 \text{ m} = 35 \text{ km} (= 22 \text{ mi})$$

Así que a más de 35 km, *no* sería posible ver la muralla a ojo desnudo. Los satélites están en órbita a unos 300 km (190 mi) o más sobre la Tierra. Así que la afirmación de la posibilidad de ver la muralla desde el espacio es falsa.

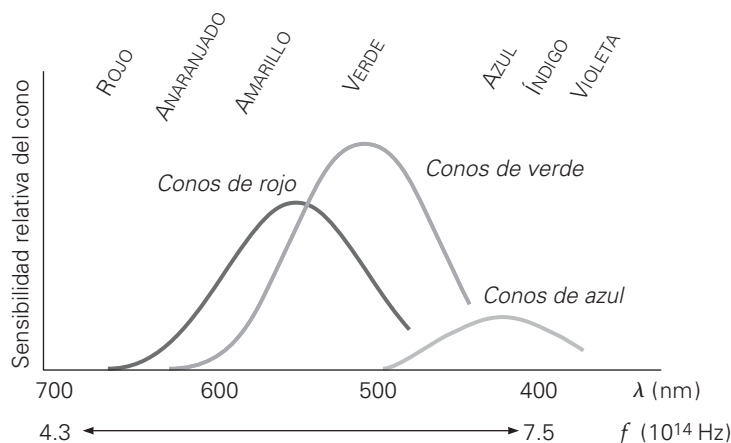
Ejercicio de refuerzo. ¿Cuál sería el diámetro mínimo del objetivo de un telescopio que permitiera ver la Gran Muralla a un astronauta en órbita a 300 km sobre la Tierra? (Supongamos que todas las condiciones son iguales a las que se describen en este ejemplo, y que la longitud de onda de la luz es 550 nm.)

A partir de la ecuación 10.8, se sabe que es posible alcanzar la mayor resolución usando radiación de longitud de onda más corta. Así, un telescopio con un objetivo de determinado diámetro tendrá más resolución con la luz violeta que con la roja. En los microscopios es posible aumentar el poder de resolución acortando las longitudes de onda de la luz que se usa para crear la imagen. Eso se logra con un objetivo especial, llamado *lente de inmersión en aceite*. Cuando se utiliza esa lente, se pone una gota de aceite transparente que llena el espacio entre el objetivo y el espécimen. Recuerde que la longitud de onda de la luz en el aceite es $\lambda' = \lambda/n$, donde n es el índice de refracción del aceite, y λ es la longitud de onda de la luz en el aire. Con valores de n de aproximadamente 1.50 o mayores, la longitud de onda se reduce en forma significativa, y el poder de resolución aumenta de manera proporcional.

*10.5 Color

OBJETIVO: Relacionar el color con la luz.

En general, las propiedades físicas son fijas o absolutas. Por ejemplo, determinada clase de radiación absoluta tiene cierta frecuencia o longitud de onda. Sin embargo, la *percepción* visual de esa radiación varía de una persona a otra. La manera en que “vemos” (o nuestro cerebro “interpreta”) la radiación origina lo que se llama *visión en colores*.



Visión en colores

El color se percibe gracias a la respuesta fisiológica a la excitación luminosa por parte de los conos receptores en la retina del ojo humano. (Muchos animales no tienen conos, por lo que viven en un mundo en blanco y negro.) Los conos son sensibles a la luz de frecuencias aproximadas entre 7.5×10^{14} y 4.3×10^{14} Hz (longitudes de onda de 400 a 700 nm). Las distintas frecuencias de la luz se perciben como colores diferentes en el cerebro. La asociación de un color con determinada frecuencia es subjetiva, y puede variar de una persona a otra. La altura es al sonido y la audición lo que el color es a la luz y a la visión.

Los detalles sobre el proceso de la visión en colores aún no se comprenden del todo. Se sabe que hay tres clases de conos en la retina, que responden a distintas partes del espectro visible, en especial en las regiones del rojo, verde y azul (▲ figura 10.19). Es posible que cada tipo de conos absorban luz de intervalos específicos de frecuencias y que los tres se traslapen funcionalmente entre sí para formar combinaciones que el cerebro interpreta como los diversos colores del espectro. Por ejemplo, cuando los conos rojo y verde se estimulan por igual con luz de determinada frecuencia, el cerebro interpreta las dos señales traslapadas como amarillo. Pero cuando se estimulan con más intensidad los conos rojos que los verdes, el cerebro percibe el anaranjado (es decir, "amarillo" pero dominado por rojo). La *ceguera al color* se presenta cuando falta una o más clases de conos, o cuando éstos son disfuncionales.

Como se ve en la figura 10.19, el ojo humano no percibe por igual todos los colores. Algunos evocan una mayor respuesta que otros y, en consecuencia, aparecen más brillantes con la misma intensidad. La longitud de onda de la sensibilidad visual máxima es de unos 550 nm, en la región del amarillo-verde.

Esta teoría de la visión en colores (que postula la mezcla o combinación de ellos) se basa en el hecho experimental que la mayor parte de los colores se produce con haces de luz roja, verde y azul de intensidad variable. El rojo, azul y verde, de donde interpretamos un espectro completo de colores, se llaman **colores primarios aditivos**. Cuando se proyectan rayos luminosos de los primarios aditivos en una pantalla blanca de forma que se traslapen, se producirán otros colores, como se ve en la ► figura 10.20. A esta técnica se le llama **método aditivo de producción de color**. En los tubos de cinescopio de televisión se usan tríadas de puntos formados por tres fósforos, que emiten los colores primarios aditivos cuando se excitan, para producir imágenes en color.

Observe que en la figura 10.20, determinada combinación de los colores primarios parece blanca. Además, muchos *pares* de colores le parecen blancos al ojo cuando se combinan. Los colores de esos pares se llaman **colores complementarios**. El complemento del azul es el amarillo, el del rojo es el cian y el del verde es el magenta. Como se ve en la figura, el color complementario de determinado primario es la combinación o suma de los otros dos primarios. Por consiguiente, el primario junto con su complemento forman el blanco.

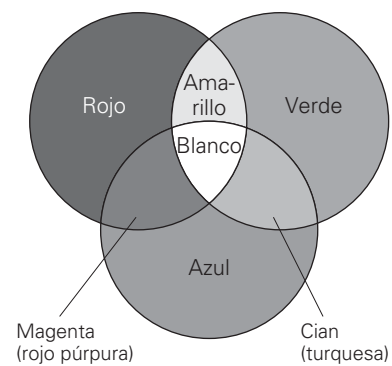
Edwin H. Land (el inventor de la película Polaroid) demostró que cuando las mezclas adecuadas de dos longitudes de onda (colores) se pasan a través de transparencias en blanco y negro (sin color), las longitudes de onda producen imágenes de diversos colores. Land escribió: "En este experimento llegamos a la sorprendente conclusión que los rayos, en sí mismos, no forman colores. Más bien son portadores de información que el ojo utiliza para asignar colores adecuados a diversos objetos en una imagen".*

*Tomado de Edwin H. Land, "Experiments in Color Vision", *Scientific American*, mayo de 1959, pp. 84-89.

◀ **FIGURA 10.19** Sensibilidad de los conos Diversos tipos de conos en la retina del ojo humano responden a distintas frecuencias de la luz, para dar tres respuestas generales al color: rojo, verde y azul. (Véase el pliego a color al final del libro.)



a)




b)

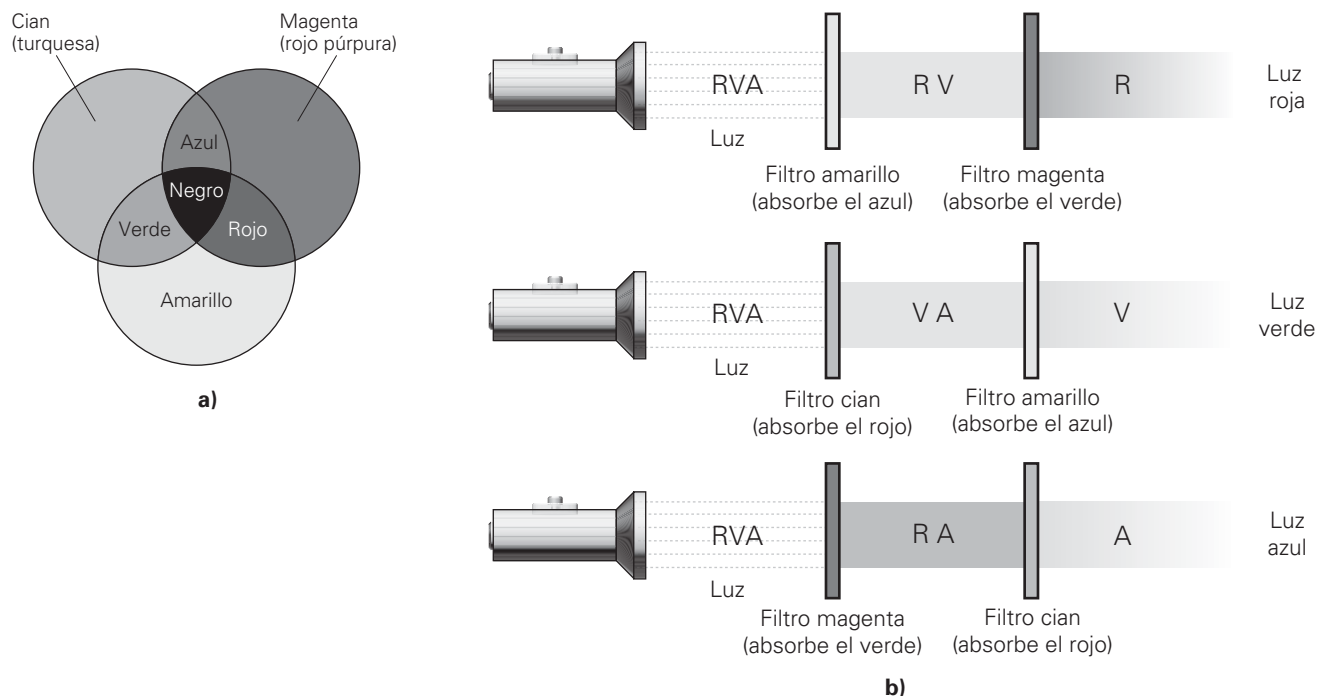
▲ **FIGURA 10.20** Método aditivo de producción de color Cuando se proyectan haces luminosos de los colores primarios (rojo, azul y verde) en una pantalla blanca, sus mezclas producen diversos colores. Si se varían las intensidades de los haces es posible generar la mayor parte de los colores. (Véase el pliego a color al final del libro.)

Los objetos tienen un color cuando se iluminan con luz blanca, porque reflejan (dispersan) o transmiten, en forma predominante, luz de la frecuencia de ese color. Las demás frecuencias de la luz blanca se absorben en su mayor parte. Por ejemplo, cuando la luz blanca llega a una manzana roja, se reflejan principalmente las ondas de la parte roja del espectro; todas las demás (y, por consiguiente, todos los demás colores) se absorben casi por completo. De igual manera, cuando la luz blanca pasa por un trozo de vidrio o *filtro* rojo transparente, se transmiten principalmente los rayos rojos. Esto sucede porque los pigmentos coloreados (aditivos) del vidrio son absorbentes selectivos.

Para producir diversos colores se mezclan pigmentos, como en la producción de pinturas y colorantes. Tal vez usted sepa que para obtener un color verde, se mezclan pinturas amarilla y azul. Esto se debe a que el pigmento amarillo absorbe la mayor parte de las longitudes de onda, excepto las de la región del amarillo y las que se encuentran cerca (verde más anaranjado) del espectro visible, y el pigmento azul absorbe la mayor parte de las longitudes de onda excepto las de la región azul y adyacentes (violeta más verde). Las longitudes de onda en la región verde intermedia (traslapada), entre el amarillo y el azul, *no* se absorben intensamente en alguno de los pigmentos, y en consecuencia, la mezcla parece verde. El mismo efecto se obtiene cuando se hace pasar luz blanca a través de filtros amarillo y azul apilados. La luz que sale después de atravesarlos parece verde.

La mezcla de pigmentos causa la *sustracción* de colores. El color resultante se forma por lo que *no* absorbió el pigmento; esto es, lo que *no* se sustrajo del haz original. Éste es el principio de lo que se llama **método sustractivo de producción de color**. A tres pigmentos determinados, cian, magenta y amarillo, se les llama **pigmentos primarios sustractivos**. Diversas combinaciones de dos de los tres primarios sustractivos producen los tres colores primarios aditivos (rojo, azul y verde), como se ilustra en la  figura 10.21. Cuando se mezclan los primarios sustractivos en las proporciones adecuadas, la mezcla parece negra (porque se absorben todas las longitudes de onda). Con frecuencia, los pintores dicen que los primarios sustractivos son rojo, amarillo y azul. En realidad se refieren al magenta (rojo púrpura), amarillo y cian (azul “verdadero”).

▼ **FIGURA 10.21** Método sustractivo de producción de color *a*) Cuando los pigmentos primarios (cian, magenta y amarillo) se mezclan, se producen distintos colores por absorción sustractiva; por ejemplo, la mezcla de amarillo y magenta produce rojo. Cuando se mezclan los tres pigmentos y se absorben todas las longitudes de onda de la luz visible, la mezcla parece negra. *b*) Mezcla sustractiva de colores, usando filtros. El principio es igual que el del inciso *a*. Cada pigmento absorbe selectivamente ciertos colores, eliminándolos de la luz blanca. Los colores que quedan son los que vemos. (Véase el pliego a color al final del libro.)

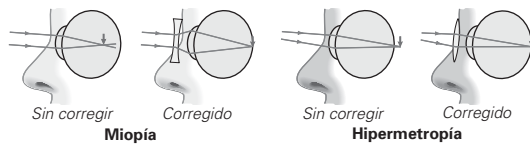


Al mezclar esas pinturas en las proporciones correctas se produce un amplio espectro de colores.

Note en la figura 10.21 que el pigmento magenta sustrae en esencia el color verde cuando se traslapa con el cian y el amarillo. En consecuencia, al magenta se le llama a veces “menos verde”. Si se colocara un filtro magenta frente a una luz verde, no se transmitiría luz. De igual manera, al cian se le llama “menos rojo” y al amarillo “menos azul”. Un ejemplo de mezcla sustractiva de colores es cuando los fotógrafos utilizan un filtro amarillo, para hacer destacar las nubes blancas en la película de blanco y negro. Este filtro absorbe el azul del cielo, oscureciéndolo en relación con las nubes, que reflejan luz blanca. De esta forma, aumenta el contraste entre el cielo y las nubes. ¿Qué clase de filtro usaría usted para oscurecer la vegetación verde en una película en blanco y negro? ¿Y para aclararla?

Repaso del capítulo

- Las personas miopes no pueden ver con claridad los objetos lejanos. Las personas hipermétropes no distinguen con claridad los objetos cercanos. Estas condiciones se corrigen utilizando lentes divergentes y convergentes, respectivamente.



- El aumento de una lupa (o microscopio simple) se expresa en términos de **aumento angular** (m), distinto del aumento lateral (M ; véase el capítulo 8):

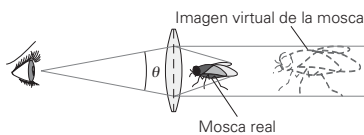
$$m = \frac{\theta}{\theta_o} \quad (10.1)$$

El aumento de una lupa, con la imagen en el punto cercano (25 cm) se expresa como

$$m = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (10.3)$$

El aumento de una lupa con la imagen en el infinito se expresa como

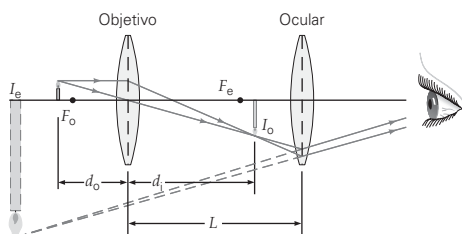
$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (10.4)$$



- El objetivo de un microscopio compuesto tiene distancia focal relativamente corta, y el ocular tiene mayor distancia focal. Ambos contribuyen al **aumento total**, m_{total} , de acuerdo con

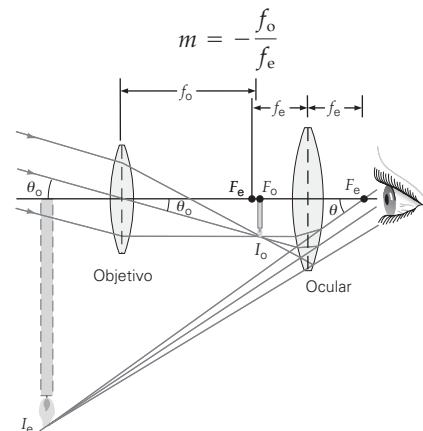
$$m_{\text{total}} = M_o m_e = -\frac{(25 \text{ cm})L}{f_o f_e} \quad (10.5)$$

donde L , f_o y f_e se expresan en centímetros.

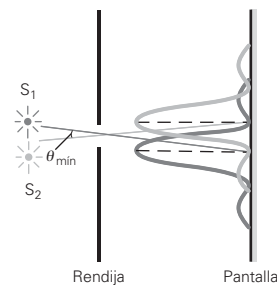


- Un telescopio refractor usa una lente convergente para reunir la luz, y un telescopio reflector utiliza un espejo convergente. El ocular aumenta la imagen creada por cualquiera de ellos. El **aumento de un telescopio refractor** es

$$m = -\frac{f_o}{f_e} \quad (10.6)$$



- La difracción establece un límite para la **resolución**, la capacidad de resolver o distinguir objetos cercanos entre sí. Se dice que dos imágenes están apenas resueltas cuando el máximo central de una cae en el primer mínimo de la figura de difracción de la otra (**criterio de Rayleigh**).



- Para una rendija rectangular, el **ángulo mínimo de resolución** es

$$\theta_{\text{min}} = \frac{\lambda}{w} \quad (10.7)$$

El **ángulo mínimo de resolución para una abertura circular** de diámetro D es

$$\theta_{\text{min}} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (10.8)$$

El **poder de resolución** de un microscopio es

$$s = f\theta_{\text{min}} = \frac{1.22\lambda f}{D} \quad (10.9)$$

Ejercicios

Los ejercicios designados **OM** son preguntas de opción múltiple; los **PC** son preguntas conceptuales; y los **EI** son ejercicios integrados. A lo largo del texto, muchas secciones de ejercicios incluirán ejercicios "apareados". Estos pares de ejercicios, que se identifican con números subrayados, pretenden ayudar al lector a resolver problemas y aprender. La respuesta a los ejercicios de número impar se da al final del libro.

10.1 El ojo humano

- OM** Los bastones de la retina *a)* son responsables de la visión 20/20, *b)* son responsables de la visión blanco y negro crepuscular, *c)* son responsables de la visión en colores o *d)* enfocan la luz.
- OM** Una córnea imperfecta puede causar *a)* astigmatismo, *b)* miopía, *c)* hipermetropía o *d)* todo lo anterior.
- OM** La imagen de un objeto formado en la retina es *a)* invertida, *b)* derecha, *c)* del mismo tamaño que el objeto, *d)* todo lo anterior.
- OM** La distancia focal del cristalino en el ojo humano varía de acuerdo con la acción de sus músculos. Cuando se ve un objeto lejano, el radio del cristalino *a)* se agranda, *b)* se reduce, *c)* se adelgaza, *d)* ninguna de las opciones anteriores es válida.
- PC** Las personas y los animales salen con "ojos rojos" en fotografías tomadas con *flash*. La luz reflejada en la retina es roja por los vasos sanguíneos cerca de su superficie. Algunas cámaras tienen una opción contra ojos rojos, que cuando se activa, produce un destello rápido antes del destello de más duración con el que se toma la fotografía. Explique cómo es que esta función de la cámara reduce los ojos rojos.
- PC** ¿Qué partes de la cámara corresponden al iris, cristalino y retina del ojo?
- PC** *a)* Si un ojo tiene punto lejano a 15 m y punto cercano a 25 cm, ¿es miope o hipermetrope? *b)* ¿Y un ojo que tenga punto lejano en el infinito, y punto cercano a 50 cm? *c)* ¿Qué clase de lentes de corrección (convergentes o divergentes) recomendaría para corregir los defectos de visión en los incisos *a* y *b*?
- PC** El uso de lentes de corrección para la miopía y la hipermetropía afectarán, respectivamente, el tamaño de la imagen en la retina? Explique por qué.
- ¿Cuáles son las potencias de *a)* una lente convergente de 20 cm de distancia focal y *b)* una lente divergente de -50 cm de distancia focal?
- EI** ● El punto lejano de cierta persona miope está a 90 cm. *a)* ¿Qué clase de lentes de contacto debe recetarle un optometrista para permitirle ver los objetos lejanos con claridad? 1) Convergentes, 2) divergentes o 3) bifocales. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál sería la potencia de los lentes, en dioptrías?
- EI** ● Cierta persona hipermetrope tiene su punto cercano a 50 cm. *a)* ¿Qué clase de lentes de contacto debe recetarle un optometrista para permitirle ver con claridad objetos a 25 cm de distancia? 1) Convergentes, 2) divergentes o 3) bifocales. ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la potencia de los lentes, en dioptrías?
- Una mujer no puede ver con claridad objetos cuando están a más de 12.5 m de distancia. *a)* Ella tiene 1) miopía, 2) hipermetropía o 3) astigmatismo. Explique por qué. *b)* ¿Qué clase de lentes le permitirán ver con claridad objetos lejanos, y de qué potencia deben ser?
- Una mujer miope tiene punto lejano no corregido de 200 cm. ¿Qué clase de lentes de contacto corregirían esta condición, y de qué potencia deben ser?
- Una persona *apenas* distingue con claridad las letras en un libro cuando lo sujeta con su brazo extendido (a 0.80 m de sus ojos). *a)* Ella tiene 1) miopía, 2) hipermetropía o 3) astigmatismo. Explique por qué. *b)* ¿Qué clase de lentes le permitirán leer el texto en el punto cercano normal, y cuál es la distancia focal de esos lentes?
- Para corregir un caso de hipermetropía, un optometrista receta lentes de contacto positivos que acercan el punto cercano del paciente de 100 a 25 cm. *a)* ¿Podrá ver el paciente objetos lejanos con claridad con los lentes de contacto puestos, o se los tendrá que quitar? ¿Por qué? *b)* ¿Cuál es la potencia de los lentes?
- Una persona hipermetrope con un punto cercano de 0.95 m compra unos lentes de contacto con los que puede leer un periódico a 25 cm de distancia. ¿Cuál es la potencia de los lentes? (Suponga que los lentes son iguales para ambos ojos.)
- EI** ●● Una persona hipermetrope no logra enfocar objetos que estén más cercanos de 1.5 m. *a)* Los lentes de contacto que le permitirían enfocar las letras en un libro a 25 cm de sus ojos son 1) convergentes, 2) divergentes o 3) planos. Explique por qué. *b)* ¿De qué potencia deben ser?
- Un alumno miope usa lentes de contacto que le corrijen su punto lejano que está a 4.00 m de sus ojos. Cuando no usa sus lentes de contacto, su punto cercano está a 20 cm. ¿Cuál es su punto cercano cuando usa sus lentes de contacto?
- Una mujer miope tiene punto lejano a 2.0 m de uno de sus ojos. *a)* Si usa un lente de corrección a 2.0 cm de su ojo, ¿cuál debe ser la potencia necesaria para que vea objetos lejanos? *b)* ¿Cuál sería la potencia necesaria de un lente de contacto?
- Un profesor de preparatoria ve con claridad objetos que estén sólo entre 70 y 500 cm de sus ojos. Su optometrista le receta bifocales (▼figura 10.22) que le permiten ver objetos lejanos utilizando la mitad superior, y leer los trabajos de los alumnos a 25 cm de distancia, utilizando la parte inferior. ¿Cuáles son las potencias respectivas de los lentes superior e inferior? [Suponga que ambos lentes (derecho e izquierdo) son iguales.]

*Suponga que los lentes de corrección están en contacto con el ojo (lentes de contacto) a menos que se indique otra cosa.



▲ **FIGURA 10.22** Anteojos bifocales Véanse los ejercicios 20 y 10.

21. ●● Un hombre miope usa anteojos con -0.15 D de potencia. ¿A qué distancia tiene su punto lejano?
22. ●● Unos anteojos de $+2.8$ D de potencia permiten que un individuo hipermetrope lea un libro a 25 cm de sus ojos. ¿A qué distancia debe tener el libro para leerlo sin lentes?
8. ●●● Cierta individuo miope tiene un punto lejano de 150 cm. *a)* ¿Qué potencia deben tener unos lentes de contacto que le permitan ver con claridad objetos lejanos? *b)* Si puede leer a 25 cm usando sus lentes de contacto, su punto cercano ¿está a menos de 25 cm? Si es así, ¿dónde está ese punto? *c)* Estime la edad aproximada del sujeto con base en la tasa normal de recesión del punto cercano.
24. ●●● Un hombre de edad madura comienza a usar anteojos con lentes de $+2.0$ D, que le permiten leer un libro a 25 cm. Después de algunos años, se da cuenta de que necesita tener un libro a no menos de 33 cm para leerlo con claridad, con los mismos anteojos, así que compra unos nuevos. ¿Cuál es la potencia de los nuevos lentes? (Suponga que ambos lentes son iguales.)
10. ●●● Los anteojos bifocales se usan para corregir al mismo tiempo la miopía y la hipermetropía (figura 10.22). Si los puntos cercanos de los ojos derecho e izquierdo están a 35.0 y 45.0 cm, respectivamente, y el punto lejano está a 220 cm de ambos ojos, ¿cuáles son las potencias de los lentes que se prescriben? Suponga que los lentes se usan a 3.00 cm de los ojos.
- 10.2 Microscopios**
26. **OM** Una lupa *a)* es una lente cóncava, *b)* forma imágenes virtuales, *c)* amplifica porque aumenta el ángulo que subtende el objeto o *d)* tanto *b* como *c*.
27. **OM** Un microscopio compuesto tiene *a)* aumento ilimitado, *b)* dos lentes de la misma distancia focal, *c)* una lente divergente como objetivo o *d)* un objetivo de distancia focal relativamente corta.
28. **PC** Con un objeto en el punto focal de una lupa, el aumento es $m = (25 \text{ cm})/f$ (ecuación 10.4). De acuerdo con esta ecuación, el aumento podría incrementarse en forma indefinida usando lentes de distancia focal cada vez más corta. ¿Entonces por qué necesitamos microscopios compuestos?
29. **PC** Cuando se usa una lente convexa simple como lente de aumento, ¿dónde se debe poner el objeto: más alejado que la distancia focal, o dentro de la distancia focal? Explique por qué.
30. ● Utilice la aproximación para ángulos pequeños y compare los tamaños angulares de un automóvil de 1.0 m de altura cuando está a las distancias de *a)* 500 m, *b)* 1025 m.
31. ● Se coloca un objeto a 10 cm de una lente convergente de 18 cm de distancia focal. ¿Cuáles son *a)* el aumento lateral y *b)* el aumento angular?
32. ● Un estudiante de biología usa una lente convergente para examinar los detalles de un insecto pequeño. Si la distancia focal de la lente es de 12 cm, ¿cuál es el aumento angular máximo?
33. ● Al ver un objeto con una lente de aumento, cuya distancia focal es de 10 cm, un estudiante coloca la lente de forma que no tenga que forzar la vista. ¿Cuál es el aumento que observa?
34. **EI** ● Un alumno de física usa una lente convergente con 15 cm de distancia focal para leer una escala de medición pequeña. *a)* El aumento máximo se alcanza cuando la imagen está 1) en el punto cercano, 2) en el infinito, 3) en cualquier lugar. Explique por qué. *b)* ¿Cuál es el aumento cuando la imagen está en el punto cercano y cuando se hace la observación con el ojo relajado?
35. **EI** ●● Un detective quiere obtener el aumento máximo al examinar una huella digital con una lupa. *a)* Debería usar una lente 1) de alta potencia, 2) de baja potencia o 3) convergente pequeña. Explique por qué. *b)* Si usa lentes con potencia de $+3.5$ D y $+2.5$ D, ¿cuáles son los máximos aumentos de la huella digital?
36. ●● ¿Cuál es el aumento máximo de una lupa de $+3.0$ D de potencia para *a)* una persona con punto cercano de 25 cm, y *b)* una persona con punto cercano de 10 cm?
37. ●● Un microscopio compuesto tiene un objetivo de 4.00 mm de distancia focal, y un ocular con $10.0\times$ de aumento. Si el objetivo y el ocular están a 15.0 cm de distancia, ¿cuál es el aumento total del microscopio?
38. ●● La distancia entre las lentes de un microscopio compuesto es de 15 cm; el ocular tiene 8.0 mm de distancia focal. ¿De qué potencia debe ser el objetivo para obtener un aumento total de $-360\times$?
39. **EI** ●● Dos lentes con distancias focales de 0.45 y 0.35 cm están disponibles para un microscopio compuesto que tiene un ocular con distancia focal de 3.0 cm; la distancia entre las lentes debe ser de 15 cm. *a)* ¿Cuál de las dos lentes debe utilizarse como objetivo? 1) La de mayor distancia focal, 2) la de menor distancia focal o 3) cualquiera de las dos. *b)* ¿Cuáles son los dos posibles aumentos del microscopio?
40. ●● La distancia focal del objetivo de un microscopio compuesto es de 4.5 mm. El ocular tiene 3.0 cm de distancia focal. Si la distancia entre las lentes es de 18 cm, ¿cuál es el aumento de la imagen que se ve?
41. ●● Un microscopio compuesto tiene un objetivo con 0.50 cm de distancia focal, y un ocular con 3.25 cm de distancia focal. La separación entre las lentes es de 22 cm. Un alumno con punto cercano normal usa ese microscopio. *a)* ¿Cuál es el aumento total? *b)* Compare el aumento total (como porcentaje) con el aumento del ocular solamente, cuando se usa como lupa simple.

*Se considera que el punto cercano normal está a 25 cm, a menos que se especifique otra cosa.

42. ●● Un microscopio con $-150\times$ tiene un objetivo con 0.75 cm de distancia focal. Si la distancia entre las lentes es de 20 cm, calcule la distancia focal del ocular.
43. ●● Un espécimen está a 5.0 mm del objetivo de un microscopio compuesto, cuya potencia es de $+250$ D. ¿Cuál debe ser el aumento del ocular, si el aumento total del espécimen es $-100\times$?
44. ●●● Se usa una lente con $+10$ D de potencia como microscopio simple. *a)* Para ver con claridad la imagen de un objeto, ¿se puede poner el objeto infinitamente cerca de la lente, o hay algún límite de la cercanía a la que debe estar? ¿Por qué? *b)* Calcule qué tanto se puede acercar un objeto a la lente. *c)* ¿Cuál es el aumento angular en ese punto?
45. **El** ●●● Un microscopio moderno tiene un revólver con tres objetivos, cuyas distancias focales son 16, 4.0 y 1.6 mm; tiene oculares intercambiables de 5.0 y $10\times$. Se coloca un espécimen de tal forma que cada objetivo produce una imagen a 150 mm de distancia de él. *a)* ¿Cuál combinación de objetivo y ocular emplearía si quisiera obtener el máximo aumento? ¿Y el aumento mínimo? ¿Por qué? *b)* ¿Cuáles son el aumento máximo y el mínimo posible?

10.3 Telescopios

46. **OM** Un telescopio astronómico tiene *a)* aumento ilimitado, *b)* dos lentes de la misma distancia focal, *c)* un objetivo de distancia focal relativamente grande, *d)* un objetivo de distancia focal relativamente corta.
47. **OM** Una imagen invertida se produce con *a)* un telescopio terrestre, *b)* un telescopio astronómico, *c)* un telescopio de Galileo o *d)* todos los anteriores.
48. **OM** En comparación con los grandes telescopios refractores, los grandes telescopios reflectores tienen la ventaja de *a)* mayor capacidad de captación de luz, *b)* que no tienen aberración cromática, *c)* que son menos costosos o *d)* todo lo anterior.
49. **PC** En la figura 10.12b, parte de la luz que entra al espejo cóncavo es obstruida por un espejo plano pequeño, que se usa para redirigir los rayos hacia el observador. ¿Eso significa que sólo se puede ver una parte de una estrella? ¿Cómo afecta a la imagen el tamaño de la obstrucción?
50. **PC** ¿Por qué la aberración cromática es un factor importante en los telescopios refractores, pero no en los reflectores?
51. **PC** Si le dan a usted dos lentes con distintas distancias focales, ¿cuál debe usar como objetivo en un telescopio? ¿Por qué?
52. ● Calcule el aumento y longitud de un telescopio si su objetivo tiene una distancia focal de 50 cm, y su ocular una de 2.0 cm.
53. ● Un telescopio astronómico tiene un objetivo y un ocular, cuyas distancias focales son de 60 y 15 cm, respectivamente. ¿Cuáles son *a)* el aumento y *b)* la longitud del telescopio?
54. ●● Un telescopio tiene un ocular cuya distancia focal es de 10.0 mm. Si la longitud del tubo es de 1.50 m, ¿cuál es el aumento angular del telescopio, cuando enfoca un objeto en el infinito?
55. El aumento angular de un telescopio es $-50\times$, y su tubo tiene 1.02 m de longitud. ¿Cuáles son las distancias focales del objetivo y del ocular?
56. **El** ●● Un telescopio terrestre tiene tres lentes: un objetivo, una lente inversora y un ocular. *a)* La lente inversora 1) incrementa el aumento, 2) aumenta la longitud física del telescopio, 3) reduce el aumento o 4) disminuye la longitud física del telescopio. ¿Por qué? *b)* Las tres lentes de este telescopio terrestre tienen 40, 20 y 15 cm de distancia focal, respectivamente para el objetivo, la lente erectora y el ocular. ¿Cuál es el aumento del telescopio cuando el objeto está en el infinito? *c)* ¿Cuál es la longitud del tubo del telescopio?
57. ●● Un telescopio terrestre o catalejo usa un objetivo y un ocular con distancias focales de 45 y 15 cm, respectivamente. ¿Cuál debe ser la distancia focal de la lente erectora si la longitud total del telescopio debe ser de 0.80 m?
58. ●● Un telescopio astronómico tiene un objetivo con una potencia de $+2.0$ D. Si la longitud del telescopio es de 52 cm, ¿cuál es su aumento angular?
59. **El** ●● Se le dan a usted dos objetivos y dos oculares, y se le pide fabricar con ellos un telescopio. Las distancias focales de los objetivos son 60.0 y 40.0 cm, y las de los oculares son 0.90 y 0.80 cm, respectivamente. *a)* ¿Con qué combinación de lentes se obtendría el aumento máximo? ¿Y el aumento mínimo? ¿Por qué? *b)* Calcule los aumentos máximo y mínimo.

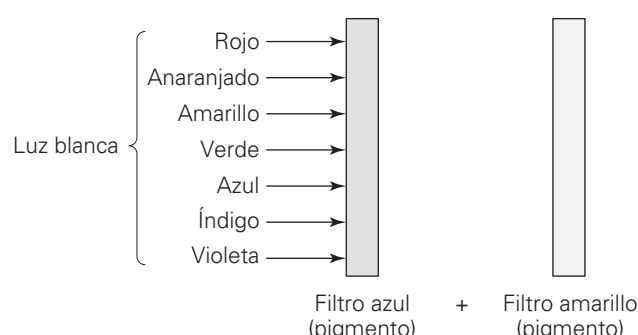
10.4 Difracción y resolución

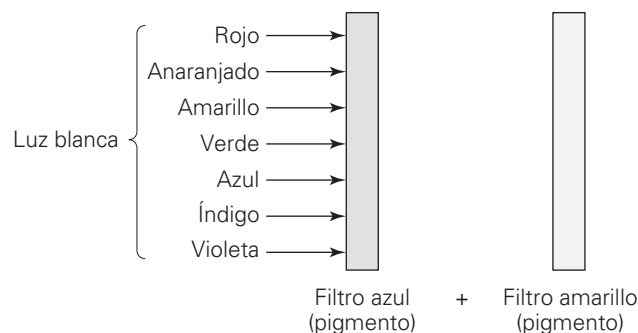
60. **OM** Se dice que las imágenes de dos fuentes están resueltas cuando *a)* los máximos centrales de las figuras de difracción caen uno sobre otro, *b)* las primeras bandas brillantes de las figuras de difracción caen una sobre otra, *c)* el máximo central de una figura de difracción cae en la primera franja oscura de la otra o *d)* ninguna de las opciones anteriores es válida.
61. **OM** Para un telescopio con abertura circular, el ángulo mínimo de resolución es *a)* mayor para la luz roja que para la azul, *b)* independiente de la frecuencia de la luz, *c)* directamente proporcional al radio de la abertura o *d)* independiente del área de la abertura.
62. **OM** La finalidad de usar lentes de inmersión en aceite en los microscopios es *a)* reducir el tamaño del microscopio *b)* incrementar el aumento, *c)* aumentar la longitud de onda de la luz para aumentar el poder de resolución o *d)* reducir la longitud de onda de la luz, y con ello aumentar el poder de resolución.

*Ignore la obstrucción de la atmósfera, a menos que se indique otra cosa.

63. **PC** Cuando se diseña un instrumento óptico se desea tener una gran resolución, para poder ver con él detalles finos. Esta mayor resolución, ¿implica un ángulo de resolución mayor o menor? Explique por qué.
64. **PC** Un telescopio reflector con un espejo objetivo grande es capaz de reunir más luz estelar que un telescopio reflector con un espejo objetivo de menor tamaño. ¿Qué otra ventaja se gana con un espejo grande? Explique por qué.
65. **PC** Las modernas cámaras digitales cada vez son más pequeñas. Analice la resolución de imagen de estas pequeñas cámaras.
66. **EI** ● *a)* Para una determinada longitud de onda, una sola rendija ancha dará 1) mayor, 2) menor o 3) el mismo ángulo mínimo de resolución que una rendija delgada, de acuerdo con el criterio de Rayleigh. *b)* ¿Cuál es el ángulo mínimo de resolución para dos fuentes puntuales de luz roja ($\lambda = 680 \text{ nm}$) en la figura de difracción producida por rendijas individuales de 0.55 y 0.45 mm de ancho?
67. ● La separación angular mínima de las imágenes de dos fuentes puntuales monocromáticas idénticas en una figura de difracción con una sola rendija es de 0.0055 rad. Si se usa un ancho de rendija de 0.10 mm, ¿cuál es la longitud de onda de las fuentes?
68. ● ¿Cuál es el límite de resolución, que se debe a la difracción, del telescopio reflector del Observatorio Europeo Meridional (de 8.20 m o 323 pulgadas de diámetro) para luz con 550 nm de longitud de onda?
69. ● ¿Cuál es la resolución, que se debe a la difracción, del telescopio Hale en Monte Palomar, con su espejo de 200 pulgadas de diámetro, para luz de 550 nm? Compare este valor con el límite de resolución para el telescopio del Observatorio Europeo Meridional, en el ejercicio 68.
70. ●● Desde una nave espacial en órbita a 150 km de la superficie terrestre, una astronauta desea ver su pueblo natal al pasar sobre él. ¿Qué tamaño de detalles podrá identificar, a ojo desnudo, sin tener en cuenta los efectos de la atmósfera? [*Sugerencia:* estime el diámetro del iris humano.]
71. **EI** ●● Un ojo humano ve objetos pequeños de distintos colores, y con ello se mide su resolución. *a)* El ojo tiene la máxima resolución y ve los detalles más finos con el color 1) rojo, 2) amarillo, 3) azul o 4) no importa cuál. ¿Por qué? *b)* El diámetro máximo de la pupila del ojo, por la noche, es de unos 7.0 mm. ¿Cuáles son los ángulos mínimos de separación para dos fuentes con longitudes de onda de 550 y 650 nm?
72. ●● Algunos miembros de tribus africanas afirman que pueden ver las lunas de Júpiter sin la ayuda de instrumentos ópticos. Si dos lunas de Júpiter están a una distancia mínima de $3.1 \times 10^8 \text{ km}$ de la Tierra, y tienen una separación máxima de $3.0 \times 10^6 \text{ km}$, ¿será posible que las vean? Explique por qué. Suponga que las lunas reflejan la luz suficiente, y que Júpiter no estorba la observación de ellas. [*Sugerencia:* véase el ejercicio 71b.]
73. ●● Suponiendo que los faros de un automóvil sean fuentes puntuales a 1.7 m de distancia entre sí, ¿cuál es la distancia máxima de un observador al automóvil, a la cual puede distinguir los faros uno de otro? [*Sugerencia:* véase el ejercicio 71b.]
74. ●● Con un telescopio refractor, cuya lente mide 30.0 cm de diámetro, se contempla un sistema de estrellas binarias, que emite luz en la región visible. *a)* ¿Cuál es la separación angular mínima de las dos estrellas para que apenas queden resueltas? *b)* Si la estrella binaria está a $6.00 \times 10^{20} \text{ km}$ de la Tierra, ¿cuál es la distancia entre las dos estrellas? (Suponga que la línea que une a las estrellas es perpendicular a la visual.)
75. ●● Un radiotelescopio tiene 300 m de diámetro y utiliza una longitud de onda de 4.0 para observar un sistema de estrellas binarias que está a $2.5 \times 10^{18} \text{ km}$ de la Tierra. ¿Cuál es la mínima distancia entre las dos estrellas que se distinga con el telescopio?
76. ●● El objetivo de un microscopio tiene 2.50 cm de diámetro y 30.0 mm de distancia focal. *a)* Si para iluminar un espécimen se usa luz amarilla de 570 nm de longitud de onda, ¿cuál es la separación angular mínima de dos detalles finos de la muestra para que apenas se resuelvan? *b)* ¿Cuál es el poder de resolución de la lente?
77. ●●● Para ver un espécimen con una luz de mercurio, con longitud de onda de 546.1 nm, se usa un microscopio con un objetivo de 1.20 cm de diámetro. *a)* ¿Cuál es el ángulo límite de resolución? *b)* Si se deben observar detalles más finos que los observables en la parte *a)*, ¿qué color de luz del espectro visible hay que usar? *c)* Si se usara una lente de inmersión en aceite ($n_{\text{aceite}} = 1.50$), ¿cuál sería el cambio (expresado en porcentaje) del poder de resolución?

*10.5 Color

78. **OM** Un color primario aditivo es *a)* azul, *b)* verde, *c)* rojo o *d)* todos los anteriores.
79. **OM** Un color primario sustractivo es *a)* cian, *b)* amarillo, *c)* magenta o *d)* todos los anteriores.
80. **OM** Sobre dos filtros incide una luz blanca, como se ve en la  figura 10.23. El color de la luz que sale del filtro amarillo es *a)* azul, *b)* amarillo, *c)* rojo o *d)* verde.



▲ FIGURA 10.23 Absorción de los colores

Véase el ejercicio 80.

81. **PC** Describa cómo se vería la bandera estadounidense si se iluminara con luz de cada uno de los colores primarios.
82. **PC** ¿Puede obtenerse el blanco con el método sustractivo de producción de colores? Explique por qué. A veces se dice que el negro es la ausencia de todos los colores, o que un objeto negro absorbe toda la luz incidente. Si es así, ¿por qué vemos objetos negros?

83. **PC** Algunas bebidas, como la cerveza oscura, producen una capa de espuma cuando se vierten en el vaso. ¿Por qué la espuma tiene un color blanco o claro, mientras que el líquido es oscuro?

Ejercicios adicionales

84. Un estudiante utiliza una lupa para examinar con detalle un microcircuito en el laboratorio. Si la lente tiene una potencia de 12.5 D y se forma una imagen virtual en el punto cercano (25 cm) del estudiante, *a)* ¿a qué distancia del circuito sostiene la lupa y *b)* ¿cuál es el aumento angular?
85. Con respecto a la **figura 10.24**, demuestre que la potencia de aumento de una lupa que se sostiene a una distancia *d* del ojo está determinada por

$$m = \left(\frac{25}{f}\right)\left(1 - \frac{d}{D}\right) + \frac{25}{D}$$

cuando el objeto real se ubica en el punto cercano (25 cm). [Sugerencia: utilice un aproximación para ángulos pequeños y tome en cuenta que $y_i/y_o = -d_i/d_o$, para triángulos similares.]

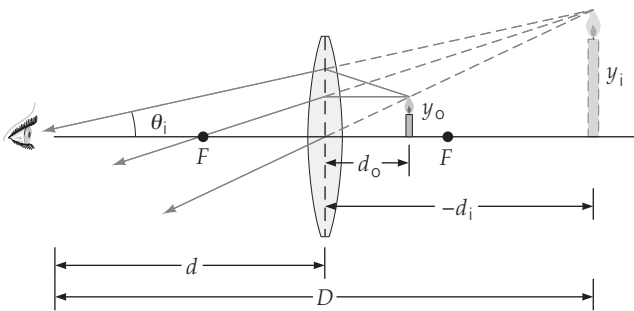


FIGURA 10.24 Potencia de una lente de aumento. Véase el ejercicio 85.

86. En relación con la **figura 10.25**, demuestre que el aumento angular de un telescopio refractor enfocado para que la imagen final esté en el infinito es $m = -f_o/f_e$. (Como los telescopios están diseñados para observar objetos lejanos, el tamaño angular de un objeto visto con el ojo desnudo es el tamaño angular del objeto en su ubicación real y no en el punto cercano, como sucede con un microscopio.)

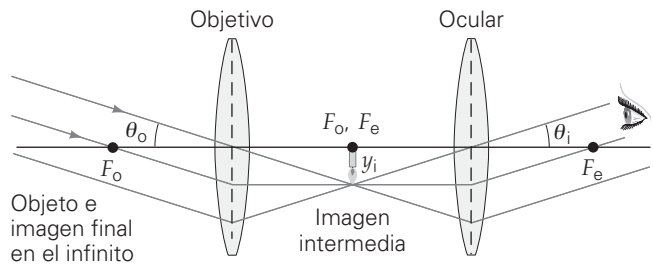


FIGURA 10.25 Modificación angular de un telescopio refractor. Véase el ejercicio 86.

87. Dos telescopios astronómicos tienen las características que muestra la siguiente tabla.

| Telescopio | Distancia focal del objetivo (cm) | Distancia focal del ocular (cm) | Diámetro del objetivo (cm) |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| A | 90.0 | 0.840 | 75.0 |
| B | 85.0 | 0.770 | 60.0 |

- a)* ¿Cuál telescopio escogería 1) para el mayor aumento y 2) para la mayor resolución? ¿Por qué? *b)* Calcule el aumento máximo y el ángulo mínimo de resolución para una longitud de onda de 550 nm.
88. Un telescopio refractor tiene un objetivo con 50 cm de distancia focal, y un ocular con 15 mm de distancia focal. Se usa para ver un objeto de 10 cm de altura a 50 m de distancia. ¿Cuál es la altura angular aparente del objeto, visto con el telescopio?
89. La cantidad de luz que llega a la película de una cámara depende de la abertura de la lente (el área efectiva), que se controla con el diafragma. La abertura *f* es la relación entre la distancia focal de la lente y su diámetro efectivo. Por ejemplo, un ajuste de *f*/8 significa que el diámetro de la abertura es la octava parte de la distancia focal de la lente. Esta distancia se llama *abertura f* o simplemente *abertura*. *a)* Determine cuánta luz admite cada una de las siguientes aberturas de la cámara, en comparación con la *f*/8: 1) *f*/3.2 y 2.) *f*/16. *b)* El tiempo de exposición de una cámara se controla con la velocidad del obturador. Si un fotógrafo usa en forma correcta una abertura de *f*/8 con un tiempo de exposición de 1/60 s, ¿qué tiempo de exposición debe usar para tener la misma cantidad de exposición a la luz si ajusta la abertura a *f*/5.6?

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS DE REFUERZO

Capítulo 1

1.1 $1.52 \times 10^{-20} \%$

1.2 No; si el peine fuera positivo, polarizaría al papel a la inversa y lo seguiría atrayendo.

1.3 \vec{F}_1 tiene una magnitud de 3.8×10^{-7} N a un ángulo de 57° sobre el eje x positivo. El notación vectorial unitaria: $\vec{F}_1 = (-0.22 \mu\text{N}) \hat{x} + (0.32 \mu\text{N}) \hat{y}$.

1.4 0.12 m o 12 cm.

1.5 $\frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_e^2} = 4.2 \times 10^{42}$ o $F_e = 4.2 \times 10^{42} F_g$. La magnitud

de la fuerza eléctrica es la misma que la que hay entre un protón y un electrón (en el ejemplo) porque tienen la misma (magnitud) carga en ellos. Sin embargo, la fuerza gravitacional se reduce porque las masas que se atraen son dos electrones más que un electrón y un protón mucho más masivo.

1.6 El campo es cero hacia la izquierda de q_1 en $x = -0.60$ m.

1.7 $\vec{E} = (-797 \text{ N/C}) \hat{x} + (359 \text{ N/C}) \hat{y}$ o $E = 874 \text{ N/C}$ a un ángulo de 24.2° por encima del eje x negativo.

1.8 En los tres lugares hay dos campos a considerar que se suman vectorialmente: uno que sale del extremo positivo y el otro del extremo negativo del dipolo. a) Aquí, el mayor de los dos campos es el del extremo positivo más cercano y apunta hacia arriba. El campo más pequeño, que se debe al extremo negativo, apunta hacia abajo, así que la dirección del campo es hacia arriba alejándose del extremo positivo. b) Aquí el mayor de los dos campos es el del extremo negativo más cercano y apunta hacia arriba. El campo más pequeño, que se debe al extremo positivo, apunta hacia abajo, por lo que la dirección del campo es hacia arriba y hacia el extremo negativo. c) Aquí ambos campos apuntan hacia abajo, así que el campo neto es hacia abajo, alejándose del extremo positivo y hacia el extremo negativo.

1.9 a) El campo eléctrico apunta hacia arriba, del suelo a la nube. b) 2.3×10^3 C.

1.10 La carga positiva estaría por completo en la superficie externa, así que sólo el electroscopio conectado con la superficie exterior mostraría desviación.

1.11 Su signo es negativo, porque las líneas del campo eléctrico apuntan hacia las cargas negativas, y todas están dentro en relación con la superficie gaussiana.

Capítulo 2

2.1 a) ΔU_e se duplicaría a $+7.20 \times 10^{-18}$ J porque la carga de la partícula se duplica. b) ΔV no cambia porque no está en relación con la partícula. c) $v = 4.65 \times 10^4$ m/s.

2.2 6.63×10^7 m/s

2.3 a) Se movió más desde una carga positiva (el protón) y, por consiguiente, se movió a una región de menor potencial eléctrico. b) $\Delta U_e = +3.27 \times 10^{-18}$ J.

2.4 $U_{\text{co}} = -3.27 \times 10^{-19}$ J. Es menos estable, porque se necesitaría menos trabajo para romperla, que para la molécula de agua.

2.5 a) 2.22 m. b) La más cercana a la superficie terrestre tiene mayor potencial. c) No, sólo es posible conocer la distancia de separación entre las dos superficies, no su ubicación absoluta.

2.6 a) La superficie 1 está a mayor potencial que la superficie 2 porque está más cerca de la superficie con carga positiva.

b) Cuando está muy lejos, el objeto cargado “parece” una carga puntual, por lo que las superficies equipotenciales se vuelven esféricas en forma gradual, conforme aumenta la distancia al objeto. 2.7 $d = 8.9 \times 10^{-16}$ m, que es mucho menor que el diámetro de un átomo (o un núcleo para esa materia). Por consiguiente, este diseño es completamente impráctico.

2.8 7.90×10^3 V

2.9 La capacitancia disminuye conforme la separación d aumenta. Como el voltaje a través del condensador permanece constante, esto significa que la carga en él tendría que disminuir; por lo tanto, la carga fluiría alejándose del condensador. $\Delta Q = -3.30 \times 10^{-12}$ C.

2.10 $U_{\text{paralelo}} = 1.20 \times 10^{-4}$ J y $U_{\text{serie}} = 5.40 \times 10^{-4}$ J, así que el arreglo en paralelo almacena más energía.

2.11 a) $Q_1 = 8.0 \times 10^{-7}$ C; $Q_2 = 1.6 \times 10^{-6}$ C; $Q_3 = 2.4 \times 10^{-6}$ C. b) $U_1 = 3.2 \times 10^{-6}$ J; $U_2 = 6.4 \times 10^{-6}$ J; $U_3 = 4.8 \times 10^{-6}$ J

Capítulo 3

3.1 El resultado es el mismo; esto es, $V_{AB} = V$.

3.2 Aproximadamente 32 años.

3.3 100 V.

3.4 Nuestra suposición es que $R = \frac{\rho L}{A}$. Por lo tanto, si la resistencia se duplicara y la longitud se redujera a la mitad, el numerador permanecería igual. Si el diámetro se redujera a la mitad, el área disminuiría por un factor de 4. El resultado neto de estos cambios es que la resistencia aumenta por un factor de 4, hasta $3.0 \times 10^3 \Omega$. De esta forma, $I = \frac{V}{R} = \frac{400 \text{ V}}{3.0 \times 10^3 \Omega} = 0.133$ A.

3.5 $R = 0.67 \Omega$. El material con el mayor coeficiente térmico de resistividad permite hacer un termómetro más sensible porque produce un mayor cambio (y, por consiguiente, más preciso de medir) en la resistencia para un cambio de temperatura dado.

3.6 El calor necesario es $Q = mc\Delta T = 1.67 \times 10^5$ J. Así que la salida de potencia del calentador necesita ser

$P = \frac{Q}{t} = \frac{1.67 \times 10^5 \text{ J}}{180 \text{ s}} = 930 \text{ W}$. Como esto lo suministra el ca-

lentamiento de joule, tenemos $R = \frac{V^2}{P} = \frac{(120 \text{ V})^2}{1.67 \times 10^5 \text{ J}} = 15.5 \Omega$.

3.7 a) $R_1 = \frac{V^2}{P_1} = \frac{(115 \text{ V})^2}{1200 \text{ W}} = 11.0 \Omega$ y

$R_2 = 0.900R_1 = 9.92 \Omega$. b) $I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{115 \text{ V}}{11.0 \Omega} = 10.5 \text{ A}$

e $I_2 = 1.11I_1 = 11.6 \text{ A}$.

3.8 8.3 horas.

3.9 En el mejor de los casos, las centrales producen energía eléctrica con eficiencias de 35% (sin tener en cuenta pérdidas por transmisión). Así, en términos de combustibles primarios, la eficiencia máxima de cualquier electrodoméstico es del 35%. Sin embargo, el gas natural se entrega esencialmente sin pérdidas de energía. En el punto de entrega, se quema y puede entregar, por lo menos teóricamente, hasta el 100% de su contenido calorífico para la tarea en cuestión. Por ejemplo, un

calentador de agua bien aislado será capaz de absorber aproximadamente el 95% de la energía calorífica que se le entrega. Por lo tanto, la eficiencia eléctrica global sería de 0.95 (35%) o aproximadamente el 34%. Para la versión de gas, la eficiencia sería del 95%.

Capítulo 4

4.1 a) En serie: $P_1 = 4.0 \text{ W}$, $P_2 = 8.0 \text{ W}$, $P_3 = 12.0 \text{ W}$. En paralelo: $P_1 = 14 \times 10^2 \text{ W}$, $P_2 = 72 \text{ W}$, $P_3 = 48 \text{ W}$. b) En serie, la mayor parte de la potencia se disipa en la resistencia mayor. En paralelo, la mayor parte de la potencia se disipa en la resistencia menor. c) En serie: la potencia total del resistor es 24 W , y $P_b = I_b V_b = (2.0 \text{ A})(12 \text{ V}) = 24 \text{ W}$, de manera que sí, como se requiere de acuerdo con la conservación de energía. En paralelo: la potencia total del resistor es $P_{\text{tot}} = 2.6 \times 10^2 \text{ W}$, y $P_b = I_b V_b = (22 \text{ A})(12 \text{ V}) = 2.6 \times 10^2 \text{ W}$ (con dos cifras significativas), de manera que sí, como se requiere de acuerdo con la conservación de energía.

4.2 a) El voltaje a través del receptáculo abierto será 120 V . b) El voltaje a través de las demás bombillas será cero.

4.3 $P_1 = I_1^2 R_1 = 54.0 \text{ W}$, $P_2 = I_2^2 R_2 = 9.0 \text{ W}$, $P_3 = I_3^2 R_3 = 0.87 \text{ W}$, $P_4 = I_4^2 R_4 = 2.55 \text{ W}$ y $P_5 = I_5^2 R_5 = 5.63 \text{ W}$. Su suma es 72.1 W redondeada a tres cifras significativas. Existe acuerdo sobre la potencia de salida de la batería (diferencia que se debe al redondeo), esto es, $P_b = I_b V_b = (3.00 \text{ A})(24.0 \text{ V}) = 72.0 \text{ W}$.

4.4 a) Si aumenta R_2 , entonces aumenta la resistencia equivalente de R_2 en paralelo y aumenta R_1 . Por consiguiente, la resistencia total del circuito aumenta y produce una reducción de la corriente total por el circuito. Como la corriente en R_3 es igual que la corriente total, I_3 debe disminuir. Entonces V_3 debería disminuir. Por consiguiente, V_1 y V_2 deberían aumentar porque son iguales, y $V = V_2 + V_3 = \text{constante}$. Como R_1 no ha cambiado, I_1 debe aumentar a causa del aumento de voltaje. Como I_3 disminuye e I_1 aumenta, se debe cumplir (a partir de $I_3 = I_1 + I_2$) que I_2 disminuye. b) Al recalcularse se confirman estas predicciones: $I_1 = 0.51 \text{ A}$ (aumenta), $I_2 = 0.38 \text{ A}$ (disminuye) e $I_3 = 0.89 \text{ A}$ (disminuye).

4.5 En el de la unión se sigue cumpliendo $I_1 = I_2 + I_3$ (ecuación 1). Se aplica el teorema de la malla en torno al circuito 3, en sentido de las manecillas del reloj (todos los números son volts, que se eliminaron por conveniencia): $6 - 6I_1 - 9I_2 = 0$ (ecuación 2). Para la malla 1, el resultado es $6 - 6I_1 - 12 - 2I_3 = 0$ (ecuación 3). Se despeja I_2 de la ecuación 1 y se sustituye en la ecuación 2. A continuación se resuelven simultáneamente las ecuaciones 2 y 3, para obtener I_1 e I_3 . Todas las respuestas son las mismas del ejemplo, como debe ser.

4.6 a) El almacenamiento máximo de energía a 9.00 V es 4.05 J . A 7.20 V , el condensador sólo almacena 2.59 J , el 64% del máximo. Esto se debe a que el almacenamiento de energía varía como el *cuadrado* del voltaje a través del condensador, y $0.8^2 = 0.64$. b) 8.64 V , porque el voltaje no aumenta linealmente, sino en forma exponencial.

4.7 10 A .

4.8 0.20 mA .

Capítulo 5

5.1 Al este, porque al cambiar tanto la dirección de la velocidad como el signo de la carga, la dirección permanece igual.

5.2 a) Aplicando la regla de fuerza de la mano derecha, el protón se desviaría inicialmente en dirección de x negativa. b) 0.10 T .

5.3 0.500 V

5.4 a) En los polos, el campo magnético es perpendicular al suelo. Como la corriente es paralela al suelo, de acuerdo con la regla de la mano derecha para la fuerza, la fuerza sobre el alambre estaría en un plano paralelo al suelo. Por esa razón, no podría anular la fuerza de la gravedad, que es hacia abajo. b) La masa del alambre es 0.041 g , demasiado baja para ser realista.

5.5 a) A 45° , el momento de torsión es $0.269 \text{ m} \cdot \text{N}$, o 70.7% del momento de torsión máximo. b) 30° .

5.6 a) Sur b) 75 A .

5.7 1500 vueltas.

5.8 a) La fuerza se vuelve repulsiva. Demuestre esto aplicando las reglas de la mano derecha para fuentes y para fuerzas. b) 0.027 m o 27 mm .

5.9 La permeabilidad sólo tendría que ser el 40% del valor en el ejemplo, o $\mu \geq 480\mu_0 = 6.0 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

Capítulo 6

6.1 a) En sentido de las manecillas del reloj. b) 0.335 mA .

6.2 En cualquier forma que aumente el flujo por ejemplo aumentando el área de la espira o la cantidad de vueltas. También ayudaría cambiar a una resistencia menor.

6.3 $7.36 \times 10^{-4} \text{ T}$

6.4 1.5 m/s

6.5 0.28 m

6.6 a) $6.1 \times 10^3 \text{ J}$ b) $5.0 \times 10^3 \text{ J}$ de manera que se emplea energía unas 12 veces mayor durante el arranque.

6.7 a) Se usaría como transformador de subida, porque los electrodomésticos en Europa se diseñan para funcionar a 240 V , que es el doble del voltaje que se usa en Estados Unidos (120 V). b) La corriente de salida sería $1500 \text{ W}/240 \text{ V}$ o 6.25 A . Por lo tanto, la corriente de entrada sería de 12.5 A . (El voltaje subiría por un factor de dos, así que la corriente de entrada es el doble de la corriente de salida.)

6.8 a) Los mayores voltajes permiten utilizar menores corrientes. Esto, a la vez, reduce las pérdidas en calor de joule en las líneas de transmisión y en los devanados de los motores, y hace que sea mayor la energía disponible para hacer trabajo mecánico, con lo cual aumenta la eficiencia. b) Como el voltaje se duplica, la corriente se reduce a la mitad. La pérdida de calor en el conductor es proporcional al *cuadrado* de la corriente. Entonces, las pérdidas se reducen por un factor de 4, al 25% de su valor a 120 V .

6.9 0.38 cm/s .

6.10 a) Al aumentar la distancia, la intensidad luminosa del Sol (energía por segundo por unidad de área) baja. Así lo hace la fuerza que se debe a la presión lumínica sobre la vela. A la vez, se reduciría la aceleración de la embarcación. b) Se necesitaría aumentar de alguna manera el área de la vela, para captar más luz.

Capítulo 7

7.1 La luz viaja en línea recta y es reversible. Si uno puede ver a alguien en un espejo, esa persona lo puede ver a uno. A la inversa, si no se puede ver en el espejo del camión, el conductor no puede ver la imagen de uno en el espejo, y no sabe que su automóvil está detrás del camión.

7.2 $n = 1.25$ y $\lambda_m = 400 \text{ nm}$

7.3 De acuerdo con la ley de Snell, $n_2 = 1.24$, así que $v = c/n_2 = 2.42 \times 10^8 \text{ m/s}$.

7.4 Con una n mayor, θ_2 es menor, por lo que la luz refractada dentro del vidrio se acerca a la parte izquierda inferior. Entonces, el desplazamiento lateral es mayor. 0.72 cm .

7.5 a) La frecuencia de la luz no cambia en los distintos medios, por lo que la luz que sale tiene la misma frecuencia que la de la fuente. b) La longitud de onda en el aire es independiente de los medios agua y vidrio, como se puede demostrar agregando otra etapa (oro medio) a la solución del ejemplo. Según el análisis inverso, $\lambda_{\text{aire}} = n_{\text{agua}}\lambda_{\text{agua}} = (c/v_{\text{agua}})\lambda_{\text{agua}} = c/f$. Por consiguiente, la longitud de onda en el aire es c/f .

7.6 A causa de las reflexiones totales internas, el clavadista no puede ver lo que esté por encima del agua. En lugar de ello vería la reflexión de algo en los lados y/o el fondo de la piscina. (Haga el seguimiento inverso de los rayos.)

7.7 $n = 1.4574$. La luz verde se refracta más que la roja, porque el verde tiene menor longitud de onda, por lo que su n es mayor que el de la luz roja. De acuerdo con la ley de Snell, el verde tiene menor ángulo de refracción, por lo que se refracta más.

Capítulo 8

8.1 No tiene efecto. Observe que la solución del ejemplo no incluye la distancia. La geometría de esta situación es igual, independientemente de la distancia al espejo.

8.2 $d_i \approx 60$ cm; real, invertida y aumentada.

8.3 $d_i = d_o$ y $M = -1$; real, invertida y del mismo tamaño

8.4 La imagen siempre es derecha y de menor tamaño que el objeto.

8.5 $d_i = -20$ cm (frente a la lente); virtual, derecha y aumentada.

8.6 $d_o = 2f = 24$ cm

8.7 Al bloquear la mitad de la lente, llega la mitad de la cantidad de luz al plano de la imagen, así que la imagen resultante será menos brillante, pero será completa.

8.8 La imagen siempre es derecha y de menor tamaño que el objeto.

8.9 A 3 cm detrás de L_2 ; real, invertida y de menor tamaño que el objeto ($M_{\text{total}} = \pm > 75$)

8.10 Si la lente se sumergiera en agua, la ecuación 8.8 debe-

ría modificarse a $\frac{1}{f} = (n/n_m - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$, donde $n_m = 1.33$ (agua). Como $n = 1.52 > n_m = 1.33$, la lente sigue siendo con-

vergente. $P = \frac{1}{f} = (1.52/1.33 - 1)\left(\frac{1}{0.15 \text{ m}} + \frac{1}{-0.20 \text{ m}}\right)$

$$= 0.238 \text{ 1/m} = 0.238 \text{ D. } f = \frac{1}{0.238 \text{ 1/m}} = 4.20 \text{ m.}$$

Capítulo 9

9.1 $\Delta y = y_r - y_b = 1.2 \times 10^{-2} = 1.2$ cm

9.2 doble espesor, $t = 199$ nm

9.3 En los instrumentos de metal, el sonido sale de una abertura relativamente grande y abocinada. Por consiguiente, hay poca difracción y entonces la mayor parte de la energía se irradia hacia delante. En los de viento, gran parte del sonido sale de agujeros de tono a lo largo de la columna del instrumento. Esos agujeros son pequeños en comparación con la longitud de onda del sonido, por lo que la difracción es apreciable. El resultado es que el sonido se irradia casi en todas direcciones, incluso hacia atrás.

9.4 Aumentaría el ancho por un factor de $700/550 = 1.27$.

9.5 $\Delta\theta_2 = \theta_2(700 \text{ nm}) - \theta_2(400 \text{ nm}) = 44.4^\circ - 23.6^\circ = 20.8^\circ$.

9.6 45°

9.7 $\theta_2 = 41.2^\circ$

9.8 589 nm; amarillo.

Capítulo 10

10.1 No funcionaría; se formaría una imagen real en el lado de la lente que da hacia la persona ($d_i = +0.75$ m).

10.2 Para un objeto a $d_o = 25$ cm, la imagen se formaría a 1.0 m para el ojo 1, más allá del punto cercano de ese ojo, por lo que el objeto se podría ver con claridad. La imagen para el ojo 2 se formaría a 0.77 m, es decir, dentro del punto cercano para ese ojo, por lo que el objeto no se vería con claridad.

10.3 La lupa para ver en el punto cercano, 2.0 cm mayor.

10.4 La longitud aumenta al doble.

10.5 $f_i = 8.0$ cm

10.6 La lente erectora (de distancia focal f_e) debería estar entre el objetivo y el ocular, a una distancia $2f_e$ de la imagen que forma el objetivo, la cual a su vez hace las veces de objeto. La lente erectora produce entonces una imagen invertida del mismo tamaño a la distancia $2f_e$ del lado opuesto de ella, y esa imagen constituye el objeto para el ocular. El uso de la lente erectora alarga el telescopio la longitud $4f_e$.

10.7 3.4×10^{-7} rad, un orden de magnitud mejor que los 10^{-6} rad característicos.

10.8 2.9 cm

RESPUESTAS A LOS EJERCICIOS CON NÚMERO IMPAR

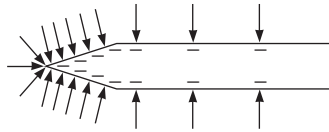
Capítulo 1

1. c)
3. c)
5. No. Las cargas simplemente se mueven de un objeto a otro.
7. Acercar el objeto cargado al electroscopio y observar cómo se mueven las hojas. Si la repulsión entre las hojas aumenta, la carga en el objeto tiene el mismo signo que la del electroscopio; si la repulsión entre las hojas disminuye, entonces la carga en el objeto tiene signo contrario que la del electroscopio.
9. $-1.6 \times 10^{-13} \text{ C}$
11. $+6.40 \times 10^{-19} \text{ C}$
13. a) (1) positiva, a causa de la conservación de la carga. Cuando un objeto adquiere carga negativa, gana electrones. Otro objeto pierde esos mismos electrones y adquiere carga positiva. b) $+4.8 \times 10^{-9} \text{ C}$, $2.7 \times 10^{-20} \text{ kg}$ c) $2.7 \times 10^{-20} \text{ kg}$
15. d)
17. Es para eliminar el exceso de carga que se debe a la fricción del caucho en la carretera. Si no se elimina la carga en exceso, esto podría generar un chispazo, que provocaría una explosión de la gasolina.
19. Si usted acerca un objeto con carga negativa al electroscopio, el proceso de inducción cargará el electroscopio positivamente. Es posible probar que las cargas son positivas acercando el objeto con carga negativa a las hojas y viendo si éstas son atraídas por el objeto.
21. a)
23. Aunque la fuerza eléctrica es fundamentalmente mucho más intensa que la fuerza gravitacional, tanto la Tierra, como nuestros cuerpos y otros objetos son eléctricamente neutros, así que no hay fuerzas eléctricas notorias.
25. 9
27. a) 1 b) $1/4$ c) $1/2$
29. a) $5.8 \times 10^{-11} \text{ N}$ b) cero
31. 2.24 m
33. a) 50 cm b) 50 cm
35. a) $x = 0.25 \text{ m}$ b) en ningún lado
- c) $x = -0.94 \text{ m}$ para $\pm q_3$
37. a) $8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$ b) $2.2 \times 10^6 \text{ m/s}$
- c) $9.2 \times 10^{21} \text{ g}$
39. a) 96 N, 39° por debajo del eje x positivo
- b) 61 N, 84° por encima del eje x negativo
41. c)
43. a)
45. Se determina mediante la densidad relativa o la separación de las líneas de campo. Cuanto más cercanas estén las líneas, mayor es la magnitud.
47. Si una carga positiva está en el centro de una estructura esférica, el campo eléctrico adentro *no* es cero. Las líneas de campo corren en forma radial hacia fuera a la superficie interior de la estructura, donde se detienen en las cargas negativas inducidas en la superficie. Las líneas de campo reaparecen en la superficie externa de la estructura (con carga posi-

va) y continúan en forma radial hacia fuera como si emanaran de la carga puntual en el centro. Si la carga fuera negativa, las líneas de campo invertirían sus direcciones.

49. a) Sí, es posible. Por ejemplo, cuando los campos eléctricos que generan dos cargas son iguales en magnitud y contrarias en dirección en algunos lugares. En el punto medio a lo largo de la línea que une dos cargas del mismo tipo y magnitud, el campo eléctrico es cero. b) No, no es posible.

51. $2.0 \times 10^5 \text{ N/C}$
53. a) $1.2 \times 10^{-7} \text{ m}$ de la carga
55. $1.0 \times 10^{-7} \text{ N/C}$ hacia arriba
- $5.6 \times 10^{-11} \text{ N/C}$ hacia abajo
57. $\vec{E} = (2.2 \times 10^5 \text{ N/C})\hat{x} + (-4.1 \times 10^5 \text{ N/C})\hat{y}$
59. $5.4 \times 10^6 \text{ N/C}$ hacia la carga de $-4.0 \mu\text{C}$
61. $3.8 \times 10^7 \text{ N/C}$ en la dirección $+y$
63. $15 \mu\text{C/m}^2$
65. $\vec{E} = (-4.4 \times 10^6 \text{ N/C})\hat{x} + (7.3 \times 10^7 \text{ N/C})\hat{y}$
67. b)
69. b)
71. La superficie debe ser esférica.
73. a) (1) negativa a causa de la inducción
- b) cero c) $+Q$ d) $-Q$ e) $+Q$
75. a) cero b) kQ/r^2 c) cero d) kQ/r^2
- 77.



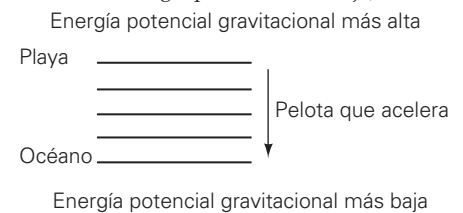
79. c)
81. Como el número de líneas es proporcional a la carga, las cargas netas son iguales pero con signo contrario.
83. -6 líneas, o un número neto de 6 líneas que pasan a través de ella
85. 10 líneas de campo entrando (negativo)
87. a) la inferior b) $4.90 \times 10^{-4} \text{ kg}$
89. a) positiva en la placa derecha y negativa en la placa izquierda b) de derecha a izquierda
- c) $1.13 \times 10^{-13} \text{ C}$
91. $5.5 \times 10^3 \text{ N/C}$ a 66° por debajo del eje positivo x
93. a) $2.02 \times 10^4 \text{ N/C}$ b) $1.79 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$

Capítulo 2

1. d)
3. b)
5. a) La energía cinética del protón que se acerca disminuye conforme su energía potencial eléctrica aumenta, puesto que su energía total es constante. b) La energía potencial eléctrica del sistema aumenta porque la distancia entre las cargas disminuye. c) La energía total del sistema permanece igual a causa de la conservación de la energía.
7. Se moverá hacia la derecha o hacia la región de mayor potencial porque el electrón tiene carga negativa. Cuanto más elevado es el potencial de la región, para el electrón, menor es la energía potencial.

9. Requiere de cero trabajo. Puesto que $W = q_0 \Delta V$, si $\Delta V = 0$, $W = 0$.

11. a) $2.7 \mu\text{C}$ b) de la negativa a la positiva
13. $1.6 \times 10^{-15} \text{ J}$
15. a) $5.9 \times 10^5 \text{ m/s}$, hacia abajo b) pierde energía potencial
17. a) (2) 3, porque el potencial eléctrico es inversamente proporcional a la distancia. b) 0.90 m c) -6.7 kV
19. a) gana $6.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ b) pierde $6.2 \times 10^{-19} \text{ J}$
- c) gana $4.8 \times 10^{-19} \text{ J}$
21. 1.1 J
23. a) $+0.27 \text{ J}$ b) no
25. -0.72 J
27. a) $3.1 \times 10^5 \text{ V}$ b) $2.1 \times 10^5 \text{ V}$
29. a) (3) menor, porque los electrones tienen carga negativa. Se mueven hacia las regiones de potencial más alto, donde tienen energía potencial más baja. b) $4.2 \times 10^7 \text{ m/s}$ c) $6.0 \times 10^{-9} \text{ s}$
31. b)
33. La pelota aceleraría en la dirección que va de la playa al océano (de energía potencial más alta a energía potencial más baja).



35. Requiere de cero trabajo, porque no hay cambio en la energía cinética o potencial. El trabajo neto es cero.
37. a) cilíndrica b) cerca de la superficie externa c) cerca de la superficie interna
39. a) $1.60 \times 10^{-13} \text{ J}$ b) se duplicaría
41. 12.6 m
43. 70 cm
45. a 1.7 mm de la placa positiva, hacia la placa negativa
47. a) (1) esferas concéntricas, porque el potencial eléctrico depende sólo de la distancia con respecto a la carga. b) $+298 \text{ eV}$
49. a) $2.0 \times 10^7 \text{ eV}$ b) $2.0 \times 10^4 \text{ keV}$ c) 20 MeV d) $2.0 \times 10^{-2} \text{ GeV}$ e) $3.2 \times 10^{-12} \text{ J}$
51. $6.2 \times 10^7 \text{ m/s}$ (protón) $4.4 \times 10^7 \text{ m/s}$ (alfa)
53. a) 3.5 V, $1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ b) 4.1 kV, $3.8 \times 10^7 \text{ m/s}$ c) 5.0 kV, $4.2 \times 10^7 \text{ m/s}$
55. a) $+0.40 \text{ V}$ b) -0.40 V c) cero
57. c)
59. a)
61. b)
63. a) Como $Q = CV$, se duplica. b) Como $U_C = \frac{1}{2} CV^2$, se cuadruplica.
65. $2.4 \times 10^{-5} \text{ C}$
67. 0.71 mm
69. a) $4.2 \times 10^{-9} \text{ C}$ b) $2.5 \times 10^{-8} \text{ J}$

71. 2.2 V
 73. a) $2.2 \times 10^4 \text{ V/m}$ b) $1.1 \times 10^{-5} \text{ C}$
 c) $5.7 \times 10^{-4} \text{ J}$ d) $E = 6.7 \times 10^4 \text{ V/m}$, $\Delta Q = 0$, $\Delta U_C = -1.7 \times 10^{-3} \text{ J}$
 75. d)
 77. No es posible mantener un voltaje no cero en un conductor; las cargas se moverán del positivo al negativo inmediatamente, de manera que no se podrían almacenar.
 79. Cuando el suministro de potencia no está conectado, la carga permanece igual, pero la capacitancia aumenta una vez que se inserta el material dieléctrico. Por lo tanto, la diferencia de potencial disminuye ($V = Q/C$), al igual que el campo eléctrico ($E = V/d$). Cuando el suministro de potencia permanece conectado, la diferencia de potencial se conserva constante, al igual que el campo eléctrico
 81. $3.1 \times 10^{-9} \text{ C}$; $3.7 \times 10^{-8} \text{ J}$
 83. a) $\kappa = 2.4$ b) disminuyó
 c) $-6.3 \times 10^{-5} \text{ J}$
 85. b)
 87. b)
 89. Tienen la misma carga cuando tienen igual capacitancia.
 91. a) C/N b) NC c) 4C/N
 93. a) (1) más, porque la capacitancia equivalente es más alta y la energía almacenada (extraída) es proporcional a la capacitancia.
 b) $6.0 \mu\text{F}$
 95. a) (3) $Q/3$, porque $Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$. Además, $Q_1 = Q_2 = Q_3$ porque los condensadores tienen la misma capacitancia. Por consiguiente, cada condensador tiene sólo 1/3 de la carga total. b) $3.0 \mu\text{C}$ c) $9.0 \mu\text{C}$
 97. máx. $6.5 \mu\text{F}$; mín. $0.67 \mu\text{F}$
 99. C_1 : $2.4 \mu\text{C}$, 6.0 V ; C_2 : $2.4 \mu\text{C}$, 6.0 V ; C_3 : $1.2 \mu\text{C}$, 6.0 V ; C_4 : $3.6 \mu\text{C}$, 6.0 V
 101. a) $K_0 = 29.2 \text{ eV}$, $\Delta U_{\text{total}} = 75 \text{ eV}$, así que no puede b) a 30.6 cm de la superficie inferior
 103. a) $-1.7 \times 10^{-17} \text{ J}$ b) $6.9 \times 10^{23} \text{ m/s}^2$
 c) $-8.5 \times 10^{-18} \text{ J}$ d) $8.5 \times 10^{-18} \text{ J}$
 105. a) (1) estará a un potencial más alto, porque el electrón tiene carga negativa. Experimentará una fuerza hacia arriba si el potencial es mayor en la placa superior.
 b) $8.37 \times 10^{-13} \text{ V}$ c) cualquier lugar
 107. a) 2.9 pF b) 0.20 pC

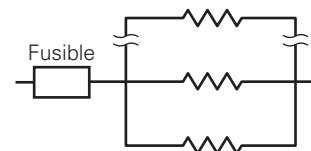
Capítulo 3

1. b)
 3. b)
 5. c)
 7. No. Cualquier batería tiene resistencia interna, y habrá un voltaje a través de la resistencia interna cuando la batería se utilice. El voltaje terminal es más bajo que la fem de la batería cuando está en uso.
 9. a) 4.5 V b) 1.5 V
 11. a) 24 V b) dos de 6.0 V en serie, juntas en paralelo con la de 12 V .
 13. a) (2) igual, porque el voltaje total de baterías idénticas en paralelo es igual al voltaje de cada batería individual, y el voltaje total de las baterías en serie es la suma de los voltajes de cada batería individual. Cada configura-

- ción tiene un paralelo y una serie, así que tienen el mismo voltaje total. b) 3.0 V , 3.0 V
 15. a)
 17. a) hacia arriba b) hacia abajo c) hacia arriba
 19. 0.25 A
 21. a) 0.30 C b) 0.90 J
 23. 56 s
 25. a) (2) a la izquierda, porque la corriente que se debe a los protones estará a la izquierda, y la corriente que se debe a los electrones también estará a la izquierda porque éstos tienen carga negativa. b) 3.3 A
 27. a)
 29. a)
 31. A partir de $V = (R)I$ ($y = mx$ es la ecuación para una línea recta donde m es la pendiente), concluimos que el que tiene la pendiente menos pronunciada es menos resistivo.
 33. a) igual b) un cuarto de la corriente
 35. a) 11.4 V b) 0.32Ω
 37. a) (1) un mayor diámetro, porque el aluminio tiene una mayor resistividad. Su área (diámetro) debe ser mayor, si la longitud del alambre es la misma, para tener igual resistencia que el cobre de acuerdo con $R = \rho L/A$.
 b) 1.29
 39. 1.0 V
 41. $1.3 \times 10^{-2} \Omega$
 43. a) 4 b) 4
 45. a) 0.13Ω b) 0.038Ω
 47. a) $4.6 \text{ m}\Omega$ b) 8.5 mA
 49. $5.4 \times 10^{-2} \text{ m}$
 51. a) (1) mayor, porque después del estiramiento, la longitud L aumenta y el área transversal A disminuye, así que R aumenta de acuerdo con $R = \rho L/A$. b) 1.6
 53. a) 7.8Ω b) 0.77 A c) 16.4°C
 55. d)
 57. d)
 59. Como $P = V^2/R$, la bombilla de mayor potencia tiene menor resistencia o filamento más grueso. Así que el filamento en la bombilla de 60 W sería más grueso.
 61. 144Ω
 63. $2.0 \times 10^3 \text{ W}$
 65. 1.2Ω
 67. a) (4) $1/4$, porque si el voltaje se reduce a la mitad, la corriente también. La potencia es igual al voltaje por la corriente, así que la potencia se vuelve $1/4$ de su valor original. b) 10 W .
 69. a) $4.3 \times 10^3 \text{ W}$ b) 13Ω
 71. a) 58Ω b) 86Ω
 73. a) 0.60 kWh b) $\$0.09$
 75. a) 0.15 A b) $1.4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ c) 2.3 W
 77. a) $1.1 \times 10^2 \text{ J}$ b) 6.8 J
 79. 21Ω
 81. $R_{120}/R_{60} = 4/3$
 83. $\$152$
 85. 117°C para el cobre o -72.6°C para el aluminio
 87. sí, R es una constante ($R + r = 6.00 \Omega$)
 89. aproximadamente la mitad (una planta de potencia entrega unos 1000 MW)
 91. $6.6 \times 10^{-6} \text{ m/s}$
 93. $1.6 \times 10^3 \Omega$
 95. a) 400 A b) $4.5 \times 10^{-3} \Omega$ c) 1.8 V
 d) 250 kV

Capítulo 4

1. b)
 3. b)
 5. a)
 7. No, no generalmente. Si embargo, si todos los resistores son iguales, los voltajes a través de ellos son iguales.
 9. Si están en serie, la resistencia efectiva estará más cercana en valor al de la resistencia grande porque $R_s = R_1 + R_2$. Si $R_1 \gg R_2$, entonces $R_s \approx R_1$. Si están en paralelo, la resistencia efectiva estará más cercana en valor al de la resistencia pequeña porque $R_p = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$. Si $R_1 \gg R_2$, entonces $R_p \approx R_1 R_2 / R_1 = R_2$.
 11. a) El tercer resistor tiene la mayor corriente, porque la corriente total a través de los otros dos resistores es igual a la corriente a través del tercer resistor. b) El tercer resistor también tiene el mayor voltaje, porque la corriente a través de él es la mayor y todos los resistores tienen el mismo valor de resistencia ($V = IR$). c) El tercer resistor también tiene la mayor salida de potencia, porque tiene el voltaje y la corriente mayores, y la potencia es igual al producto de la corriente y el voltaje.
 13. a) en serie, 60Ω b) en paralelo, 5.5Ω
 15. 30Ω
 17. a) 30Ω b) 0.30 A c) 1.4 W
 19. a) 0.57Ω b) 6.0 V c) 9.0 W
 21. a) (1) $R/4$. Cada segmento acortado tiene una resistencia de $R/2$ porque la resistencia es proporcional a la longitud (capítulo 3). Entonces, dos resistores $R/2$ en paralelo dan $R/4$. b) $3.0 \mu\Omega$
 23. a) 1.0 A b) 1.0 A c) 2.0 W , 4.0 W , 6.0 W
 d) $P_{\text{suma}} = P_{\text{total}} = 12 \text{ W}$
 25. 1.0 A (para todos); $V_{8.0} = 8.0 \text{ V}$; $V_{4.0} = 4.0 \text{ V}$
 27. 2.7Ω
 29. a)



- b) 31
 31. a) 1.0 A ; 0.50 A ; 0.50 A b) 20 V ; 10 V ; 10 V c) 30 W
 33. no, puesto que $I = 14.6 \text{ A} < 15 \text{ A}$
 35. $100 \text{ s} = 1.7 \text{ min}$
 37. a) 0.085 A b) 7.0 W , 2.6 W , 0.24 W , 0.41 W
 39. a) 0.67 A , 0.67 A , 1.0 A , 0.40 A , 0.40 A
 b) 6.7 V , 3.3 V , 10 V , 2.0 V , 8.0 V
 41. 8.1Ω
 43. a)
 45. d)
 47. No, no tiene que ser. Un ejemplo es el hecho de cargar una batería. Cuando una batería está conectada a un cargador (con una fuerza electromotriz más alta), la corriente es forzada a través de la batería.
 49. La bombilla de 60 W tiene una resistencia mayor que la bombilla de 100 W . Cuando éstas están en serie, tienen la misma corriente. Por consiguiente, la bombilla de 60 W tendrá

un mayor voltaje. Así que la bombilla de 60 W tiene más potencia porque $P = IV$.

51. Alrededor de la malla 1 (reversa), $-V_1 + I_3R_3 + V_2 + I_1R_1 = 0$. Si multiplicamos por -1 ambos lados, es lo mismo que la ecuación para la malla 1 (hacia delante). Alrededor de la malla 2 (reversa), $I_2R_2 - V_2 - I_3R_3 = 0$. De nuevo, si multiplicamos por -1 ambos lados, es lo mismo que la ecuación para la malla 2 (hacia delante).

53. $I_1 = 1.0$ A; $I_2 = I_3 = 0.50$ A

55. $I_1 = 0.33$ A (izquierda); $I_2 = 0.33$ A (derecha)

57. $I_1 = 3.75$ A (arriba); $I_2 = 1.25$ A (izquierda); $I_3 = 1.25$ A (derecha)

59. $I_1 = 0.664$ A (izquierda); $I_2 = 0.786$ A (derecha); $I_3 = 1.450$ A (arriba); $I_4 = 0.770$ A (abajo); $I_5 = 0.016$ A (abajo); $I_6 = 0.664$ A (derecha)

61. c)

63. b)

65. Tardará menos que una constante de tiempo porque esta última se define como el tiempo que se necesita para cargar el condensador al 63% de su carga máxima.

67. a) $V_C = 0$; $V_R = V_0$ b) $V_C = 0.86V_0$; $V_R = 0.14V_0$ c) $V_C = V_0$; $V_R = 0$

69. a) (1) aumenta la capacitancia, porque $\tau = RC$ b) 2.0 M Ω

71. a) 1.50 M Ω b) 11.4 V

73. a) 9.4×10^{-4} C b) $V_C = 24$ V; $V_R = 0$

75. a) 2.0×10^{-3} A a $t = 0$ b) 0.080%

c) 1.7×10^{-6} C un tiempo muy largo después de la conexión d) 99.9%

77. b)

79. a) Un amperímetro tiene muy baja resistencia, así que si se conectara en paralelo en un circuito, la corriente del circuito sería muy alta y el galvanómetro podría quemarse. b) Un voltímetro tiene muy alta resistencia, así que si se conectara en serie en un circuito, leería el voltaje de la fuente porque tiene la resistencia más alta (muy probablemente) y, por lo tanto, la mayor parte del voltaje se caería entre los elementos del circuito.

81. Un amperímetro se utiliza para medir la corriente cuando se conecta en serie a un elemento de circuito. Si tiene muy poca resistencia, habrá escaso voltaje a través de él, así que no afectará el voltaje a través del elemento de circuito, ni su corriente.

83. a) (3) un resistor multiplicador, porque un galvanómetro no puede tener un gran voltaje a través de él, el gran voltaje tiene que estar a través de un resistor en serie (multiplicador). b) 7.4 k Ω

85. 50 k Ω

87. 0.20 mA

89. a) (1) cero, porque un amperímetro está conectado en serie con un elemento de circuito. Si su resistencia es cero, no afectará la corriente a través del elemento de circuito.

b) La medición de corriente I es la corriente a través de R , y la medición del voltaje es el voltaje total a través de R y R_a , así que V/I da la resistencia de la combinación en serie.

c) La medición de voltaje es $V = I(R + R_a)$, así que $R = V/I - R_a$.

d) Un amperímetro ideal tiene R_a cercana a 0, entonces $R = V/I$, esto es, la medición es "perfecta".

91. c)

93. No, un alto voltaje puede producir una elevada corriente dañina, incluso si la resistencia es alta, porque la corriente es provocada por el voltaje (diferencia de potencial).

95. Es más seguro saltar. Si usted sale del automóvil con un pie, habrá un alto voltaje entre sus pies. Si usted salta, el voltaje entre sus pies será cero porque éstos tendrán el mismo potencial todo el tiempo.

97. $I_1 = 2.6$ A (derecha); $I_2 = 1.7$ A (izquierda); $I_3 = 0.86$ A (abajo)

99. a) $I_1 = 1.0$ A; $I_2 = 0.40$ A; $I_3 = 0.20$ A;

$I_4 = 0.40$ A b) $P_1 = 100$ W; $P_2 = 4.0$ W;

$P_3 = 2.0$ W; $P_4 = 4.0$ W

101. 6.0 Ω

103. 10 m Ω , 2.0 m Ω y 1.0 m Ω

105. dos en paralelo entre sí y uno en serie con el otro resistor

107. a) 12.1 ms b) 1.21 k Ω c) 13.0 ms

Capítulo 5

1. a)

3. c)

5. Cerca del polo norte de un imán recto permanente, el polo norte de una brújula apuntará alejándose del imán de manera que las líneas de campo abandonen el polo norte. Cerca del polo sur de un imán recto permanente, el polo sur de una brújula apuntará hacia el imán de manera que la líneas de campo entren al polo sur.

7. a)

9. d)

11. No necesariamente, porque aún podría haber un campo magnético. Si el campo magnético y la velocidad de la partícula cargada forman un ángulo de 0 o de 180° , no habrá fuerza magnética porque $F = qvB \sin \theta$.

13. a) La mitad inferior tendría un campo magnético dirigido hacia la página y la mitad superior tendría un campo magnético dirigido hacia fuera de la página. b) Son iguales, puesto que la fuerza centrípeta no cambia la rapidez de la partícula.

15. 3.5×10^3 m/s

17. 2.0×10^{-14} T, a la izquierda, en dirección de la velocidad

19. a) 3.8×10^{-18} N b) 2.7×10^{-18} N c) cero d) cero

21. a) 8.6×10^{12} m/s², horizontal y sur

b) 8.6×10^{12} m/s², horizontal y norte

c) igual magnitud pero la dirección es horizontal y norte

23. b)

25. La fuerza magnética en el haz de electrones, que "imprime" imágenes, provoca la desviación de los electrones.

27. La fuerza eléctrica es $F_e = qE$ y la fuerza magnética es $F_B = qvB$. El propósito del selector de velocidad es para que la fuerza eléctrica iguale la fuerza magnética. Como $qE = qvB$, $v = E/B$, independiente de la carga.

29. a) 1.8×10^3 V b) igual voltaje, independiente de la carga

31. 5.3×10^{-4} T

33. a) 4.8×10^{-26} kg b) 2.4×10^{-18} J c) el trabajo es igual a cero

35. d)

37. b)

39. Se acorta porque las bobinas del resorte se atraen entre sí a causa de los campos magnéticos que se generan en ellas. (Conductores paralelos con corriente en la misma dirección se atraerán entre sí.)

41. Apretar el botón en ambos casos completa el circuito. La corriente en los alambres activa el electroimán, provocando que el badajo sea atraído y suene el timbre. Sin embargo, esto rompe el contacto de la armadura y abre el circuito. Sostener el botón provoca que esto se repita, y entonces el timbre suena continuamente. Para las campanillas, cuando se completa el circuito, el electroimán atrae el núcleo y comprime el resorte. La inercia hace que toque una barra de tono y la fuerza del resorte entonces envía el núcleo en la dirección opuesta para golpear la otra barra.

43. 1.2 N perpendicular al plano de \vec{B} e I .

45. 5.0×10^{-3} T de norte a sur

47. a) cero b) 4.0 N/m en $+z$ c) 4.0 N/m en $-y$ d) 4.0 N/m en $-z$ e) 4.0 N/m en $+y$

49. 0.40 N/m; $+z$

51. a) (1) de atracción b) 6.7×10^{-6} N/m

53. 0.53 N hacia el norte a un ángulo de 45° por encima de la horizontal

55. 2.7×10^{-5} N/m hacia el conductor 1

57. 7.5 N hacia arriba en el plano del papel

59. cero, sí

61. a)

63. b)

65. Porque $B = \mu_0 I / (2\pi d)$, se necesita duplicar la corriente e invertir la dirección.

67. Hay dos alambres que portan la corriente hacia dentro y hacia fuera de los aparatos. Estas dos corrientes tienen direcciones opuestas. Cuando los dos alambres están muy cerca entre sí, los campos magnéticos creados por las dos corrientes opuestas, en esencia, se anulan.

69. 3.8 A

71. 0.25 m

73. a) 2.0×10^{-5} T b) a 9.6 cm del conductor 1

75. ambos 2.9×10^{-6} T

77. 3.3×10^{-5} T

79. a 1.0×10^{-4} T, del observador

81. 4.0 A

83. a) 8.8×10^{-2} T b) a la derecha

85. $\sqrt{2} \mu_0 I / (\pi a)$ a 45° hacia el conductor izquierdo inferior

87. b)

89. La dirección del campo magnético se aleja de usted, de acuerdo con la regla de la mano derecha para fuentes (el electrón tiene carga negativa).

91. Es posible destruir o reducir el campo magnético de un imán permanente golpeándolo o calentándolo.

93. 12 T

95. b)

97. a)

99. Será el polo magnético norte. Ahora mismo, el polo cerca del polo norte geográfico de la Tierra es el polo magnético sur.
 101. 0.44 T
 103. a) $5.9 \times 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) $1.0 \times 10^{-14} \text{ J}$
 105. 0.682 V
 107. a) (2) hacia la página b) a 0.030 m del conductor izquierdo
 109. a) $3.74 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ b) 3.0×10^3

Capítulo 6

1. d)
 3. d)
 5. d)
 7. El sentido sería contrario al movimiento de las manecillas del reloj (en una vista de frente).
 9. No, no depende del flujo magnético. Depende de la tasa del cambio de flujo con el tiempo.
 11. Las ondas sonoras provocan que la resistencia del botón cambie como se describe. Esto da por resultado un cambio en la corriente, así que las ondas sonoras producen pulsos eléctricos. Estos pulsos viajan a través de las líneas telefónicas y al receptor. El receptor tiene una bobina que envuelve un imán, y los pulsos crean un campo magnético variable conforme pasan a través de la bobina, provocando que el diafragma vibre y, así, se producen ondas sonoras cuando el diafragma vibra en el aire.
 13. 42° o 138°
 15. $3.3 \times 10^{-2} \text{ T} \cdot \text{m}^2$
 17. $1.3 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}^2$
 19. 1.6 V
 21. 0.30 s
 23. a) (1) en sentido contrario al de las manecillas del reloj b) 0.35 V
 25. a) (1) en el ecuador, porque la velocidad de la varilla metálica es paralela al campo magnético en el ecuador. b) 0.50 mV en el polo, cero en el ecuador.
 27. a) 0.60 V b) 0 A
 29. 4.0 V
 31. a) $0.037 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ (superficie inclinada inferior); $0.034 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ (superficie inclinada superior) b) $-0.071 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ c) cero d) cero; esto significa que el flujo neto es igual a cero o que hay tanto flujo abandonando el bloque como entrando.
 33. c)
 35. El imán que se mueve a través de la bobina produce una corriente. Conforme el imán sube y baja en la bobina, inducirá una corriente en ésta para encender la bombilla. Sin embargo, el imán produce la corriente (ley de Faraday de la inducción) a expensas de su energía cinética y potencial. El movimiento del imán, por consiguiente, cesará.
 37. $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 = \text{sen } \omega t$, donde $\mathcal{E}_0 = NBA\omega$. (N es el número de vueltas, B es la intensidad del campo magnético y ω es la rapidez angular). Podría incrementarse N , B o ω .
 39. a) 0.057 V b) 0.57 V
 41. a) (2) dos, porque la dirección del voltaje inicial no se especificó, por lo tanto, hay dos posibles direcciones.

- b) $\pm 104 \text{ V}$
 43. a) 100 V b) 0 V
 45. 16 Hz
 47. a) menor que 44 A ($110 \text{ V}/2.50 \Omega = 44 \text{ A}$), por la contra fem inducida cuando el motor enciende. La contra fem disminuye el voltaje efectivo del motor, por lo tanto, la corriente es menor que 44 A. b) 4.00 A
 49. a) 216 V b) 160 A c) 8.1 Ω
 51. b)
 53. Sí, un transformador de subida puede utilizarse como un transformador de bajada. Sólo se necesita invertir las funciones de las bobinas primaria y secundaria, así que hay más vueltas en el lado de alto voltaje.
 55. a) 16 b) $5.0 \times 10^2 \text{ A}$
 57. 24:1
 59. a) 17.5 A b) 15.7 V
 61. a) (2) no ideal, porque $P_s < P_p$ (la potencia en la secundaria es menor que la de la primaria). b) 45%
 63. a) N_s/N_p es 1:20 b) $2.5 \times 10^{-2} \text{ A}$
 65. a) 128 kWh b) \$1840
 67. a) 1:2, 1:14, 1:30 b) 2.0, 14, 30 c) 833
 69. a) 53 W b) $N_p/N_s = 200$
 71. d)
 73. d)
 75. La radiación UV provoca quemaduras y puede traspasar las nubes. Se siente frío porque la radiación infrarroja (calor) es absorbida por las nubes (moléculas de agua).
 77. De acuerdo con $c = \lambda f$, la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales entre sí. Por lo tanto, las frecuencias de radar son mucho más altas, porque las longitudes de onda son mucho más cortas, las rapideces son iguales.
 79. 326 m y 234 m
 81. 2.6 s
 83. AM: 67 m; FM: 0.77 m
 85. a) (1) arriba, de acuerdo con la ley de Lenz. b) 25 mA
 87. a) no, la potencia de entrada es mayor que la potencia de salida b) 90.9%
 89. a) (1) en sentido de las manecillas del reloj b) $5.00 \times 10^{-3} \text{ V}$ c) 0.0879 s
 91. 3.79 m, no
 93. 0.159 Ω

Capítulo 7

1. c)
 3. d)
 5. Esto es reflexión irregular o difusa, porque el papel es microscópicamente rugoso.
 7. 70°
 9. a) (2) $90^\circ - \alpha$, porque $\theta_i = \theta_r$ y $\alpha + \theta_i = 90^\circ$, $\theta_r = \theta_i = 90^\circ - \alpha$ b) 47°
 11. a) (3) $\tan^{-1}(w/d)$ b) 27°
 13. Cuando el espejo gira a través de un ángulo de θ , la normal girará a través de un ángulo de θ y el ángulo de incidencia será $35^\circ + \theta$. El ángulo de reflexión también es $35^\circ + \theta$. Como el ángulo de reflexión original es de 35° , el rayo reflejado girará a través de un ángulo de 2θ . Si el espejo gira en dirección opuesta, el ángulo de reflexión será $35^\circ - \theta$. Si embargo, la normal

girará de nuevo a través de un ángulo θ , pero también en dirección contraria. Por lo tanto, el rayo reflejado aún gira a través de un ángulo de 2θ .

15. 90° , cualquier θ_i
 17. d)
 19. Es porque la rapidez de la luz depende del medio. Por ejemplo, la rapidez de la luz es diferente en el aire que en el agua. A causa de la diferencia de rapidez, la luz cambia de dirección cuando entra en un medio diferente a un ángulo de incidencia diferente de cero.
 21. Esta imagen cortada se debe a que el ángulo de refracción es diferente para la interfase aire-vidrio que para la interfase agua-vidrio. La porción superior refracta del aire al vidrio, y la porción inferior refracta del agua al vidrio. Esto es distinto de lo que sucede en la figura 7.13b, en la que se observa la parte superior en aire directamente y la porción inferior en agua a través de la refracción del agua al aire. El ángulo de refracción provoca que el lápiz parezca doblado.
 23. El rayo láser tiene una mejor oportunidad de tocar al pez. Este último aparece al pescador en un lugar diferente de su verdadera ubicación a causa de la refracción. El rayo láser obedece la misma ley de refracción y vuelve sobre la luz que el pescador ve del pez. La flecha se dirige al agua en una trayectoria casi recta y, por ende, pasa por encima del pez.
 25. a) (1) mayor, porque su índice de refracción es menor. b) 1.26
 27. a) (1) mayor, porque el agua tiene un menor índice de refracción. b) 17°
 29. a) (2) de un diamante al aire, porque el diamante tiene un índice de refracción más elevado. b) 24.4°
 31. 47°
 33. $6.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, $2.8 \times 10^{-7} \text{ m}$
 35. a) (3) menor, porque su índice de refracción es más alto. b) 15/16
 37. a) Esto se debe a la refracción de la luz en la interfase agua-aire. El ángulo de refracción en el aire es mayor que el ángulo de incidencia en el agua, así que el objeto inmerso en agua aparece más cercano a la superficie.
 39. 75.2%
 41. a) (3) menor, porque es igual a $90^\circ - \theta_1$. $\theta_1 > 45^\circ = \theta_2$ y $n_1 < n_2$. b) 20°
 43. podrá ver el de 40° , pero no el de 50° , $\theta_c = 49^\circ$
 45. a) sí, $\theta_c = 32^\circ < 45^\circ$ b) no, $\theta_c = 46^\circ > 45^\circ$
 47. Podemos medir los ángulos de incidencia y refracción a partir de la fotografía y calcular el índice de refracción del fluido de acuerdo con la ley de refracción. Es aproximadamente 1.3.
 49. 1.64
 51. a) (3) reflexión interna total b) $\theta_c = 39^\circ < 45^\circ$, no c) $\theta_c = 56^\circ < 71^\circ$, aún no se trasmite
 53. 2.0 m
 55. a) 12.5° b) 26.2°
 57. b)
 59. En un prisma, hay dos refracciones y dos dispersiones porque ambas refracciones provocan que la luz refractada se doble hacia aba-

jo, por consiguiente, se duplica el efecto o dispersión.

61. Para ver un arco iris, la luz tiene que estar detrás de usted. En realidad, no verá un arco iris primario si el ángulo del Sol por encima del horizonte es mayor de 42° . Por consiguiente, no podrá ver hacia arriba para encontrar un arco iris, así que no podrá caminar por debajo de uno.

63. a) Por lo general, $\theta \approx 0^\circ$, de manera que no hay dispersión porque el ángulo de refracción para todos los colores también es cero. b) Se explicó en a). Con $\theta \approx 0^\circ$, la luz de cualquier longitud de onda no experimentará refracción. (No, en realidad, las rapideces son diferentes.)

65. 1.498

67. a) 21.7° b) 0.22° c) 0.37°

69. a) 49° b) 1.5 c) 1 d) 42°

71. a) (1) más, porque la luz roja tendrá un menor índice de refracción y, por lo tanto, una mayor rapidez que la luz azul. b) 1.3 mm

73. 1.41 a 2.00

Capítulo 8

1. b)

3. c)

5. Durante el día, la reflexión se realiza principalmente en la superficie posterior plateada. Durante la noche, cuando el espejo está en la posición correspondiente, la reflexión proviene del lado frontal. Así que hay una reducción de intensidad y resplandor porque el lado frontal refleja sólo el 5% de la luz, que es más que suficiente para ver en el fondo oscuro.

7. Cuando un conductor lo ve a través del espejo retrovisor, la propiedad de inversión derecha-izquierda de la imagen que forma un espejo plano le permitirá leer "AMBU-LANCIA".

9. a) 4.0 m b) derecha, virtual y del mismo tamaño

11. 5.0 m

13. a) 1.5 m detrás del espejo b) 1.0 m/s

15. a) Usted ve múltiples imágenes por las reflexiones de los dos espejos. b) 3.0 m detrás del espejo norte, 11 m detrás del espejo sur, 5.0 m detrás del espejo sur, 13 m detrás del espejo norte

17. Los dos triángulos (con d_o y d_i como base, respectivamente) son similares entre sí porque los tres ángulos de cada uno son iguales que los del otro por la ley de la reflexión. Además, los dos triángulos comparten la misma altura, el lado vertical común. Por consiguiente, los dos triángulos son idénticos. Por eso, $d_o = d_i$.

19. d)

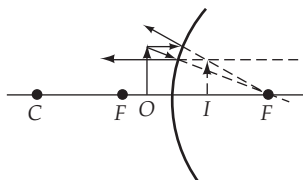
21. a)

23. a) Una cuchara puede comportarse como un espejo cóncavo o convexo dependiendo de qué lado se utilice para reflejar. Si se utiliza el lado cóncavo, normalmente se observa una imagen invertida. Si se utiliza el lado convexo, siempre se ve una imagen derecha. b) En teoría, la respuesta es sí. Si usted está muy cerca (dentro del foco), la cuchara en el lado cóncavo

producirá una imagen derecha. Sin embargo, sería difícil para usted ver la imagen en la práctica, porque sus ojos tendrían que estar muy cerca de la imagen. Los ojos no pueden ver objetos que están más cerca que el punto cercano (capítulo 10).

25. La imagen de un objeto lejano (en el infinito) se forma en una pantalla en el plano focal. La distancia del vértice del espejo al plano es la distancia focal. No sucede lo mismo con un espejo convexo porque la imagen es virtual y no puede formarse en una pantalla.

27. a) A partir del diagrama de rayos se ve que la imagen es virtual, derecha y reducida.



b) $d_i = -20$ cm; $h_i = +0.67h_o$

29. $d_i = -30$ cm; $h_i = 9.0$ cm; la imagen es virtual, derecha y ampliada

31. De acuerdo con la ecuación del espejo, $1/(2f) + 1/d_i = 1/f$. Entonces,

$$1/d_i = 1/f - 1/(2f) = 1/(2f), \text{ o } d_i = 2f.$$

$M = -d_i/d_o = -(2f)/(2f) = -1$. Por consiguiente, la imagen es invertida ($M < 0$), y del mismo tamaño que el objeto ($|M| = 1$).

33. a) convexo, porque un espejo cóncavo sólo forma imágenes virtuales ampliadas.

b) 14 cm

35. a) cóncavo, porque sólo un espejo cóncavo forma imágenes ampliadas.

b) 13.3 cm

37. f es negativa para un espejo convexo.

Así que

$$d_i = d_o f / (d_o - f) = d_o (-|f|) / (d_o + |f|) < 0.$$

Además

$$M = -d_i/d_o = -d_o(-|f|) / [d_o(d_o + |f|)]$$

$= |f| / (d_o + |f|) < +1$. Por lo tanto, la imagen es virtual (negativa d_i), derecha (M positiva) y reducida ($|M| < 1$)

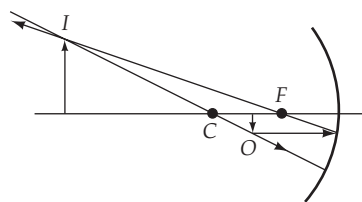
39. a) cóncavo, porque sólo un espejo cóncavo forma imágenes reales (en una pantalla).

b) 24 cm

41. a) virtual y derecha b) 1.5 m

43. 2.3 cm

45. a)



b) $d_i = 60$ cm, $M = -3.0$, real e invertida

47. 10 m

49. a) Superficie frontal: 60 cm, real, invertida y ampliada; superficie posterior: 46.7 cm,

real, invertida y ampliada b) no, la imagen del cubo ya no es más la de un cubo porque diferentes partes de la figura tienen distintas ampliaciones.

51. a) dos, uno para la imagen real y otro para la imagen virtual. b) 5.0 cm, 15 cm

53. Sí, es posible. Una es una imagen real y la otra virtual. 13 cm; 27 cm

55. d)

57. Cuando el pez está dentro del foco, la imagen es derecha, virtual y ampliada.

59. Es posible ubicar la imagen de un objeto lejano. La distancia de la lente convergente a la imagen es la distancia focal. No, el mismo método no funciona para lentes divergentes porque una lente divergente no forma imágenes reales de objetos reales.

61. $d_i = 12.5$ cm; $M = -0.250$

63. 22 cm

65. a) $f = 5.9$ cm b) 67 cm, invertida

67. a) 18 cm b) 6.0 cm

69. 14 cm

71. 0.55 mm

73. a) 20 cm b) $M = -1.0$

75. a) $d = 4f$ b) se aproxima a 0

77. a) -18 cm b) -63 cm

79. 4.2 cm

81. 18 cm a la izquierda del ocular; imagen virtual

83. $M_1 = -h_{i1}/h_{o1}$, $M_2 = -h_{i2}/h_{o2}$, y $M = h_{i2}/h_{o1}$. Como $h_{o2} = h_{i1}$ (la imagen formada por la primera lente es el objeto para la segunda), $M_1 M_2 = (h_{i1}/h_{o1})(h_{i2}/h_{o2}) = h_{i2}/h_{o1} = M_{\text{total}}$.

85. b)

87. b)

89. Nuestros ojos están "diseñados" o se utilizan para ver objetos claramente cuando nuestro entorno está constituido por aire. Cuando se está bajo el agua, el índice de refracción del entorno (agua) cambia. De acuerdo con el ejercicio 8.80(a), la distancia focal de los ojos cambia, así que todo aparece borroso. Cuando se utilizan *goggles*, el entorno de los ojos de nuevo es aire, de manera que es posible ver los objetos con claridad.

91. a) sí, aumenta b) la lente divergente se vuelve convergente y viceversa

93. +4.0 D

95. -0.70 D

97. 85 cm

99. La imagen que forma la lente convergente está en el espejo. Esta imagen es el objeto para la lente divergente. Si el espejo está en el foco de la lente divergente, los rayos refractados después de la lente divergente serán paralelos al eje. Estos rayos se reflejarán en el espejo paralelos al eje y formarán otra imagen en el espejo. Esta segunda imagen ahora es el objeto para la lente convergente. Al invertir los rayos, una imagen definida se forma en la pantalla localizada donde está el objeto original. Por consiguiente, la distancia de la lente divergente al espejo es la distancia focal de la lente divergente.

101. 20 cm en el lado del objeto de la primera lente, invertida, $M_{\text{total}} = -1.0$

103. 60 cm a la derecha de la segunda lente; real y derecha, $M_{\text{total}} = 4.0$

Capítulo 9

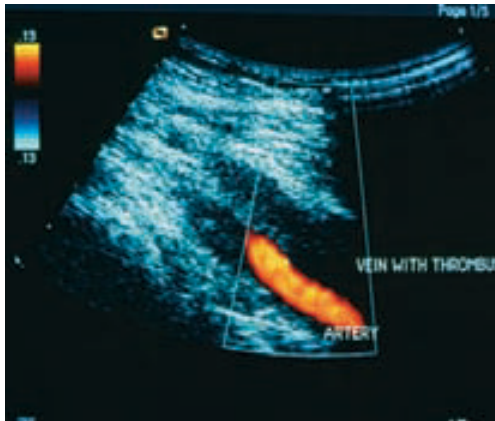
- 1. b)
- 3. b)
- 5. Como $\Delta y = L\lambda/d \propto \lambda$, la separación entre las franjas brillantes aumentaría si la longitud de onda se incrementa.
- 7. 3.4%
- 9. 0.37%
- 11. 489 nm
- 13. a) 440 nm b) 4.40 cm
- 15. a) (1) aumenta, porque $\Delta y = L\lambda/d \propto 1/d$, la distancia entre las franjas brillantes disminuiría si la distancia entre las rendijas aumentara. b) 1.9 mm c) 2.4 mm
- 17. a) $\lambda = 402$ nm, violeta b) 3.45 cm
- 19. 450 nm
- 21. a)
- 23. Las longitudes de onda que no son visibles en la luz reflejada son todas las longitudes de onda excepto el púrpura azulado.
- 25. Siempre es oscura por la interferencia destructiva que se debe al cambio de fase de 180° . Si no hubiera cambio de fase de 180° , el grosor cero correspondería a la interferencia constructiva.
- 27. a) 30λ b) destructivamente
- 29. 54.3 nm
- 31. a) (2) 600 nm, porque $t_{\min} = \lambda/(4n_1)$ o $t \propto \lambda$. b) 160 nm; 200 nm
- 33. a) 158.2 nm b) 316.4 nm
- 35. 1.51×10^{-6} m
- 37. a)
- 39. no, sí (apenas, a $\theta = 90^\circ$)
- 41. De acuerdo con $d \sin \theta = n\lambda$, la ventaja es una figura de difracción más ancha, conforme d es menor.
- 43. a) 5.4 cm b) 2.7 cm
- 45. a) 4.3 mm b) microonda
- 47. 1.24×10^3 líneas/cm
- 49. azul: $18.4^\circ, 39.2^\circ$; rojo, 30.7° , no es posible
- 51. a) 2.44×10^3 líneas/cm b) 11 (n de franjas brillantes es 5)
- 53. a) (1) azul, porque tiene una longitud de onda más corta. De acuerdo con $d \sin \theta = n\lambda$, podemos ver que cuanto menor es la longitud de onda, menor es $\sin \theta$ o θ . b) azul: 18.7° , rojo: 34.1°
- 55. De acuerdo con $d \sin \theta = n\lambda$, $\theta = \sin^{-1} n\lambda/d$. Para el violeta, $\theta_{3v} = \sin^{-1}(3)(400 \text{ nm})/d = \sin^{-1}(1200 \text{ nm})/d$. Para el amarillo-naranja, $\theta_{2y} = \sin^{-1}(2)(600 \text{ nm})/d = \sin^{-1}(1200 \text{ nm})/d$. Así que $\theta_{3v} = \theta_{2y}$, esto es, se traslapan.
- 57. d)
- 59. c)
- 61. a) dos veces b) cuatro veces c) ninguna d) seis veces
- 63. Los números aparecen y desaparecen conforme los lentes para sol giran porque la luz de los números en la calculadora es polarizada.
- 65. a) (1) también aumenta, porque $\tan \theta_p = n_2/n_1 = n_2(n_1 = 1)$. Si n_2 aumenta, también θ_p . b) $58^\circ, 61^\circ$
- 67. a) (2) disminuye, porque la intensidad de la luz transmitida depende de $\cos^2 \theta$. Conforme θ aumenta de 0 a 90° , $\cos \theta$ disminuye.

- 71. 57.2°
- 73. En el agua, $\theta_p = \tan^{-1}(n_2/n_1)$. El ángulo de incidencia en la interfase agua-vidrio debe ser $\theta_p = \tan^{-1}(1.52/1.33) = 48.8^\circ$. Para la interfase aire-agua, $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, así $\sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2/n_1 = (1.33) \sin 48.8^\circ > 1$. Como el máximo de $\sin \theta_1$ la respuesta es no.
- 75. c)
- 77. a) Esto se debe a la densidad variable de moléculas de aire. b) No hay aire en la superficie de la Luna, así que un astronauta vería el cielo negro.
- 79. no, porque $n_2 = 1$ (aire), $\tan \theta_p = n_2/n_1 = 1/n_1$. Para la reflexión total interna, $\sin \theta_c = n_2/n_1 = 1/n_1$. Esto significa que $\tan \theta = \sin \theta$. Eso no es posible para cualquier ángulo que no sea igual a cero. b) 29.8°
- 81. $\Delta y = 0.25\Delta y_0$
- 83. $n = 1$ para el rojo; $n = 2$ para el violeta

Capítulo 10

- 1. b)
- 3. a)
- 5. El destello rápido ocurre antes de que el obturador se abra y la película se exponga. La luz brillante hace que el iris se reduzca (lo que da una pupila pequeña), de manera que cuando el segundo destello se produce momentáneamente, no hay una abertura grande a través de la cual se produzca la reflexión del ojo rojo desde la retina.
- 7. a) El ojo es miope porque el punto lejano no está en el infinito. b) El ojo es hipermetrope porque el punto cercano no está a 25 cm.
- c) a, divergente; para b, convergente
- 9. a) +5.0 D b) -2.0 D
- 11. a) (1) convergente, porque la persona es hipermetrope. b) +2.0 D
- 13. divergente, -0.500 D
- 15. a) se los tendrá que quitar b) +3.0 D
- 17. a) (1) convergentes, porque es hipermetrope. b) +3.3 D
- 19. a) -0.505 D b) -0.500 D
- 21. 6.7 m
- 23. a) -0.67 D b) sí, 21, cm c) entre 30 y 40 años
- 25. derecho: +1.42 D, -0.46 D; izquierdo: +2.16 D, -0.46 D
- 27. d)
- 29. El objeto debería estar dentro de la distancia focal. Cuando se encuentra dentro de esta última, la imagen es virtual, derecha y ampliada.
- 31. a) $2.3 \times b$) $2.5 \times$
- 33. $2.5 \times$
- 35. a) (1) de alta potencia, porque una lente de alta potencia tiene distancia focal corta y la ampliación es $1 + (25 \text{ cm})/f$. b) $1.9 \times$ y $1.6 \times$
- 37. -375×
- 39. a) (2) La de menor distancia focal, porque el aumento total es inversamente proporcional a la distancia focal del objetivo. b) -280× y -360×
- 41. a) -340× b) 3900%
- 43. 25×

- 45. a) máximo: 1.6 mm/10×; mínimo: 16 mm/5× b) $M_{\max} = -930 \times$; $M_{\min} = -42 \times$
- 47. b)
- 49. No, se seguiría viendo la estrella completa. La obstrucción reduciría la intensidad o brillantez de la imagen.
- 51. La que tiene menor distancia focal debería usarse como el ocular para un telescopio. El aumento del telescopio es inversamente proporcional a la distancia focal del ocular ($m = -f_o/f_e$).
- 53. a) $-4.0 \times b$) 75 cm
- 55. 1.00 m y 2.0 cm
- 57. 5.0 cm
- 59. a) 60.0 cm y 80.0 cm; 40.0 cm y 90.0 cm b) $-75 \times$; $-44 \times$
- 61. a)
- 63. El ángulo mínimo de resolución más pequeño corresponde a la mayor resolución porque un ángulo de resolución más pequeño significa que es posible resolver más detalles.
- 65. Desde el punto de vista de la resolución, la cámara (lente) más pequeña tiene resolución más baja. Cuanto más pequeña es la lente, mayor es el ángulo mínimo de resolución, y menor el poder de resolución.
- 67. 550 nm
- 69. 1.32×10^{-7} rad; θ_{\min} de Hale es 1.6 veces más grande
- 71. a) (3) azul, porque el ángulo mínimo de resolución es proporcional a la longitud de onda y el azul tiene la longitud de onda más corta. b) 9.6×10^{-5} rad y 1.1×10^{-4} rad
- 73. 17 km
- 75. 4.1×10^{16} km
- 77. a) 5.55×10^{-5} rad b) azul c) 33.3%
- 79. d)
- 81. Con luz roja, el rojo y el blanco aparecen como rojo; el azul parece negro. Con luz verde, sólo el blanco aparece como verde; tanto el rojo como el azul parecen negro. Con luz azul, el rojo aparece como negro; el blanco y el azul aparecen como azul.
- 83. El líquido es oscuro o coloreado porque absorbe toda la luz, excepto ese color. La cantidad de luz que absorbe un objeto siempre depende de cuánto material absorbe la luz. La espuma tiene una densidad de material muy baja y sólo absorbe muy poca luz, o casi toda la luz se refleja; por eso, la espuma generalmente es blanca.
- 85. De acuerdo con la ecuación de lentes delgadas: $d_o = d_i f / (d_i - f)$, se tiene $d_i/d_o = (d_i - f)/f = [-(D - d) - f]/f$. Por medio de la aproximación de ángulo pequeño: $m = \theta_i/\theta_o = (y_i/D)/[y_o/(25 \text{ cm})] = (y_i/y_o) \times [(25 \text{ cm})/D]$. Mediante triángulos similares: $y_i/y_o = -d_i/d_o$, el signo negativo se introduce porque d_i es negativa (imagen virtual). Así que $m = \{[(D - d) + f]/f\} \times [(25 \text{ cm})/D] = (25/f) \times (1 - d/D) + 25/D$.
- 87. a) (1) B, (2) A b) $-110 \times$, 8.95×10^{-7} rad
- 89. a) 6.3 y 0.25 b) 1/120 s



a)



b)

FIGURA 1 a) Flujo sanguíneo y obstrucciones Este escaneo ultrasónico Doppler muestra trombosis venosa profunda en la pierna de un paciente. El coágulo que bloquea la vena está en el área oscura a la derecha. El flujo sanguíneo en una arteria adyacente es más lento debido al coágulo. En casos extremos el coágulo puede desprenderse y llegar a los pulmones, donde puede bloquear una arteria y provocar una embolia pulmonar potencialmente mortal (obstrucción de los vasos sanguíneos). **b) Electrocardiograma** Este procedimiento ultrasónico puede mostrar los latidos del corazón, ventrículos y aurículas, válvulas y el flujo sanguíneo conforme la sangre entra y sale del órgano.



FIGURA 3.14 Todo iluminado Una imagen nocturna del Continente Americano tomada desde un satélite. ¿Podría identificar los principales centros de población en Estados Unidos y en otros países? Las manchas en el centro de Sudamérica indican incendios forestales. La pequeña mancha al sur de México representa las llamas del gas ardiendo en los sitios de producción de petróleo. En el extremo superior derecho de la imagen alcanzan a verse las luces de algunas ciudades europeas. La imagen fue registrada por un sistema de infrarrojo visible.

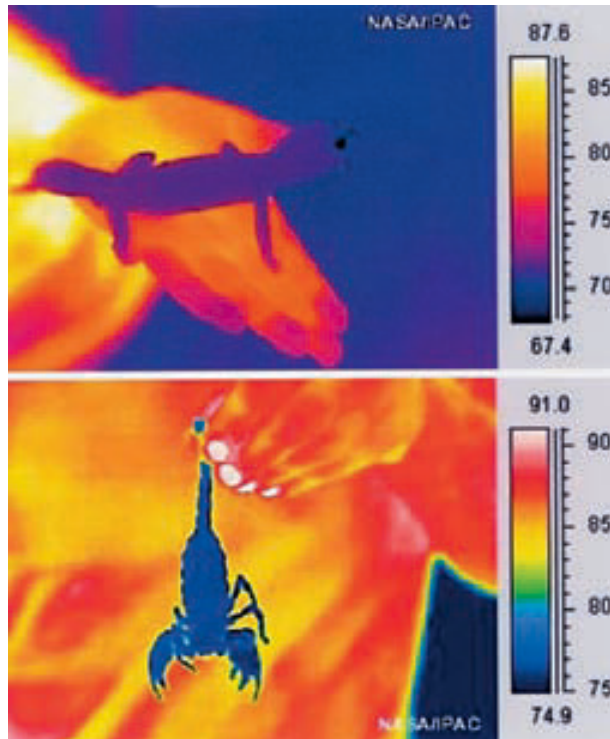


FIGURA 1 Animales de sangre caliente y de sangre fría Las imágenes infrarrojas muestran que las criaturas de sangre fría adoptan la temperatura de su entorno. Tanto la lagartija como el escorpión tienen la misma temperatura (color) que el aire que los rodea. Note la diferencia entre estos animales de sangre fría y los humanos de sangre caliente que los sostienen.

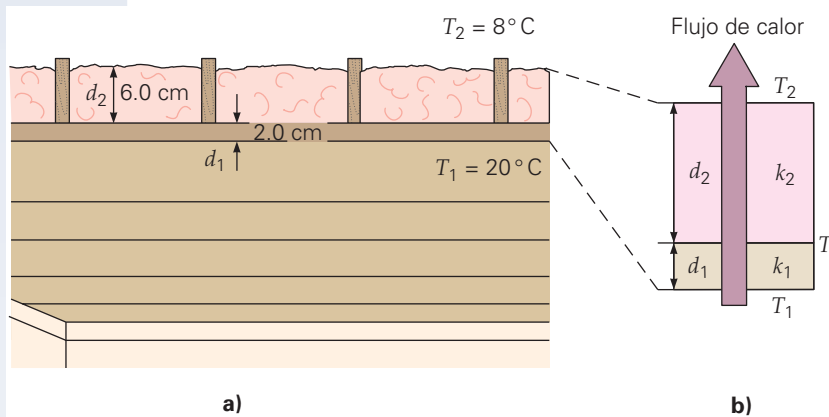
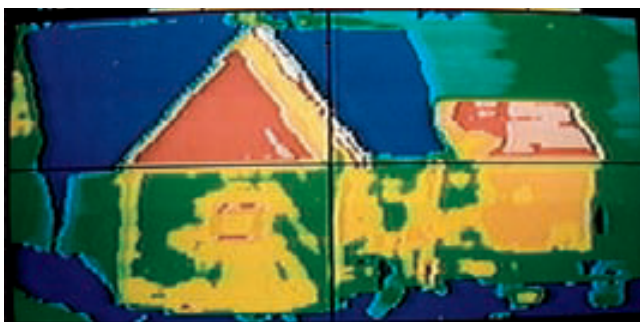


FIGURA 9.9 DE FÍSICA 11 Aislantes y conductividad térmica *a), b)* Los desvanes deben aislarse para evitar la pérdida de calor por conducción. Véase el ejemplo 9.7 de *Física 11* y la sección A fondo 9.2 (página 320 de *Física 11*): Física, la industria de la construcción y la conservación de la energía. *c)* Este termograma de una casa nos permite visualizar la pérdida de calor de la casa. El azul representa las áreas donde la tasa de fuga de calor es más baja; el blanco, el rosa y el rojo indican áreas con pérdidas de calor cada vez más alta. (Las áreas rojas tienen la mayor pérdida.) ¿Qué recomendaría al dueño de esta casa para ahorrar tanto dinero como energía? Compare esta figura con la figura 9.15 de *Física 11*.



c)



FIGURA 5.32 Aurora boreal: las luces del norte Esta imagen espectacular se debe a partículas solares energéticas que quedan atrapadas en el campo magnético terrestre. Las partículas excitan, o ionizan, los átomos del aire; cuando estos últimos dejan de estar excitados (o cuando se recombinan), emiten luz.

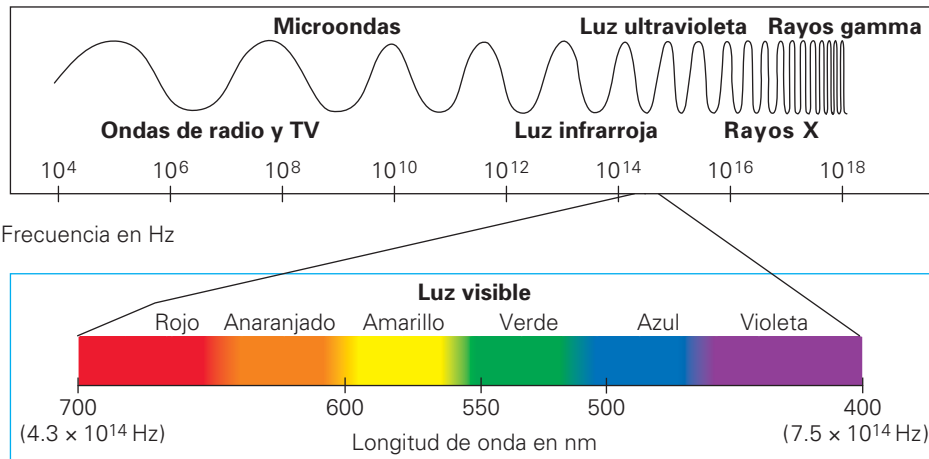


FIGURA 6.23 El espectro electromagnético El espectro de frecuencias o longitudes de onda se divide en regiones, o intervalos. Observe que la región de la luz visible es una parte muy pequeña del espectro electromagnético total. Para la luz visible, las longitudes de onda se expresan generalmente en nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). (Los tamaños relativos de las longitudes de onda que aparecen en la parte superior de la figura no están a escala.)



FIGURA 7.5 Reflexión especular (regular) *a)* Cuando un haz de luz se refleja en una superficie lisa y los rayos reflejados son paralelos, se dice que la reflexión es regular o especular. *b)* Reflexión regular o especular en una superficie de agua tranquila produce una imagen de espejo, casi perfecta, de las montañas de sal en esta salina australiana.

b) Fotografía de la reflexión regular o especular



b)

FIGURA 1 De difusa a especular a) El agua sobre la superficie del camino convierte la reflexión difusa, que había antes de la lluvia, en reflexión especular. b) Así, en lugar de ver el camino, el conductor sólo percibe las imágenes reflejadas de luces y edificios.

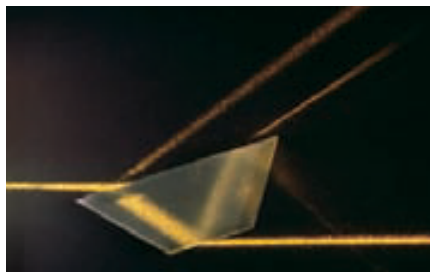
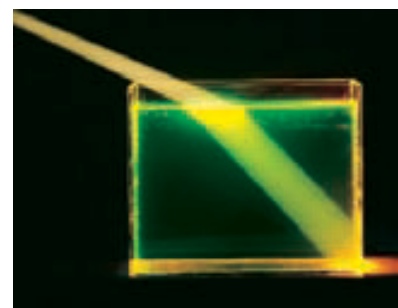


FIGURA 7.8 Reflexión y refracción Un rayo de luz incide en un prisma trapezoidal desde la izquierda. Una parte del haz se refleja y otra se refracta. El rayo refractado se refleja y se refracta parcialmente en la superficie inferior entre vidrio y aire.

FIGURA 7.9 La refracción a) La luz cambia de dirección al entrar en un medio diferente. b) El rayo reflejado se describe con el ángulo de refracción, θ_2 , medido a partir de la normal.



a)



a)

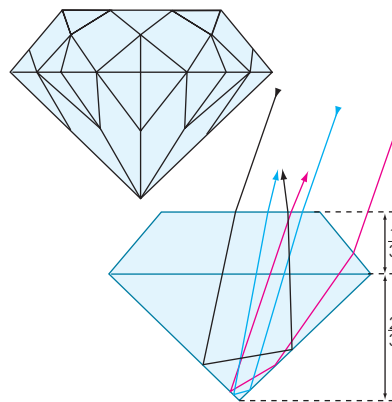
FIGURA 7.12 La refracción en acción *a)* Imagen invertida de un automóvil sobre una carretera “mojada”; es un espejismo. *b)* El espejismo se forma cuando la luz que procede del objeto se refracta en las capas de aire a distintas temperaturas, cerca de la superficie de la carretera.



FIGURA 7.17 Vista panorámica distorsionada Vista subacuática de la superficie de una alberca en Hawai.

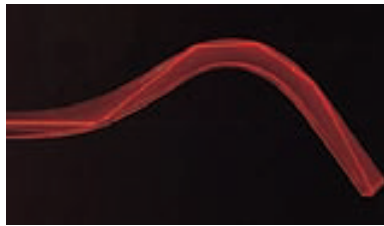


a)



b)

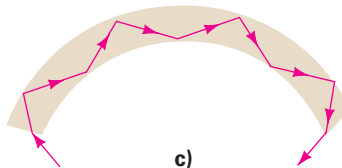
FIGURA 7.18 Brillantez del diamante *a)* La reflexión interna causa el brillo de un diamante. *b)* El “corte” (o las proporciones de altura de las facetas) es esencial. Si una piedra es demasiado plana o demasiado aguda, se perderá la luz, es decir, esta última se refractará y saldrá por las facetas inferiores.



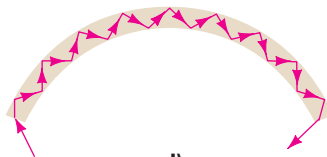
a)



b)



c)



d)

FIGURA 7.19 Tubos de luz

a) Reflexión interna total en una fibra óptica. b) Cuando incide la luz en el extremo de un cilindro de material transparente de tal forma que el ángulo interno de incidencia es mayor que el ángulo crítico del material, la luz experimenta la reflexión interna total a todo lo largo del tubo de luz. c) La luz también se transmite a lo largo de tubos de luz curvos, por reflexión interna total. d) Al disminuir el diámetro de la varilla o fibra, aumenta la cantidad de reflexiones por unidad de longitud.



a)

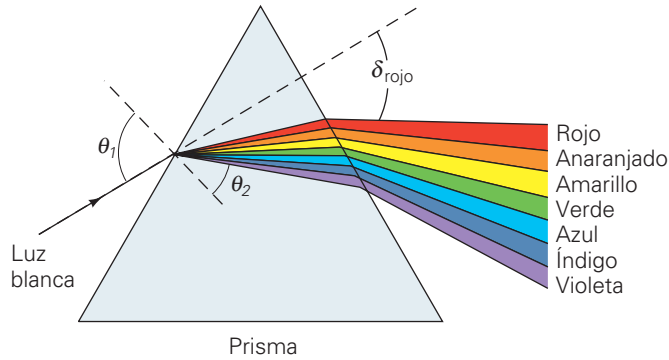


b)

FIGURA 7.20 Haz de fibras ópticas a) Cientos o hasta miles de fibras extremadamente delgadas se agrupan b) para formar un cable de fibra óptica, que aquí se ve con el color azul de un láser.

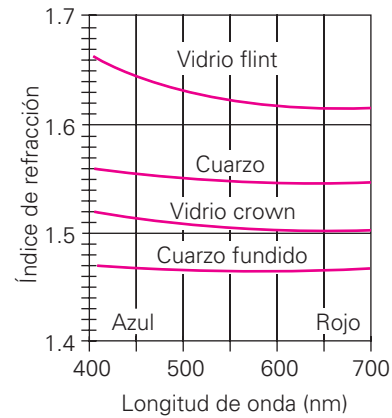


a)



b)

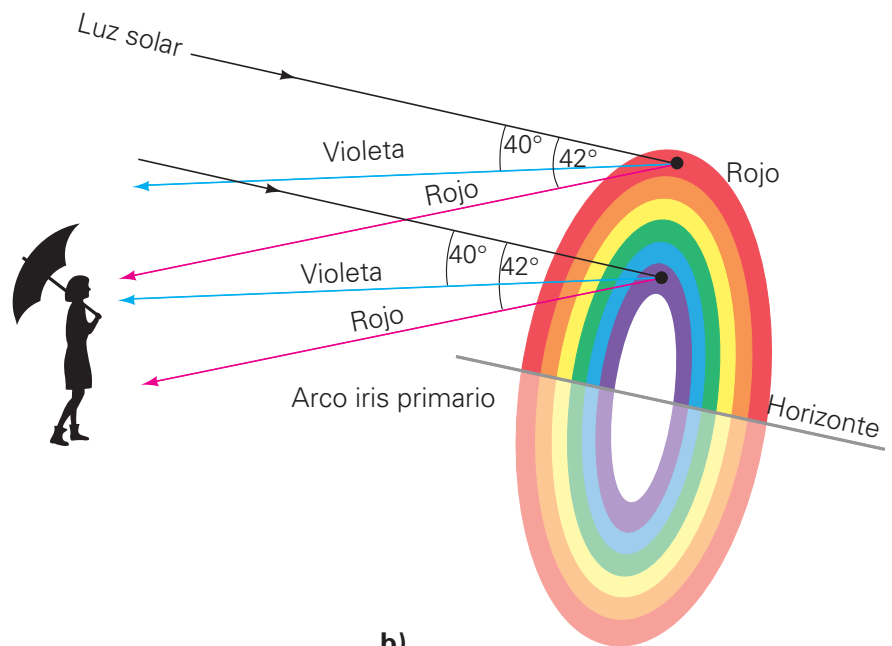
FIGURA 7.21 La dispersión a) La luz blanca se dispersa en los prismas de vidrio y forma un espectro de colores. b) En un medio dispersor, el índice de refracción varía un poco en función de la longitud de onda. La luz roja, cuya longitud de onda es la mayor, tiene el menor índice de refracción, y por eso se refracta menos. El ángulo entre el haz incidente y el haz emergente es el ángulo de desviación (δ) del rayo. (Aquí se exageran los ángulos, para obtener mayor claridad.) c) Variación del índice de refracción con la longitud de onda, para algunos de los medios transparentes más comunes.



c)



FIGURA 1 Arco iris Los colores del arco iris primario van verticalmente del rojo (exterior) al azul (interior).



b)

FIGURA 2 El arco iris Los arco iris se forman por refracción, dispersión y reflexión interna de la luz solar en las gotas de agua. *a)* La luz de distintos colores sale de la gota de agua en distintas direcciones. *b)* Un observador ve la luz roja en el exterior del arco y la violeta en el interior.





FIGURA 8.6 Espejo divergente

Si trazamos los rayos al revés en la figura 23.5b, veremos que un espejo esférico divergente (convexo) produce un mayor campo de visión; esto se aprecia con este espejo.

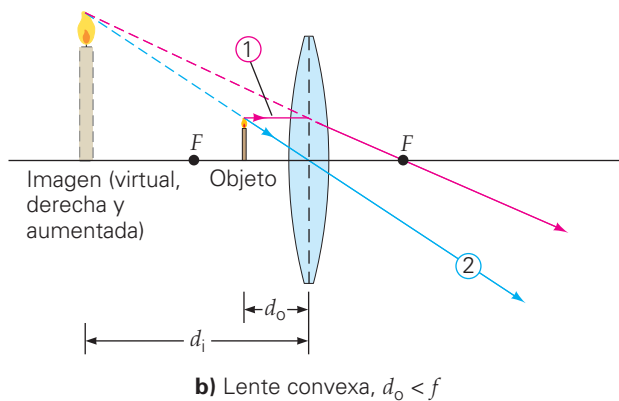
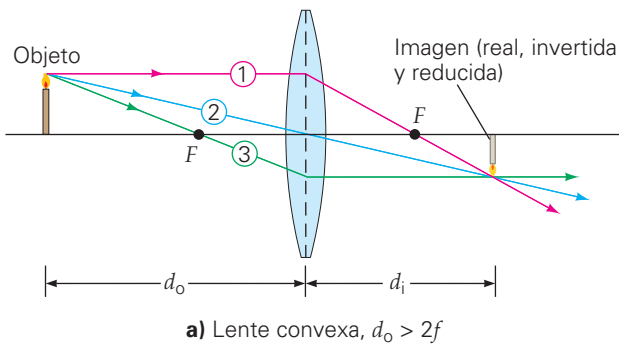
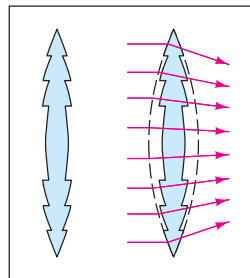


FIGURA 8.15 Diagramas de rayos para lentes a) Una lente convergente biconvexa forma un objeto real cuando $d_o > 2f$. La imagen es real, invertida y reducida. b) Diagrama de rayos para una lente divergente con $d_o < f$. La imagen es virtual, derecha y aumentada. Se muestran los ejemplos prácticos de ambos casos.



a)



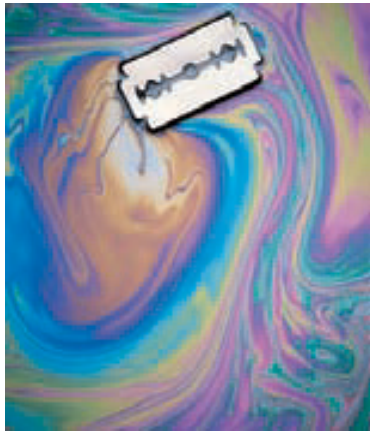
b)



c)

FIGURA 1 Lentes de Fresnel *a)* El efecto concentrador de estas lentes se debe a la refracción en sus superficies. Por consiguiente, es posible reducir el espesor de una lente cortando ranuras concéntricas en un vidrio, para formar un conjunto de superficies curvas con las mismas propiedades refringentes que las de la lente de la que se derivan. *b)* Una lente de Fresnel plana, con superficies curvas concéntricas, amplifica como si fuera una lente convergente biconvexa. *c)* Una serie de lentes de Fresnel produce haces luminosos enfocados en este faro del puerto de Boston. (De hecho, las lentes de Fresnel se desarrollaron para usarse en los faros.)





c)

FIGURA 9.6 Interferencia en una película delgada Para una película de aceite hay un desplazamiento de fase de 180° en la luz que se refleja en la interfase aire-aceite, y cambio de fase cero en la interfase aceite-agua. λ' es la longitud de onda en el aceite. *a)* La interferencia destructiva se presenta si la película de aceite tiene un espesor mínimo de $\lambda'/2$ para la incidencia normal. (Para tener mayor claridad, las ondas están desplazadas y en ángulo.) *b)* La interferencia constructiva se presenta con un espesor mínimo de película igual a $\lambda'/4$. *c)* Interferencia en la película delgada de una mancha de aceite. Los distintos espesores de la película originan reflexiones de distintos colores.

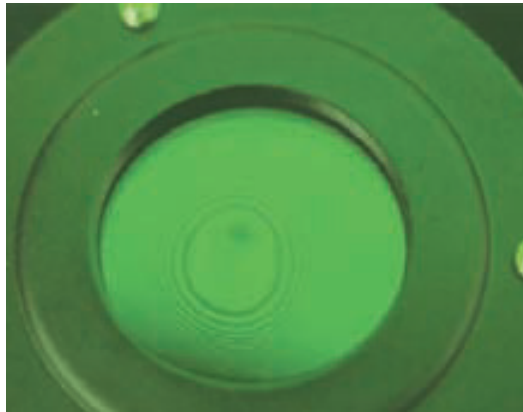


a)



b)

FIGURA 9.7 Interferencia en una película delgada *a)* Una película delgada de aire entre los portaobjetos produce figuras de colores. *b)* La interferencia en varias capas de las plumas del pavo real origina brillantes colores. Los llamativos colores en el pecho de los colibríes también se producen así.



b)

FIGURA 9.10 Anillos de Newton

a) Una lente colocada sobre un plano óptico forma una cuña de aire anular, que origina interferencia de las ondas reflejadas en la parte superior (onda 1) y la parte inferior (onda 2) de esa cuña. b) La figura de interferencia que resulta es un conjunto de anillos concéntricos, llamados *anillos de Newton*. Observe que en el centro de la figura hay una mancha oscura. Las irregularidades de la lente producen una figura distorsionada.



FIGURA 1 Lentes recubiertas El recubrimiento no reflectante de las lentes de binoculares y cámaras produce, en general, una tonalidad azul-púrpura. (¿Por qué?)

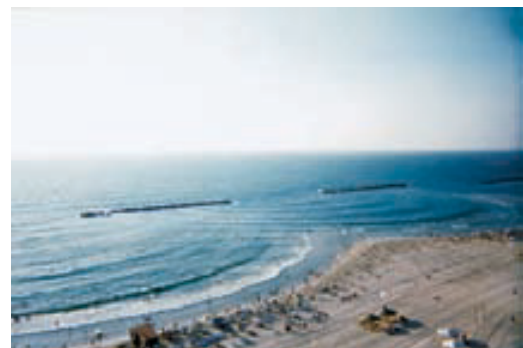


FIGURA 9.11 Refracción de las olas del mar Esta fotografía de una playa muestra con claridad la difracción de las olas del mar en una sola rendija, como la que hay en las aberturas de la barrera. Note que los frentes de onda circulares han moldeado la playa.



FIGURA 9.17 Efectos de la difracción Las ranuras angostas de los discos compactos (CD) actúan como rejillas de difracción y producen un despliegue de colores.

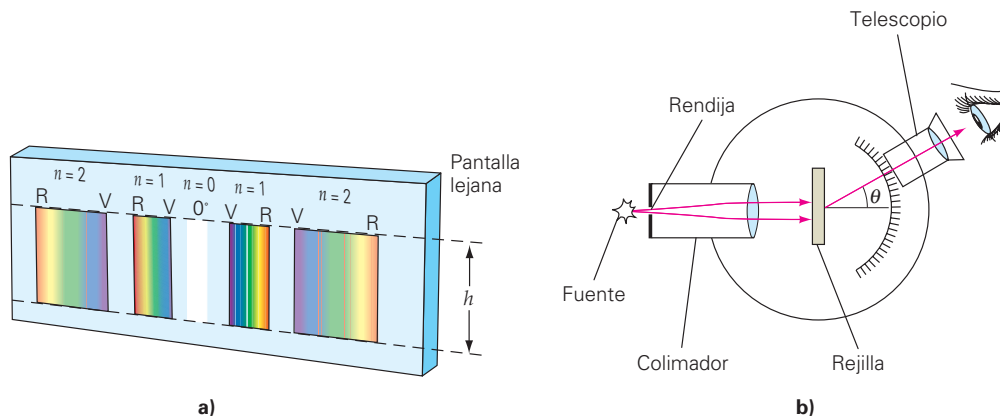


FIGURA 9.18 Espectroscopia *a)* En cada franja brillante lateral se separan los componentes de distintas longitudes de onda (R = rojo y V = violeta), porque la desviación depende de la longitud de onda: $\theta = \text{sen}^{-1}(n\lambda/d)$. *b)* Por esta razón, se usan rejillas en los espectrómetros para determinar las longitudes de onda presentes en un rayo de luz, midiendo sus ángulos de difracción y separando las diversas longitudes de onda para su análisis posterior.



FIGURA 9.24 Reducción del resplandor *a)* La luz reflejada en una superficie horizontal está parcialmente polarizada en el plano horizontal. Cuando los anteojos solares se orientan de tal forma que su eje de transmisión es vertical, el componente polarizado horizontalmente de esa luz no se transmite, y se reduce el resplandor. *b)* En los filtros polarizantes de las cámaras se usa el mismo principio. La fotografía de la derecha se tomó con uno de esos filtros. Note la reducción de los reflejos en el escaparate de una tienda.

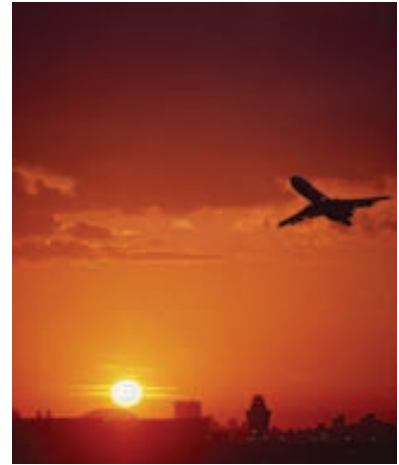


FIGURA 9.28 Cielo rojo al atardecer Una espectacular puesta de sol, de tonalidades rojizas, en un observatorio ubicado en la cima de una montaña en Chile. El cielo rojo es el resultado de la dispersión de la luz solar por los gases atmosféricos y las pequeñas partículas sólidas. El enrojecimiento del Sol, cuando se observa en forma directa, se debe a la dispersión de las longitudes de onda hacia el extremo azul del espectro, en línea directa hacia el Sol.



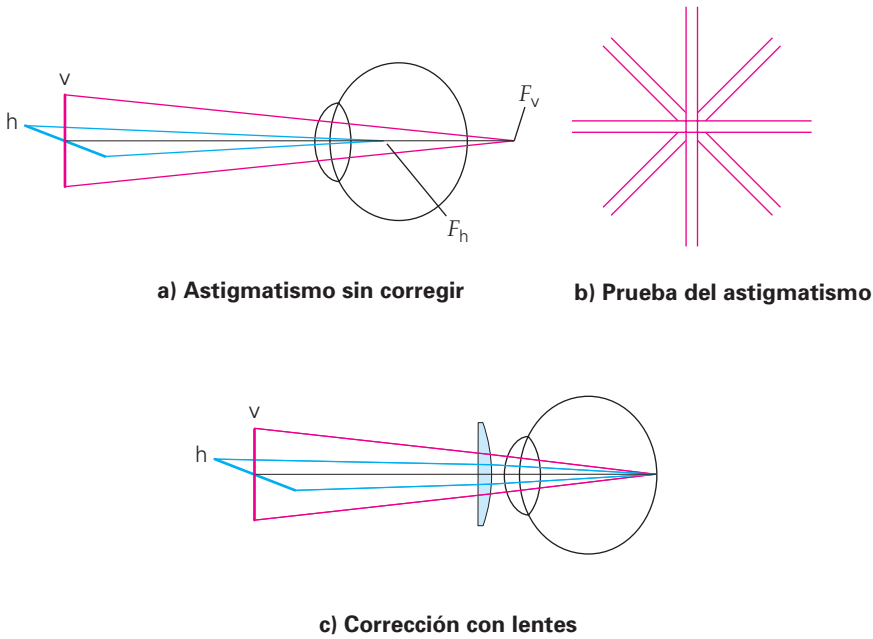


FIGURA 10.5 Astigmatismo Cuando una de las partes refringentes del ojo no es esférica, el ojo tiene diferentes distancias focales en distintos planos. *a)* El efecto se debe a que los rayos en el plano vertical (rojo) y en el plano horizontal (azul) se enfocan en puntos distintos: F_v y F_h , respectivamente. *b)* Para alguien que tenga ojos astigmáticos, algunas o todas las líneas de este diagrama le parecerán borrosas. *c)* Los lentes no esféricos, como los cilíndricos planoconvexos, se usan para corregir el astigmatismo.

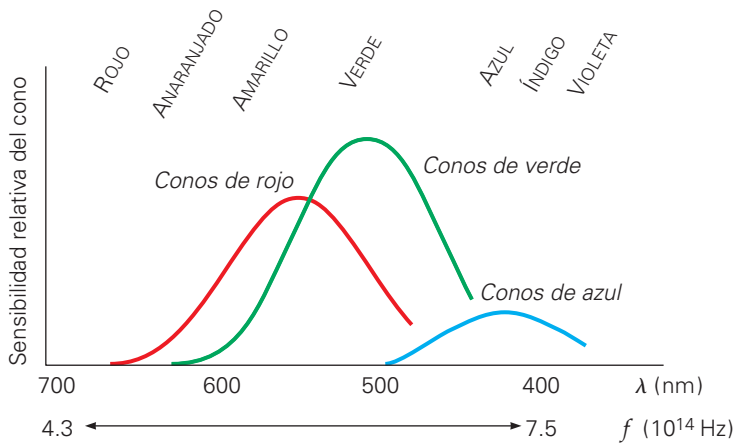
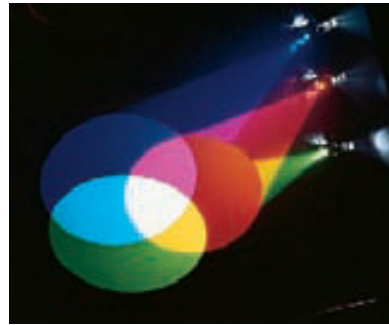
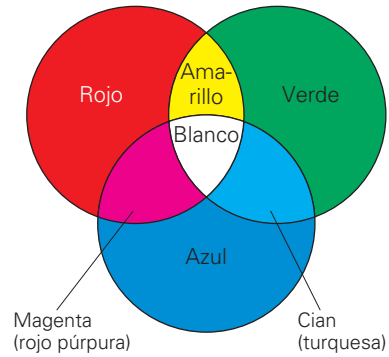


FIGURA 10.19 Sensibilidad de los conos Diversos tipos de conos en la retina del ojo humano responden a distintas frecuencias de la luz, para dar tres respuestas generales al color: rojo, verde y azul.



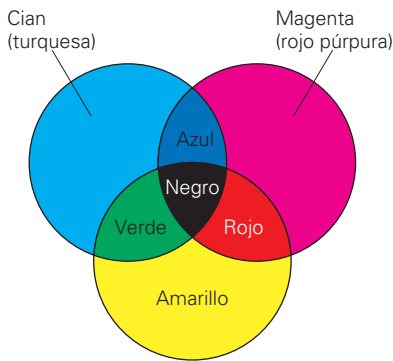
a)



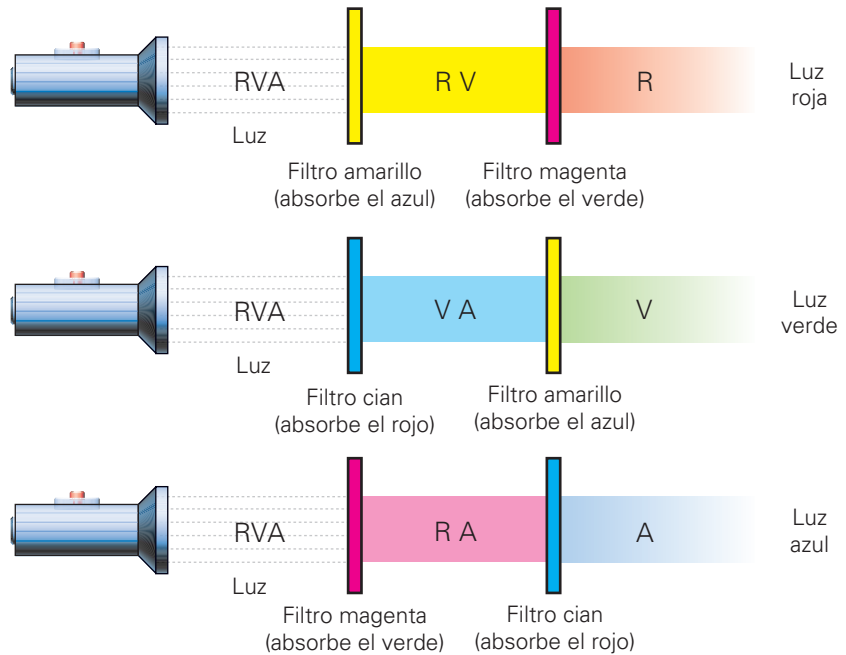
b)

FIGURA 10.20 Método aditivo de producción de color Cuando se proyectan haces luminosos de los colores primarios (rojo, azul y verde) en una pantalla blanca, sus mezclas producen diversos colores. Si se varían las intensidades de los haces es posible generar la mayor parte de los colores.

FIGURA 10.21 Método sustractivo de producción de color a) Cuando los pigmentos primarios (cian, magenta y amarillo) se mezclan, se producen distintos colores por absorción sustractiva; por ejemplo, la mezcla de amarillo y magenta produce rojo. Cuando se mezclan los tres pigmentos y se absorben todas las longitudes de onda de la luz visible, la mezcla parece negra. b) Mezcla sustractiva de colores, usando filtros. El principio es igual que el del inciso a). Cada pigmento absorbe selectivamente ciertos colores, eliminándolos de la luz blanca. Los colores que quedan son los que vemos.



a)



b)