

PARTE CINCO

# Electricidad y magnetismo

# Electrostática



*Jim Stith, ex presidente de la Asociación Estadounidense de Profesores de Física, demuestra un generador de Wimshurst que produce minirrelámpagos.*



**E**lectricidad es el nombre que se da a una amplia gama de fenómenos que, de una u otra forma, están presentes en casi todo lo que nos rodea. Desde el relámpago en el cielo hasta el encendido de una bombilla eléctrica, y desde lo que mantiene unidos a los átomos de las moléculas hasta los impulsos que se propagan por tu sistema nervioso, la electricidad está en todas partes. El control de la electricidad se hace evidente en muchos aparatos, desde los hornos de microondas hasta las computadoras. En esta era de la tecnología es importante entender las bases de la electricidad y cómo se pueden usar esas ideas básicas para mantener y aumentar nuestra comodidad, nuestra seguridad y nuestro progreso actuales.

En este capítulo estudiaremos la electricidad en reposo, es decir, la **electrostática**. Ésta implica cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas, el aura que las rodea y su comportamiento en los materiales. En el siguiente capítulo examinaremos el movimiento de las cargas eléctricas, que son las *corrientes eléctricas*. También estudiaremos los voltajes que producen las corrientes y la forma de controlarlos. En el capítulo 24 investigaremos la relación entre las corrientes eléctricas y el magnetismo, y en el capítulo 25 aprenderemos cómo se controlan la electricidad y el magnetismo para hacer funcionar los motores y otros aparatos eléctricos, así como la electricidad y el magnetismo conectados se vuelve luz.

Para comprender la electricidad se requiere un enfoque paso a paso, ya que un concepto es la base del siguiente. Así que por favor estudia este material con mucho cuidado. Podría resultarte difícil, confuso y frustrante, si eres impaciente. Pero con un esfuerzo esmerado te resultará comprensible y provechoso. ¡Adelante!

## Fuerzas eléctricas

¿Y si hubiera una fuerza universal que, como la gravedad, variara inversamente en función del cuadrado de la distancia, pero que fuera miles de millones de millones más fuerte? Si hubiera una fuerza de atracción así, como la gravedad, se juntaría el universo y formaría una esfera apretada, con toda la materia lo más cerca posible entre sí. Pero imagina que esa fuerza fuera de repulsión, y que cada partícula de materia repele a todas las demás. ¿Qué pasaría? El universo sería gaseoso, frío y estaría expandiéndose. Sin embargo, supón que el universo consistiera de dos clases de partículas, digamos positivas y negativas. Imagina que las positivas repelieran a las positivas, pero que atrajeran a las negativas; y que las negativas repelieran a las negativas, pero atrajeran a las positivas. En otras palabras, las iguales se repelen y las distintas se atraen (figura 22.1). Imagina que hubiera una cantidad igual de cada una, ¡de manera que esta gran fuerza estuviera per-

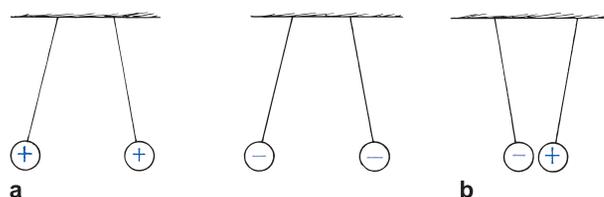


FIGURA 22.1

Figura interactiva

- a) Las cargas de igual signo se repelen.
- b) Las cargas de diferente signo se atraen.



El hecho de que ciertas cargas se denominen positivas y otras negativas es el resultado de una elección de Benjamín Franklin. Bien pudo ser a la inversa.

¡EUREKA!

fectamente equilibrada! ¿Cómo sería el Universo? La respuesta es sencilla: sería como el que vemos y en el cual vivimos. Porque sí hay esas partículas y sí hay tal fuerza. Se llama *fuerza eléctrica*.

Grupos de partículas positivas y negativas se han reunido entre sí por la enorme atracción de la fuerza eléctrica. En esos grupos compactos y mezclados uniformemente de positivas y negativas, las gigantescas fuerzas eléctricas se equilibran de forma casi perfecta. Estos grupos son los átomos de la materia. Cuando dos o más átomos se unen para formar una molécula, ésta contiene también partículas positivas y negativas balanceadas. Y cuando se combinan billones de moléculas para formar una mota de materia, de nuevo se equilibran las fuerzas eléctricas. Entre dos trozos de materia ordinaria apenas hay atracción o repulsión eléctrica, porque cada trozo contiene cantidades iguales de positivas y negativas. Por ejemplo, entre la Tierra y la Luna no hay fuerza eléctrica neta. La fuerza gravitacional, que es mucho más débil y que sólo atrae, queda como fuerza predominante entre esos cuerpos.

## Cargas eléctricas

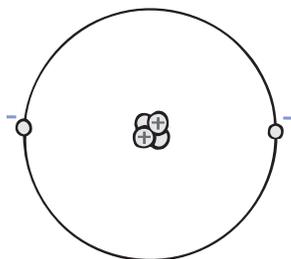


FIGURA 22.2

Figura interactiva

Modelo de un átomo de helio. El núcleo atómico está formado por dos protones y dos neutrones. Los protones tienen carga positiva y atraen dos electrones negativos. ¿Cuál será la carga neta de este átomo?

Los términos *positivo* y *negativo* se refieren a *carga* eléctrica, la cantidad fundamental que se encuentra en todos los fenómenos eléctricos. Las partículas con carga positiva de la materia ordinaria son protones, y las de carga negativa, electrones. La fuerza de atracción entre esas partículas hace que se agrupen en unidades increíblemente pequeñas, los átomos. (Los átomos también contienen partículas neutras llamadas neutrones.) Cuando dos átomos se acercan entre sí, el equilibrio de las fuerzas de atracción y de repulsión no es perfecto, porque en el volumen de cada átomo vagan los electrones. Entonces los átomos pueden atraerse entre sí y formar una molécula. De hecho, todas las fuerzas de enlace químico que mantienen unidos a los átomos en las moléculas son de naturaleza eléctrica. Quien desee estudiar química debería conocer primero algo sobre la atracción y la repulsión eléctricas, y antes de estudiarlas deben conocer algo acerca de los átomos. A continuación veremos algunos hechos importantes acerca de los átomos:

1. Cualquier átomo está formado por un *núcleo* con carga positiva rodeado por electrones con carga negativa.
2. Los electrones de todos los átomos son idénticos. Cada uno tiene la misma cantidad de carga eléctrica y la misma masa.
3. Los protones y los neutrones forman el núcleo. (La forma común de un átomo de hidrógeno no tiene neutrón, y es la única excepción.) Los protones tienen unas 1,800 veces más masa que los electrones; pero la cantidad de carga positiva que tienen es igual a la carga negativa de los electrones. Los neutrones tienen una masa un poco mayor que la de los protones, y no tienen carga neta.
4. En general los átomos tienen igual cantidad de electrones que de protones, por lo que el átomo tiene una carga *net*a igual a cero.

¿Por qué los protones no atraen a los electrones con carga opuesta y los llevan al núcleo? Podrías imaginar que la respuesta es la misma a la pregunta de por qué los planetas no caen directamente al Sol debido a la fuerza de gravitación, ya que los electrones se mueven en órbita en torno al núcleo. Por desgracia esa explicación para los planetas no es válida para los electrones. Cuando se descubrió el núcleo (1911), los científicos ya sabían que los electrones no pueden describir plácidas órbitas en torno al núcleo, del mismo modo que la Tierra gira alrededor del Sol. Sólo tardarían un cienmillonésimo de segundo, de acuerdo con la física clásica, para caer en espiral hacia el núcleo, emitiendo radiación electromagnética al hacerlo. Por consiguiente, se necesitaba una nueva teoría, y nació la teoría llamada mecánica cuántica. Para describir el movimiento de los electrones todavía seguimos usando la vieja terminología, *órbita* y *orbital*; aunque *capa* es una palabra mejor, pues sugiere que los electrones están dispersos sobre una superficie esférica. En la actualidad, la explicación para la estabilidad del átomo tiene que ver con la naturaleza ondulatoria de los electrones. Un electrón se comporta como una onda, y debe tener cierta cantidad de espacio, que se relaciona con su longitud de onda. En el capítulo 32 veremos, al estudiar la mecánica cuántica, que el tamaño del átomo está determinado por la cantidad mínima de “espacio vital” que requiere el electrón.

Pero, ¿por qué los protones en el núcleo no salen despedidos si se repelen mutuamente? ¿Qué mantiene unido al núcleo? La respuesta es que, además de las fuerzas eléctricas en el núcleo, hay fuerzas nucleares no eléctricas, pero todavía mayores, que mantienen unidos a los protones a pesar de la repulsión eléctrica. También, los neutrones desempeñan un papel para poner espacio de por medio entre los protones. En el capítulo 33 describiremos la fuerza nuclear.

---

### EXAMÍNATE

1. Bajo la complejidad de los fenómenos eléctricos yace una regla fundamental, de la cual se derivan casi todos los demás efectos. ¿Cuál es esta regla fundamental?
2. ¿En qué difiere la carga de un electrón de la carga de un protón?

---

## Conservación de la carga

En un átomo neutro hay tantos electrones como protones, de manera que no tiene carga neta. Lo positivo compensa exactamente lo negativo. Si a un átomo se le quita un electrón, ya no sigue siendo neutro. Entonces el átomo tiene una carga positiva más (protón) que cargas negativas (electrones), y se dice que tiene carga positiva.<sup>1</sup> Un átomo con carga eléctrica se llama *ion*. Un *ion positivo* tiene una carga neta positiva. Un *ion negativo* es un átomo que tiene uno o más electrones adicionales, y tiene carga negativa.

---

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las cargas iguales se repelen; las cargas opuestas se atraen.
2. La carga de un electrón tiene magnitud igual, pero signo contrario, que la carga de un protón.

---

<sup>1</sup> La carga de cada protón,  $+e$ , es igual a  $+1.6 \times 10^{-19}$  coulomb. Cada electrón tiene una carga  $-e$ , igual a  $-1.6 \times 10^{-19}$  coulomb. La causa de que esas partículas tan distintas tengan cargas de la misma magnitud es una pregunta que no ha sido contestada en física. La igualdad de las magnitudes se ha medido con gran exactitud.


**FIGURA 22.3**

Los electrones pasan de la piel a la varilla. La varilla queda con carga negativa. ¿La piel tiene carga? ¿Cuánta en comparación con la varilla? ¿Es positiva o negativa?



La carga es como el testigo en una carrera de relevos. Pasa de un objeto a otro pero no se pierde.

¡EUREKA!

Los objetos materiales están formados por átomos, y eso quiere decir que están formados por electrones y protones (y neutrones). Los objetos tienen, de ordinario, cantidades iguales de electrones y de protones y, en consecuencia, son eléctricamente neutros. Pero si hay un pequeño desequilibrio en esas cantidades, el objeto tiene carga eléctrica. Cuando se agregan o quitan electrones a un objeto, se produce un desequilibrio. Aunque los electrones más cercanos al núcleo atómico, que son los electrones internos, están muy fuertemente enlazados con el núcleo atómico, de carga opuesta, los electrones más alejados, que son los electrones externos, están enlazados muy débilmente y se pueden desprender con facilidad. La cantidad de trabajo que se requiere para desprender un electrón de un átomo varía entre una y otra sustancias. Los electrones están sujetos con más firmeza en el caucho y en el plástico que en tu cabello, por ejemplo. Así, cuando frotas un peine en tu cabello, los electrones pasan del cabello al peine. Entonces el peine tiene un exceso de electrones, y se dice que *tiene carga negativa* o que *está cargado negativamente*. A la vez, tu cabello tiene una deficiencia de electrones y se dice que tiene *carga positiva*, o que *está cargado positivamente*. Otro ejemplo consiste en frotar una varilla de vidrio o de plástico contra seda: la varilla se cargará positivamente. La seda tiene más afinidad hacia los electrones que el vidrio o el plástico. En consecuencia, los electrones se desprenden de la varilla y pasan a la seda.

Vemos entonces que un objeto que tiene cantidades distintas de electrones y de protones se carga eléctricamente. Si tiene más electrones que protones, tiene carga negativa. Si tiene menos electrones que protones, tiene carga positiva.

Es importante destacar que cuando se carga algo no se crean ni se destruyen electrones. Sólo pasan de un material a otro. La carga se *conserva*. En todo caso, ya sea en gran escala o a nivel atómico y nuclear, siempre se ha comprobado que se aplica el principio de la **conservación de la carga**. Nunca se ha encontrado caso alguno de creación o de destrucción de la carga eléctrica. La conservación de la carga es una de las piedras angulares de la física, y su importancia es igual a la de la conservación de la energía y la conservación de la cantidad de movimiento.

Cualquier objeto con carga eléctrica tiene exceso o falta de algún número entero de electrones: los electrones no pueden dividirse en fracciones de electrones. Esto significa que la carga del objeto es un múltiplo entero de la carga de un electrón. Por ejemplo, no puede tener una carga igual a la de  $1\frac{1}{2}$  o de  $1,000\frac{1}{2}$  electrones. La carga es “granular”, es decir, está formada por unidades elementales llamadas *cuantos*. Se dice que la carga está *cuantizada*, y que el cuanto más pequeño de carga es la carga del electrón (o del protón). Nunca se han observado unidades más pequeñas de carga.<sup>2</sup> Hasta la fecha se ha visto que todos los objetos cargados tienen una carga de magnitud igual a un múltiplo entero de la carga de un solo electrón o protón.

### EXAMÍNATE

Si entran electrones a tus pies al arrastrarlos sobre una alfombra ¿te cargarás negativa o positivamente?

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Tienes más electrones después de haber frotado tus pies, así que tienes carga negativa (y la alfombra tiene carga positiva).

<sup>2</sup> Sin embargo, dentro del núcleo atómico, unas partículas elementales llamadas *quarks* tienen cargas de  $\frac{1}{3}$  y de  $\frac{2}{3}$  de la magnitud de la carga de un electrón. Cada protón y cada neutrón está formado por tres quarks. Como los quarks siempre existen en esas combinaciones, y nunca se han encontrado separados, también para los procesos nucleares es válida la regla del múltiplo entero de la carga del electrón.

## Ley de Coulomb (opcional)

La fuerza eléctrica, al igual que la fuerza gravitacional, disminuye inversamente respecto al cuadrado de la distancia entre los cuerpos que interactúan. Esta relación fue descubierta por Charles Coulomb en el siglo XVIII, y se llama **ley de Coulomb**. Establece que para dos objetos cargados, de tamaño mucho menor que la distancia que los separa, la fuerza entre ellos varía en forma directa con el producto de sus cargas, e inversamente con el cuadrado de la distancia entre ellos. (Repasa la ley del inverso del cuadrado, en la figura 9.6 de la página 165.) La fuerza actúa en línea recta de un objeto cargado hacia el otro. Esa ley de Coulomb se puede expresar como:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

donde  $d$  es la distancia entre las partículas cargadas,  $q_1$  representa la cantidad de carga de una partícula,  $q_2$  representa la cantidad de carga de la otra partícula y  $k$  es la constante de proporcionalidad.

La unidad de carga es el **coulomb**, y su símbolo es C. Sucede que una carga de 1C es la que tienen en conjunto 6.25 millones de billones de electrones ( $1\text{C} = 10^{18}$  electrones). Parece ser una gran cantidad de electrones, pero sólo representa la carga que pasa por una bombilla eléctrica común de 100 watts durante un poco más de 1 segundo.

La constante de proporcionalidad  $k$  de la ley de Coulomb es similar a la  $G$  de la ley de la gravitación de Newton. En vez de ser un número muy pequeño como esa  $G$  (que es  $6.67 \times 10^{-11}$ ), en el caso de  $k$  es un número muy grande. Aproximadamente es igual a

$$k = 9,000,000,000 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

o bien, en notación científica,  $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ . La unidad  $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$  no tiene importancia especial en este caso; tan sólo convierte el lado derecho de la ecuación a la unidad de fuerza, el newton (N). Lo importante es la gran magnitud de  $k$ . Si, por ejemplo, hubiera un par de partículas cargadas con 1 coulomb cada una y estuvieran a una distancia de 1 metro entre sí, la fuerza de atracción o repulsión entre ellas sería 9,000 millones de newton<sup>3</sup>; Sería 10 veces mayor que el peso de un buque de guerra! Es evidente que esas cantidades de carga neta no existen en nuestro ambiente cotidiano.

En conclusión, la ley de Newton de la gravitación, para cuerpos masivos, es parecida a la ley de Coulomb para cuerpos cargados.<sup>4</sup> Mientras que la fuerza gra-



La ley de Coulomb es como la ley de Newton de la gravedad. Pero, a diferencia de esta última, las fuerzas eléctricas son de atracción o de repulsión.

¡EUREKA!

<sup>3</sup> Al comparar las magnitudes de  $G$  y de  $k$  se debe notar que dependen de las unidades elegidas para la masa y la carga eléctrica, que pudieron elegirse en forma distinta. Entonces, nuestra comparación sólo nos recuerda que en general las fuerzas eléctricas suelen ser enormes, en comparación con las fuerzas gravitacionales. Compara los 9,000 millones de newtons entre dos cargas unitarias a 1 m de distancia, con la fuerza gravitacional entre dos unidades de masa (en kilogramos) a 1 m de distancia: es  $6.67 \times 10^{-11}$  N, extremadamente pequeña. Para que la fuerza fuera de 1 N, las masas que están a 1 m de distancia ¡deberían ser casi de 122,000 kg cada una! Las fuerzas gravitacionales entre los objetos ordinarios es demasiado pequeña para ser detectada, excepto en los experimentos muy delicados. Pero las fuerzas eléctricas entre los objetos ordinarios pueden ser relativamente inmensas. Sin embargo, aun en los objetos con mucha carga, el desequilibrio entre electrones y protones es, normalmente, menor que un billonésimo.

<sup>4</sup> Según la teoría cuántica, la fuerza varía inversamente en función del cuadrado de la distancia si implica un intercambio de partículas sin masa. El intercambio de los fotones sin masa es responsable de la fuerza eléctrica, y el intercambio de los gravitones sin masa explica la fuerza de gravitación. Algunos científicos han buscado una relación más consistente entre la gravedad y la electricidad. Albert Einstein pasó la última parte de su vida en esa búsqueda, poco exitosa, de una "teoría del campo unificado". En fecha más reciente se ha unificado la fuerza eléctrica con una de las dos fuerzas nucleares, la *fuerza débil*, que desempeña un papel en la desintegración radiactiva.

vitacional de atracción entre partículas como un electrón y un protón es extremadamente pequeña, la fuerza eléctrica entre ellos es relativamente enorme. Además de la gran diferencia en intensidad, la diferencia más importante entre las fuerzas de gravitación y eléctricas es que estas últimas pueden ser de atracción y de repulsión, mientras que las fuerzas gravitacionales sólo son de atracción.

### EXAMÍNATE

1. El protón que es el núcleo de un átomo de hidrógeno atrae al electrón que gira alrededor de él. En relación con esta fuerza, ¿el electrón atrae al protón con menos, con la misma o con más fuerza?
2. Si un protón es repelido con determinada fuerza por una partícula cargada, ¿en qué factor disminuirá la fuerza si el protón se aleja de la partícula hasta tres veces la distancia original? ¿Y hasta cinco veces la distancia original?
3. En este caso, ¿cuál es el signo de la carga de la partícula?

## Conductores y aislantes



**FIGURA 22.4**

Es más fácil establecer una corriente eléctrica a través de cientos de kilómetros de alambre metálico que a través de unos pocos centímetros de material aislante.

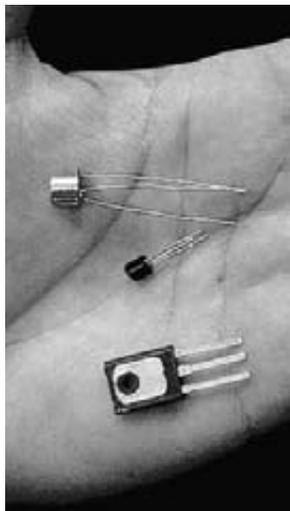
Es fácil establecer una corriente eléctrica en los metales, porque sus átomos tienen uno o más electrones en su capa externa que no están anclados a núcleos de átomos determinados; en cambio, son libres para desplazarse a través del material. A esos materiales se les llama buenos **conductores**. Los metales son excelentes conductores de la corriente eléctrica por la misma razón por la que son buenos conductores de calor: los electrones de su capa atómica externa están “suelos”.

En otros materiales, como caucho y vidrio, los electrones están fuertemente enlazados con determinados átomos, y pertenecen a ellos. No están libres para desplazarse entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacer que fluyan. Esos materiales son malos conductores de la corriente eléctrica por la misma razón que en general son deficientes conductores del calor. Se dice que esos materiales son buenos **aislantes**.

Todas las sustancias se pueden ordenar según su capacidad de conducir cargas eléctricas. Las que quedan arriba de la lista son los conductores, y al último quedan los aislantes. Esos extremos en la lista están muy alejados. Por ejemplo, la conductividad de un metal puede ser más de un millón de billones mayor que la de un aislante, como el vidrio. En un cordón común de un aparato eléctrico, los electrones recorren varios metros de alambre en vez de pasar en forma directa de uno a otro alambre a través de una pequeña fracción de un centímetro de aislamiento de caucho o de vinil.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. De acuerdo con la tercera ley de Newton, es la misma fuerza. ¡Es mecánica básica! Recuerda que una fuerza es una interacción entre dos cosas, en este caso entre el protón y el electrón. Tiran uno de otro, por igual.
2. Disminuye a  $1/9$  de su valor original. Disminuye a  $1/25$ .
3. Positiva.



a



b

## Semiconductores

El hecho de que una sustancia se clasifique como conductor o aislante depende de lo firmemente que sus átomos retengan a sus electrones. Un trozo de cobre es un buen conductor, mientras que un pedazo de madera es un buen aislante. Sin embargo, hay algunos materiales, como el silicio y el germanio, que no son buenos conductores ni buenos aislantes. Están a la mitad del intervalo de resistividades eléctricas; son aislantes regulares en su forma cristalina pura, y se vuelven conductores excelentes cuando se reemplaza uno de sus átomos, entre 10 millones de ellos, con una impureza que agregue o quite un electrón a la estructura cristalina. A los materiales que puede hacerse que se comporten a veces como aislantes y a veces como conductores se les llama **semiconductores**. Las capas delgadas de materiales semiconductores, una sobre otra, forman los *transistores*, que sirven para controlar el flujo de las corrientes en los circuitos, para detectar y amplificar las señales de radio y para producir oscilaciones en los transmisores; también funcionan como interruptores digitales. Esos sólidos diminutos fueron los primeros componentes eléctricos, en los cuales los materiales con distintas características eléctricas no se interconectaron con alambres, sino que se unieron físicamente en una estructura. Requieren muy poca energía y en uso normal duran en forma indefinida.

Un semiconductor también puede conducir cuando se ilumina con luz del color adecuado. Una placa de selenio puro es, normalmente, un buen aislante, y toda carga eléctrica que se acumula en su superficie se quedará ahí durante largo tiempo en la oscuridad. Sin embargo, si la placa se expone a la luz, la carga desaparece casi de inmediato. Si una placa cargada de selenio se expone a una distribución de luz, como la distribución de claros y oscuros que forma esta página, la carga saldrá sólo de las áreas expuestas a la luz. Si se unta su superficie con un polvo de plástico negro, ese polvo sólo se adheriría a las áreas cargadas, donde la placa no se ha expuesto a la luz. Ahora, si sobre la placa se pone una hoja de papel con carga eléctrica en su cara trasera, el polvo de plástico negro se atraería hacia el papel y formaría la misma figura que, digamos, la de esta página. Si el papel se calentara para fundir el plástico y pegarlo en el papel, pagarías a quien te lo entregara y le llamarías copia Xerox.

FIGURA 22.5

- a) Tres transistores.  
b) Muchos transistores en un circuito integrado.

## Superconductores (opcional)

Un conductor ordinario sólo tiene una resistencia pequeña al paso de la carga eléctrica. La resistencia de un aislante es mucho mayor (en el siguiente capítulo explicaremos el tema de la resistencia eléctrica). Es notable que a temperaturas suficientemente bajas, ciertos materiales tienen resistencia cero (conductividad infinita) contra el flujo de la carga. Son **superconductores**. Una vez establecida una corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen en forma indefinida. Si no hay resistencia eléctrica, la corriente atraviesa un superconductor sin perder energía; no hay pérdida de calor cuando fluyen las cargas. La superconductividad en los metales, cerca del cero absoluto, fue descubierta en 1911. En 1987 se descubrió la superconductividad a temperaturas “altas” (mayores que 100 K), en un compuesto no metálico. Cuando se escribió este libro, se estaba investigando intensamente la superconductividad tanto a temperaturas “altas” como a temperaturas bajas. Entre sus aplicaciones potenciales están la transmi-

sión de energía a larga distancia sin pérdidas, y los vehículos de levitación magnética a gran velocidad, para reemplazar a los tradicionales trenes sobre rieles.

## Carga (opcional)



La electricidad estática es un problema creciente en las estaciones de servicio. Incluso una mínima chispa podría encender los vapores que provienen de la gasolina y provocar un incendio, que muy probablemente resultaría letal. Una buena medida es tocar metal para descargar la electricidad estática del cuerpo antes de cargar gasolina. Además, hay que evitar utilizar el teléfono celular mientras se carga el combustible.

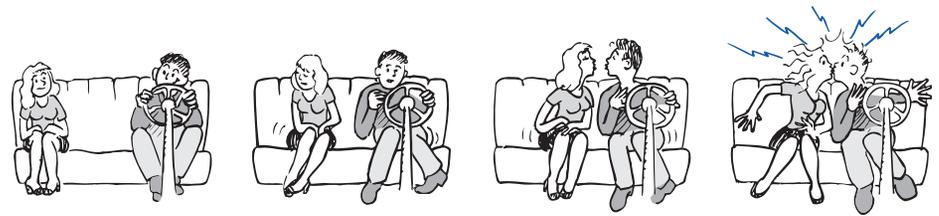
¡EUREKA!

Cargamos (eléctricamente) las cosas al transferir electrones de un lugar a otro. Lo podemos hacer por contacto físico, como cuando se frotan entre sí las sustancias, o simplemente cuando se tocan. También podemos redistribuir la carga de un objeto poniéndole cerca un objeto cargado. A esto se le llama *inducción*.

### Carga por fricción y por contacto

Todos estamos familiarizados con los efectos eléctricos que produce la fricción. Podemos frotar la piel de un gato y oír el crujir de las chispas que se producen, o peinarnos frente a un espejo en una habitación oscura para ver y oír las chispas. Podemos frotar nuestros zapatos con una alfombra y sentir hormigueo al tocar la perilla de una puerta. Platica con adultos mayores y te contarán el sorprendente choque característico después de deslizarse sobre un cubreasientos de plástico dentro de un automóvil estacionado (figura 22.6). En todos estos casos, se transfieren electrones por fricción cuando un material se frota contra otro.

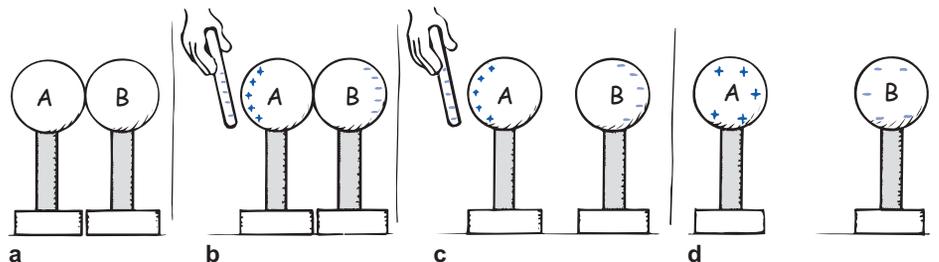
Los electrones pueden pasar de un material a otro con un simple toque. Por ejemplo, cuando se toca un objeto neutro con una varilla con carga negativa, algunos electrones pasarán al objeto neutro. A este método de carga se le llama **carga por contacto**. Si el objeto tocado es buen conductor, los electrones se difundirán a todas las partes de su superficie, porque se repelen entre sí. Si es un mal conductor, será necesario tocar varios lugares del objeto con la varilla cargada para obtener una distribución de carga más o menos uniforme.



**FIGURA 22.6**  
Carga por fricción y después por contacto.

### Carga por inducción

Si *acercas* un objeto cargado a una superficie conductora, harás que se muevan los electrones en la superficie del material, aunque no haya contacto físico. Examina las dos esferas metálicas A y B, aisladas, de la figura 22.7. *a)* se tocan, por lo que de hecho forman un solo conductor no cargado. *b)* Cuando se acerca



**FIGURA 22.7**  
**Figura interactiva**  
Carga por inducción.

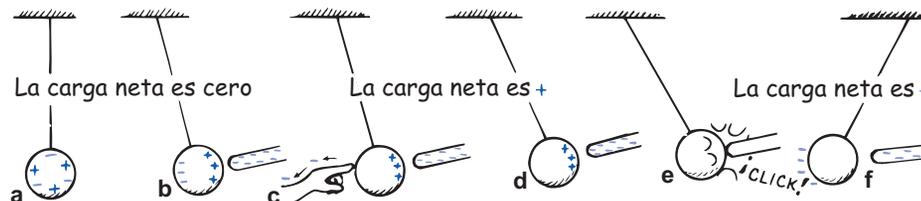


FIGURA 22.8

Figura interactiva

Etapas de carga por inducción con conexión a tierra. *a*) La carga neta en la esfera de metal es cero. *b*) La presencia de la varilla con carga induce una redistribución de carga en la esfera. La carga neta en la esfera todavía es cero. *c*) Al tocar el lado negativo de la esfera se eliminan los electrones por contacto. *d*) Entonces la esfera queda con carga positiva. *e*) La esfera es atraída con más fuerza a la varilla negativa y, cuando la toca, se produce la carga por contacto. *f*) La esfera negativa es repelida por la varilla, que todavía tiene un poco de carga negativa.

A una varilla con carga negativa, como los electrones del metal tienen movimiento libre, son repelidos todos lo más lejos posible, hasta que su repulsión mutua sea lo suficientemente grande para equilibrar la influencia de la varilla: se redistribuye la carga. *c*) Si A y B se separan cuando la varilla todavía está presente, *d*) cada esfera quedará cargada con la misma cantidad de carga y signo opuesto. Esto es la **carga por inducción**. La varilla con carga nunca tocó las esferas, y conserva la misma carga que tenía al principio.

Se puede cargar una sola esfera, en forma parecida, por inducción, si la tocamos cuando sus distintas partes tengan cargas distintas. Examina la esfera metálica que cuelga de un cordón no conductor (figura 22.8). Cuando se toca la superficie del metal con un dedo, se establece una trayectoria para que la carga fluya hacia o desde un depósito muy grande de carga eléctrica, que es la tierra. Se dice que estamos *aterrizando* la esfera, o *conectándola a la tierra*, y el proceso puede dejarla con una carga neta. Regresaremos a esta idea de conexión a tierra en el siguiente capítulo, cuando estudiemos las corrientes eléctricas.

### EXAMÍNATE

1. ¿Las cargas inducidas en las esferas A y B de la figura 22.7 necesariamente deben ser exactamente iguales y opuestas?
2. ¿Por qué la varilla negativa de la figura 22.7 tiene la misma carga antes y después de que se carguen las esferas, pero no cuando se efectúa la carga, como en la figura 22.8?

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí. Las cargas deben ser iguales y opuestas en ambas esferas, porque cada carga positiva en la esfera A se debe a que un solo electrón se toma de A y pasa a B. Es como tomar adoquines de la superficie de un camino de adoquines y ponerlos todos en las aceras. La cantidad de adoquines en las aceras coincidirá exactamente con la cantidad de agujeros que quedan en el camino. Asimismo, la cantidad de electrones adicionales en B coincide exactamente con la cantidad de “agujeros” (cargas positivas) que quedan en A. Recuerda que una carga positiva se debe a que falta un electrón.
2. En el proceso de carga de la figura 22.7 no hubo contacto entre la varilla negativa con alguna de las esferas. Sin embargo, en la figura 22.8 la varilla tocó a la esfera con carga positiva. Una transferencia de carga por el contacto redujo la carga negativa de la varilla.

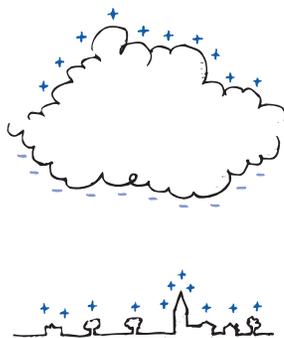


FIGURA 22.9

La carga negativa en la parte inferior de la nube induce una carga positiva en la superficie del suelo debajo de ella.

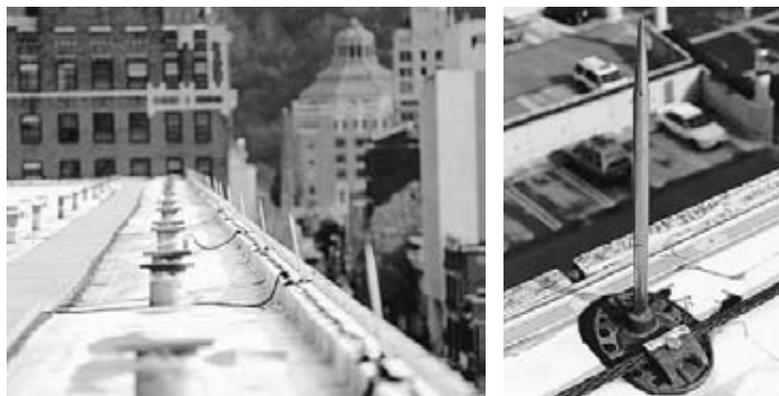


FIGURA 22.10

El pararrayos está conectado con alambre de uso rudo, para que pueda conducir una corriente muy grande al suelo, cuando atrae un rayo o relámpago. Lo más frecuente es que la carga salga por la punta y evite que se produzca un relámpago.

En las tormentas con relámpagos hay carga por inducción. La parte inferior de las nubes tiene carga negativa, que induce una carga positiva sobre la superficie de la Tierra que esté debajo de ella. Benjamín Franklin fue quien primero demostró que el relámpago es un fenómeno eléctrico, cuando realizó su célebre experimento de elevar un cometa durante una tormenta.<sup>5</sup> El relámpago es una descarga eléctrica entre una nube y el suelo, con carga opuesta, o entre partes de nubes con carga opuesta.

Franklin también determinó que la carga pasa con facilidad hacia puntas metálicas afiladas o desde ellas, y diseñó el primer pararrayos. Si una varilla se coloca sobre un edificio y se conecta con el terreno, la punta del pararrayos atrae a electrones del aire, evitando que se acumule una gran carga positiva por inducción. Esta “fuga” continua de carga evita una acumulación de carga que de otra forma produciría una descarga súbita entre la nube y el edificio. Por consiguiente, la finalidad principal del pararrayos es evitar que suceda una descarga del relámpago. Si por alguna razón no escapa suficiente carga del aire a la varilla, y aun así cae el rayo, será atraído al pararrayos y llegará directo al suelo, sin dañar al edificio. El objetivo principal del pararrayos es evitar incendios causados por relámpagos.

## Polarización de carga (opcional)

La carga por inducción no se restringe a los conductores. Cuando una varilla con carga se acerca a un aislante, no hay electrones libres que puedan migrar por el material aislante. En cambio hay un nuevo arreglo de cargas dentro de los átomos y las moléculas mismas (figura 22.11). Aunque los átomos no cambian sus

<sup>5</sup> Benjamín Franklin tuvo cuidado de aislarse de su aparato, y de evitar la lluvia al hacer su experimento; no se electrocutó como otras personas que trataron de repetir su experimento. Además de ser un gran estadista, Franklin era un científico de primera línea. Introdujo los términos *positiva* y *negativa* en relación con la electricidad, pero sin embargo sostuvo la teoría de la carga eléctrica debida a un fluido, y contribuyó a nuestra comprensión de la conexión a tierra y el aislamiento. También publicó un periódico, formó la primera empresa aseguradora e inventó una estufa más segura y eficiente; ¡era un hombre muy ocupado! Sólo una actividad tan importante como ayudar a crear el sistema de gobierno de Estados Unidos evitó que dedicara más tiempo a su actividad favorita: la investigación científica de la naturaleza.

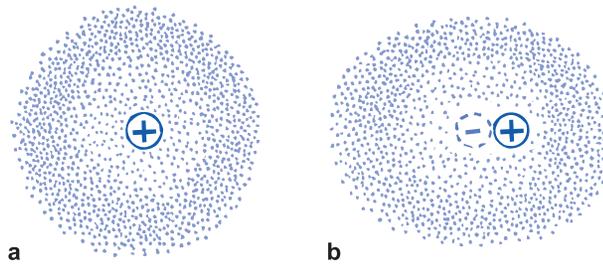


FIGURA 22.11

Un electrón que se mueve en torno a un núcleo atómico forma una nube electrónica.  
 a) El centro de la nube negativa coincide con el centro del núcleo positivo en un átomo.  
 b) Cuando se acerca por la derecha una carga negativa externa, por ejemplo un ion o un globo con carga, se distorsiona la nube electrónica, y ya no coinciden los centros de las cargas positiva y negativa. El átomo está polarizado eléctricamente.

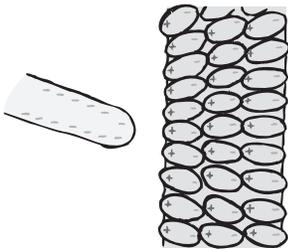


FIGURA 22.12  
 Figura interactiva

Todos los átomos o las moléculas cerca de la superficie se polarizan eléctricamente. Se inducen cargas superficiales de igual magnitud y signo contrario en las superficies opuestas del material.

posiciones relativamente fijas, sus “centros de carga” sí se mueven. Un lado del átomo o la molécula se induce a ser más negativo (o positivo) que el lado contrario. Se dice que el átomo o la molécula está **eléctricamente polarizado**. Por ejemplo, si la varilla tiene carga negativa, entonces la parte positiva del átomo o la molécula es atraída hacia la varilla, y el lado negativo del átomo o la molécula es repelido de la varilla. Las partes positiva y negativa de los átomos se alinean. Están polarizados eléctricamente.

Ya podemos saber por qué los trocitos eléctricamente neutros de papel son atraídos hacia un objeto con carga, por ejemplo, un peine que se haya frotado con el cabello. Cuando el peine cargado se acerca, se polarizan las moléculas del papel. El signo de la carga más cercana al peine es contrario al de la carga del peine. Las cargas del mismo signo están un poco más alejadas. Gana la cercanía y los trocitos de papel sienten una atracción neta. A veces se pegan al peine y de repente salen despedidos. Esta repulsión se debe a que los trocitos adquieren carga del mismo signo que la del peine, cuando lo tocan.

Frota un globo inflado contra tu cabello y se cargará eléctricamente. Coloca el globo contra la pared, y ahí se pegará. Se debe a que la carga del globo introduce una carga superficial de signo contrario en la pared. De nuevo gana la cercanía, porque la carga del globo está un poco más cerca de la carga opuesta inducida, que de la carga del mismo signo (figura 22.14). Muchas moléculas, las de  $H_2O$ , por ejemplo, están polarizadas eléctricamente en sus estados normales. En ellas, la distribución de carga eléctrica no es perfectamente uniforme. Hay un

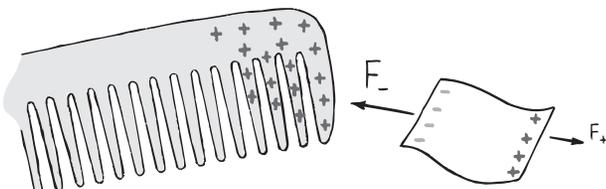


FIGURA 22.13

Un peine con carga atrae un trozo de papel sin carga, porque la fuerza de atracción hacia la carga más cercana es mayor que la de repulsión contra la carga más alejada.

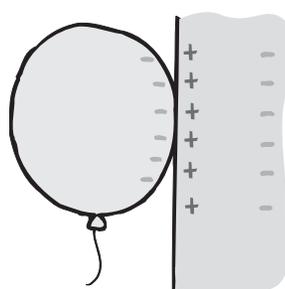
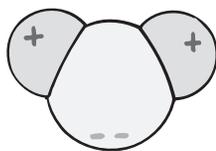


FIGURA 22.14

El globo con carga negativa polariza los átomos en la pared de madera, y crea una superficie con carga positiva, por lo que el globo se adhiere a la pared.



**FIGURA 22.15**  
Una molécula de  $H_2O$  es un dipolo eléctrico.

poco más de carga negativa en un lado de la molécula que en el otro (figura 22.15). Se dice que esas moléculas son *dipolos eléctricos*.

### EXAMÍNATE

1. Una varilla con carga negativa se acerca a pequeños trozos de papel neutros. Los lados positivos de las moléculas en el papel son atraídos hacia la varilla, y los lados negativos son repelidos por ella. Como la cantidad de lados positivos y negativos es igual, ¿por qué no se anulan entre sí las fuerzas de atracción y de repulsión?
2. Una broma. Si frota un globo contra tu cabello y pegas tu cabeza a la pared, ¿ésta se quedará pegada en la pared, como lo hizo el globo?

## Campo eléctrico



Las fuerzas eléctricas, como las gravitacionales, actúan entre objetos que no se tocan entre sí. En la electricidad y en la gravitación existe un *campo de fuerzas* que influye sobre los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. Recuerda que en el capítulo 9 vimos que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de tal manera, que otro cuerpo masivo que se introduzca en esa región sentirá una fuerza. La fuerza es gravitacional, y el espacio alterado que rodea a un cuerpo masivo es su *campo gravitacional*. Se puede imaginar que cualquier otro cuerpo masivo interactúa con el campo, y no directamente con el cuerpo masivo que lo produce. Por ejemplo, cuando una manzana cae de un árbol, decimos que interactúa con la Tierra; aunque también supondríamos que la manzana interactúa con el campo gravitacional de la Tierra. El campo desempeña un papel intermedio en la fuerza entre los cuerpos. Es común pensar que los cohetes lejanos, y cosas por el estilo, interactúan con los campos gravitacionales y no con las masas de la Tierra y demás cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio que rodea a un planeta (y a todos los demás cuerpos masivos) está lleno con un campo gravitacional, el espacio que rodea a un cuerpo con carga eléctrica está lleno por un **campo eléctrico**, una especie de aura que se extiende por el espacio.

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. La magnitud del campo en cualquiera de sus puntos es simplemente la fuerza por

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sólo porque los lados positivos están más cerca de la varilla. Entonces, de acuerdo con la ley de Coulomb, están sometidos a una fuerza eléctrica mayor que los lados negativos, que están más lejos. Por ello se dice que gana la cercanía. Esta fuerza mayor entre lo positivo y lo negativo es de atracción, así que el papel neutro es atraído hacia la varilla cargada. ¿Comprendes que si la varilla fuera positiva también habría atracción?
2. Así sucedería si tu cabeza estuviera llena de aire, esto es, si la masa de tu cabeza fuera más o menos igual que la del globo, para que predominara y se apreciara la fuerza de atracción.

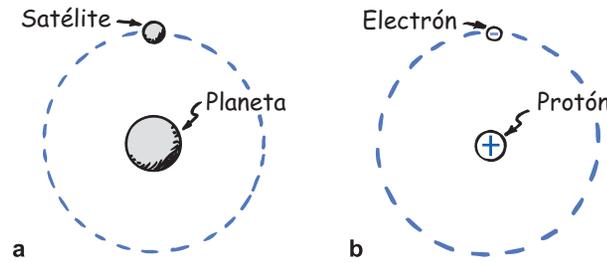


FIGURA 22.16

a) Una fuerza gravitacional mantiene al satélite en órbita en torno al planeta, y b) una fuerza eléctrica mantiene al electrón en órbita en torno al protón. En ambos casos, no hay contacto entre los cuerpos. Se dice que los cuerpos en órbita interactúan con los campos de fuerzas del planeta y del protón, y están siempre en contacto con esos campos. Así, la fuerza que un cuerpo con carga eléctrica ejerce sobre otro se puede describir como la interacción de un cuerpo y el campo debido al otro.

unidad de carga. Si un cuerpo con carga  $q$  experimenta una fuerza  $F$  en determinado punto del espacio, el campo eléctrico  $E$  en ese punto es

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

En la figura 22.17 (parte superior) se representa el campo eléctrico con vectores. La dirección del campo se muestra con los vectores y se define como la dirección hacia la cual sería empujada una pequeña carga de prueba positiva en reposo.<sup>6</sup> La dirección de la fuerza y del campo en cualquier punto son iguales. En la figura se ve que todos los vectores, en consecuencia, apuntan hacia el centro de la esfera con carga negativa. Si la esfera tuviera carga positiva, los vectores se alejarían de su centro, porque sería repelida una carga de prueba positiva que estuviera en las cercanías.

Una forma más útil para describir un campo eléctrico es con las líneas de fuerza eléctrica, que se muestran en la figura 22.17 (parte inferior). Las líneas de fuerza que se ven en la figura representan una pequeña cantidad entre la infinidad de líneas posibles que indican la dirección del campo. La figura es una representación bidimensional de algo que existe en tres dimensiones. Donde las líneas están más alejadas, el campo es más débil. Para una carga aislada, las líneas se prolongan hasta el infinito; para dos o más cargas opuestas, representaremos las líneas como si salieran de una carga positiva y terminarían en una carga negativa. Algunas configuraciones del campo eléctrico se presentan en la figura 22.18; mientras que en la figura 22.19 se ven imágenes de distribuciones de campo. Las imágenes muestran trozos de hilo suspendidos en un baño de aceite que rodea a conductores con cargas. Los extremos de los hilos se cargan por inducción, y tienden a alinearse extremo con extremo con las líneas del campo, como las limaduras de hierro en un campo magnético.

El concepto de campo eléctrico nos ayuda no sólo a comprender las fuerzas entre los cuerpos estacionarios cargados y aislados, sino también lo que sucede cuando se mueven las cargas. Cuando esto sucede, su movimiento se comunica

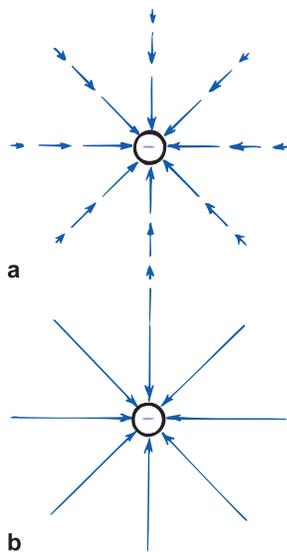
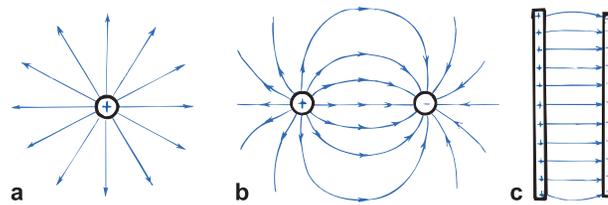


FIGURA 22.17

Figura interactiva

Representaciones del campo eléctrico en torno a una carga negativa. a) Una representación vectorial. b) Una representación con líneas de fuerza.

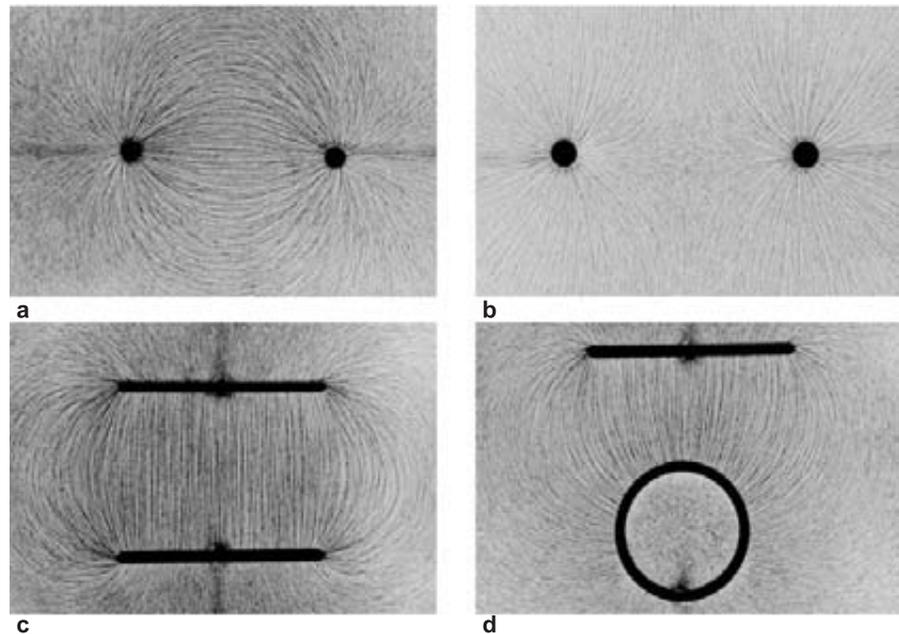
<sup>6</sup>La carga de prueba es tan pequeña que no influye significativamente sobre el campo que se mide. Recuerda que al estudiar el calor tuvimos una necesidad parecida de un termómetro de masa pequeña para medir la temperatura de cuerpos con masas mayores.



**FIGURA 22.18** [Figura interactiva](#)

Algunas configuraciones de campos eléctricos. *a*) Las líneas de fuerza emanan de una sola partícula con carga positiva. *b*) Las líneas de fuerza entre un par de cargas iguales en cantidad pero opuestas. Observa que las líneas emanan de la carga positiva y terminan en la carga negativa. *c*) Líneas de fuerza uniformes entre dos placas paralelas con carga opuesta.

a los cuerpos cargados vecinos, en forma de una perturbación del campo. La perturbación emana del cuerpo cargado que acelera, y se propaga a la velocidad de la luz. Veremos que el campo eléctrico es un almacén de energía, y que la energía se puede transportar a largas distancias en un campo eléctrico. La energía que se propaga en un campo eléctrico se puede dirigir a través de alambres metálicos, y guiarse en ellos. O bien, puede juntarse con un campo magnético para atravesar el espacio vacío. En el capítulo siguiente regresaremos a esta idea, y después explicaremos la radiación electromagnética.



**FIGURA 22.19**

El campo eléctrico debido a un par de conductores con carga se muestra con hebras suspendidas en un baño de aceite que rodea a los conductores. Observa que las hebras se alinean con extremo con extremo siguiendo la dirección del campo eléctrico. *a*) Conductores con cargas iguales en cantidad y opuestas (como en la *figura 22.18b*). *b*) Conductores con cargas iguales en cantidad e idénticas. *c*) Placas con cargas opuestas. *d*) Cilindro y placa con cargas opuestas.

## HORNOS DE MICROONDAS

Imagina una caja con algunas pelotas de ping-pong en reposo entre algunas varillas. Ahora imagina que repentinamente las varillas oscilan de un lado a otro, y golpean a las pelotas de ping-pong que estuvieran cerca. Las pelotas adquieren energía y se mueven en todas direcciones. Un horno de microondas funciona de manera parecida. Las varillas son moléculas de agua, u otras moléculas polares, que se ponen a oscilar al ritmo de las microondas en la caja. Las pelotas de ping-pong son moléculas no polares que forman el grueso del alimento que se cocina.

Cada molécula de  $H_2O$  es un dipolo eléctrico que se alinea con un campo eléctrico, como una aguja de brújula se alinea con un campo magnético. Cuando se hace oscilar el campo eléctrico, las moléculas de  $H_2O$  oscilan también. Estas moléculas de  $H_2O$  se mueven con mucha energía cuando la frecuencia de la oscilación coincide con su frecuencia natural, es decir, cuando hay resonancia. El alimento se cocina gracias a una especie de "fricción cinética", cuando las moléculas oscilantes de  $H_2O$  (u otras moléculas polares) imparten movimiento

térmico a las moléculas que las rodean. La caja de metal refleja a las microondas de aquí para allá por todo el horno, para apresurar el calentamiento.

El papel seco, los utensilios de espuma u otros materiales que se recomiendan para usarse en los hornos de microondas no contienen agua, ni otras moléculas polares, de modo que las microondas los atraviesan sin causar efecto alguno. Es igual con el hielo, donde las moléculas de  $H_2O$  están fijas en su posición y no pueden girar de aquí para allá.

Hay que tener cuidado cuando el agua hierve en un horno de microondas. En ocasiones el agua puede calentarse más rápido de lo que tardan en formarse las burbujas, y entonces el agua se calienta más allá de su punto de ebullición: ¡estaría supercaliente! Si el agua se agita o se mueve lo suficiente como para provocar que las burbujas se formen rápidamente, éstas expulsarán violentamente el agua caliente de su recipiente y podría dañar el rostro de alguien.

## Blindaje eléctrico (opcional)

Una diferencia importante entre campos eléctricos y gravitacionales es que los campos eléctricos se pueden confinar con diversos metales, mientras que los campos gravitacionales no. La cantidad de confinamiento, o blindaje, depende del material que se use para tal objetivo. Por ejemplo, el aire hace que el campo eléctrico entre dos objetos cargados sea ligeramente más débil de lo que sería en el vacío; en tanto que si entre objetos se pone aceite, el campo puede reducirse hasta casi cien veces. Los metales pueden confinar por completo un campo eléctrico. Cuando no pasa corriente por un metal, el campo eléctrico en su interior es cero, independientemente de la intensidad de campo fuera de él.

Por ejemplo, imagina electrones sobre una esfera metálica. Debido a su repulsión mutua, los electrones se repartirán uniformemente sobre la superficie externa de la esfera. No es difícil ver que la fuerza eléctrica que se ejerce sobre una carga de prueba en el centro exacto de la esfera es cero, porque las fuerzas opuestas se equilibran en todas direcciones. Es interesante que la anulación total sucede en cualquier lugar del interior de una esfera conductora. Para entenderlo mejor se requiere un poco más de razonamiento, así como la ley del inverso del cuadrado y algo de geometría. Imagina que la carga de prueba está en el punto P de la figura 22.20. La carga de prueba está a una distancia doble del lado izquierdo de la esfera cargada que del lado derecho. Si la fuerza eléctrica entre la carga de prueba y las cargas sólo dependiera de la distancia, esa carga de prueba sólo sería atraída con la cuarta parte de fuerza hacia el lado izquierdo, que la fuerza hacia el lado derecho. (Recuerda la ley del inverso del cuadrado: dos veces más lejos significa  $1/4$  del efecto, tres veces más lejos significa  $1/9$  del efecto, y así sucesivamente.) Sin embargo, la fuerza también depende de la cantidad de carga. En la figura, los conos que van del punto P a las áreas A y B tienen el mismo ángulo en su vértice, pero uno tiene el doble de la altura del otro. Eso quiere decir que el área A en la base del cono más largo tiene cuatro veces el área B en la base del cono más corto, y eso se cumple para cualquier ángulo del vértice. Como  $1/4$  de 4 es igual a 1, una carga de prueba en P es atraída

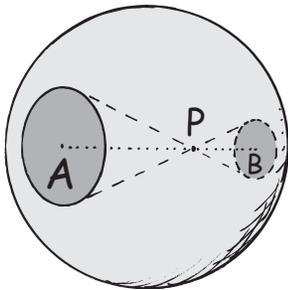


FIGURA 22.20

La carga de prueba en P es atraída exactamente igual hacia la mayor cantidad de carga de la región más lejana A, que hacia la menor cantidad de carga en la región más cercana B. La fuerza neta sobre la carga de prueba es cero, ahí o en cualquier parte dentro del conductor. El campo eléctrico en todos los lugares del interior también es cero.

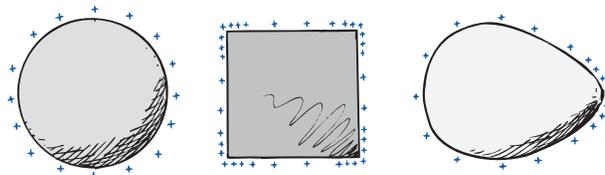


FIGURA 22.21

La carga eléctrica se distribuye en la superficie de todos los conductores, de tal modo que el campo eléctrico dentro del conductor es cero.



FIGURA 22.22

Los electrones del relámpago se repelen mutuamente hacia la superficie metálica externa. Aunque el campo eléctrico producido puede ser muy grande fuera del coche, el campo eléctrico neto dentro del vehículo es cero.

por igual hacia cada lado. Hay anulación. Se aplica un argumento parecido si los conos que salen del punto P se orientan en cualquier dirección. Hay una anulación completa en todos los puntos del interior de la esfera. (Recuerda este mismo argumento en el capítulo 8, para la anulación de la gravedad dentro de un planeta hueco. La esfera metálica se comporta igual, sea hueca o maciza, debido a que toda su carga se reúne en su superficie externa.)

Si el conductor no es esférico, la distribución de la carga no será uniforme. La distribución de la carga sobre conductores de diversas formas se muestra en la figura 22.21. Por ejemplo, la mayoría de la carga sobre un cubo conductor se repele mutuamente hacia las esquinas. Lo notable es esto: que la distribución exacta de la carga sobre la superficie de un conductor es tal que el campo eléctrico en cualquier lugar dentro del conductor es cero. Imagínatelo de la siguiente forma. Si hubiera un campo eléctrico dentro de un conductor, los electrones libres en su interior se pondrían en movimiento. ¿Hasta dónde llegarían? Hasta que se estableciera el equilibrio, y eso equivale a decir que hasta que las posiciones de todos los electrones produzcan un campo cero dentro del conductor.

No nos podemos blindar contra la gravedad, porque la gravedad sólo atrae. No hay partes de gravedad que repelan para compensar las partes que atraen. Sin embargo, el blindaje de campos eléctricos es muy sencillo. Rodéate a ti mismo o lo que quieras blindar con una superficie conductora. Pon esa superficie en un campo eléctrico de cualquier intensidad. Las cargas libres de la superficie conductora se distribuirán sobre la superficie del conductor, en tal forma que todas las contribuciones del campo en el interior se anulen entre sí. Es la explicación de por qué ciertos componentes electrónicos están encerrados en cajas metálicas, y por qué ciertos cables tienen cubierta metálica: para blindarlos contra la actividad eléctrica en su exterior.

### EXAMÍNATE

En las cuatro imágenes de la figura 22.19, unas pequeñas hebras alineadas muestran muy bien los campos eléctricos. Pero dentro del cilindro de la figura 22.19d no están alineadas. ¿Por qué?

## Potencial eléctrico



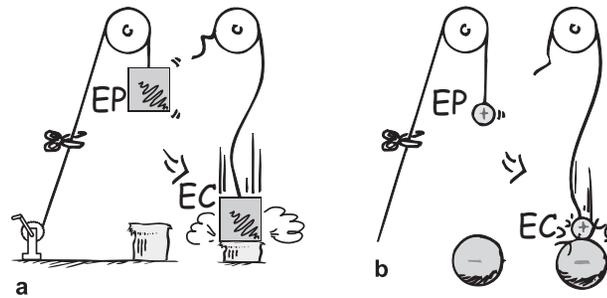
Al estudiar el capítulo 7 aprendimos que un objeto tiene energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. Asimismo, un objeto con carga tiene energía potencial eléctrica gracias a su lugar en un campo eléctrico. Al igual que se requiere trabajo para levantar un objeto masivo contra el campo gravitacional de la Tierra, se requiere trabajo para mover una partícula cargada

### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Dentro del cilindro está blindado el campo eléctrico; el cilindro se ve como un círculo en esta fotografía bidimensional. En consecuencia, las hebras no se alinean. El campo eléctrico dentro de cualquier conductor es cero, siempre y cuando no pase carga eléctrica por él.

FIGURA 22.23

a) Al soltarse, la EP (energía potencial gravitacional) de una masa sostenida en un campo gravitacional se transforma en EC (energía cinética). b) Al soltarse, la EP de una partícula cargada mantenida en un campo eléctrico se transforma en EC. ¿Cómo se compara la EC adquirida en cada caso con la disminución de EP?



contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Ese trabajo cambia la energía potencial eléctrica de la partícula cargada.<sup>7</sup> Veamos la partícula pequeña a cierta distancia de una esfera con carga positiva, en la figura 22.24b. Si empujas la partícula para acercarla a la esfera, gastarás energía para vencer la repulsión eléctrica; esto es, efectuarás trabajo al empujar la partícula cargada contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo efectuado para mover la partícula hasta su nuevo lugar aumenta su energía. A la energía que posee la partícula en virtud de su ubicación se le llama **energía potencial eléctrica**. Si se suelta la partícula, acelera alejándose de la esfera, y su energía potencial se transforma en energía cinética.

Si ahora empujamos a una partícula con el doble de la carga efectuamos el doble de trabajo, por lo que la partícula con carga doble en el mismo lugar tiene el doble de energía potencial eléctrica que antes. Una partícula con tres veces la carga tiene tres veces la energía potencial; diez veces la carga, diez veces la energía potencial, y así sucesivamente. Más que manejar la energía potencial de un cuerpo cargado conviene, cuando se trabaja con partículas cargadas en campos eléctricos, considerar la energía potencial eléctrica *por unidad de carga*. Tan sólo se divide la cantidad de energía potencial eléctrica en cualquier caso entre la cantidad de carga. Por ejemplo, una partícula con diez veces la carga que otra, y en el mismo lugar, tendrá energía potencial eléctrica diez veces mayor; pero tener energía potencial diez veces mayor equivale a que la energía por unidad de carga sea igual. Al concepto de energía potencial por unidad de carga se le llama **potencial eléctrico**; es decir,

$$\text{Potencial eléctrico} = \frac{\text{energía potencial eléctrica}}{\text{carga}}$$

La unidad de medida del potencial eléctrico es el volt, por lo que al potencial eléctrico se le llama con frecuencia *voltaje*. Un potencial eléctrico de 1 volt (1 V) equivale a 1 joule (1 J) de energía por 1 coulomb (1 C) de carga.

$$1 \text{ volt} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Así, una batería de 1.5 volts cede 1.5 joules de energía por cada coulomb de carga que pasa por ella. Son comunes los nombres *potencial eléctrico* y *voltaje*, por lo que se puede usar cualquiera. En este libro, usaremos tales nombres de forma indistinta.

La importancia del potencial eléctrico (el voltaje) es que se le puede asignar un valor definido a determinado lugar. Se puede hablar de los potenciales eléctricos en distintos lugares de un campo eléctrico, haya cargas o no que ocupen

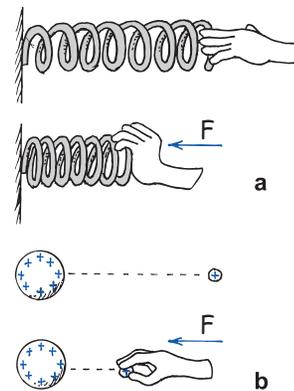


FIGURA 22.24

a) Al comprimirse el resorte tiene más EP mecánica. b) La partícula cargada, en forma parecida, tiene más EP eléctrica cuando es empujada para acercarla a la esfera cargada. En ambos casos, la mayor EP se debe al trabajo efectuado.

<sup>7</sup> Este trabajo es positivo si aumenta la energía potencial eléctrica de la partícula cargada, y negativo si la disminuye.



En resumen: *potencial eléctrico y potencial* significan lo mismo (energía potencial eléctrica por unidad de carga) en unidades de volts. Por otro lado, *diferencia de potencial* es lo mismo que *voltaje* (la *diferencia* en potencial eléctrico entre dos puntos), también en unidades de volts.

¡EUREKA!



FIGURA 22.25

De los dos cuerpos con carga cerca del domo cargado, el que tiene la mayor carga tiene la mayor EP eléctrica en el campo del domo. Pero el potencial eléctrico de cada uno es igual; es lo mismo para cualquier cantidad de carga en el mismo lugar. ¿Por qué?

esos lugares (una vez definida la posición de voltaje cero). Al igual que con los voltajes en varios lugares de un circuito eléctrico. En el siguiente capítulo verás que el lugar de la terminal positiva de una batería de 12 volts, se mantiene a un voltaje 12 volts mayor, que el lugar de la terminal negativa. Cuando un medio conductor conecta esas terminales con distinto voltaje, se moverán entre ellas cargas en el conductor.

### EXAMÍNATE

1. Si hubiera el doble de coulombs en la carga de prueba cerca de la esfera cargada de la figura 22.24, ¿la energía potencial eléctrica de la carga de prueba con respecto a la esfera cargada sería igual o sería del doble? ¿El potencial eléctrico de la carga de prueba sería igual o sería del doble?
2. ¿Qué quiere decir que tu automóvil tiene un acumulador de 12 volts?



El alto voltaje de baja energía es similar a las inofensivas chispas a alta temperatura que emiten las luces de bengala. Recuerda que la temperatura es energía cinética promedio por molécula, lo cual significa que la energía total es grande sólo para un gran número de moléculas. Asimismo, el alto voltaje significa una gran cantidad de energía sólo para una gran cantidad de carga.

¡EUREKA!

Frota un globo en tu cabello y quedará cargado negativamente, ¡quizás hasta con algunos miles de volts! Si la carga fuera de 1 coulomb, equivaldrían a varios miles de joules de energía. Sin embargo, 1 coulomb es una cantidad de carga muy grande. La de un globo frotado en el cabello se parece más, normalmente, a mucho menos que un millonésimo de coulomb. En consecuencia, la energía asociada con el globo cargado es muy, muy pequeña. Un alto voltaje equivale a gran cantidad de energía sólo si interviene una gran cantidad de carga. Hay una diferencia importante entre la energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico.

### COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El doble de coulombs harían que la carga de prueba tuviera el doble de energía potencial eléctrica (porque habría que efectuar doble trabajo para poner la carga en ese lugar). Pero el potencial eléctrico sería el mismo. Es porque el potencial eléctrico es la energía potencial eléctrica dividida entre la carga total. Por ejemplo, diez veces la energía dividida entre diez veces la carga da el mismo resultado, que dos veces la energía dividida entre dos veces la carga. El potencial eléctrico no es lo mismo que la energía potencial eléctrica. Asegúrate de que entiendes eso antes de continuar con tu estudio.
2. Significa que una de las terminales del acumulador tiene un potencial eléctrico de 12 V mayor que el otro. En el siguiente capítulo verás que también significa que cuando se conecta un circuito con esas terminales, cada coulomb de carga en la corriente que se produce adquirirá 12 J de energía cuando pase por el acumulador.



**FIGURA 22.26**

Aunque el potencial eléctrico (voltaje) del globo con carga es alto, la energía potencial eléctrica es baja, por la pequeña cantidad de carga. Entonces, cuando se descarga el globo, se transfiere muy poca energía.

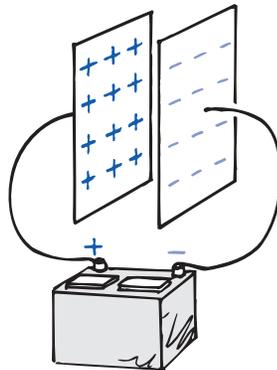
## Almacenamiento de la energía eléctrica (opcional)



Hay que estar al pendiente de la llegada de los condensadores para almacenar energía en los automóviles híbridos.

¡EUREKA!

La energía eléctrica se puede almacenar en un dispositivo común, que se llama **condensador** o **capacitor**, que hay en casi todos los circuitos eléctricos. Los condensadores se usan como almacenes de energía. La almacenan para hacer funcionar la *flash* en las cámaras fotográficas. La rápida liberación de energía es evidente en la corta duración del destello. Asimismo, pero en escala mayor, se almacenan enormes cantidades de energía en los bancos de condensadores que alimentan a láseres gigantes en algunos laboratorios de investigación.



**FIGURA 22.27**

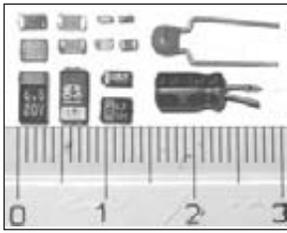
Un condensador consiste en dos placas metálicas paralelas a corta distancia entre sí. Cuando se conectan a un acumulador, las placas adquieren cargas iguales y opuestas. El voltaje entre las placas coincide entonces con la diferencia de potencial entre las terminales del acumulador.



**FIGURA 22.28**

Mona El Tawil-Nassar ajusta la demostración de las placas del condensador.

El condensador más sencillo es un par de placas conductoras separadas por una corta distancia, pero sin tocarse. Cuando las placas se conectan con algún dispositivo que las cargue, como el acumulador de la figura 22.27, pasan electrones de una placa a la otra. Eso sucede cuando la terminal positiva del acumulador tira de los electrones de la placa conectada a ella. Esos electrones, de hecho, son bombeados a través del acumulador, y van desde la terminal negativa hasta la placa opuesta. Las placas del condensador tienen entonces cargas iguales y opuestas: la placa positiva conectada con la terminal positiva del acumulador, y la placa negativa conectada con la terminal negativa. El proceso de carga se completa cuando la diferencia de potencial entre las placas es igual a la diferencia de potencial entre las terminales del acumulador, que es el voltaje del acumulador. Cuanto mayor sea el voltaje del acumulador y mayores y más próximas estén las placas, mayor será la carga que se pueda almacenar. En la práctica las placas pueden ser membranas metálicas delgadas separadas por una delgada hoja de papel. Este “emparedado de papel” se enrolla para ahorrar espacio, y se mete en un cilindro. En la figura 22.28 se ven varias clases de condensadores, entre ellos uno como el que acabamos de describir. (Consideraremos el papel de los condensadores en los circuitos en el siguiente capítulo.)



**FIGURA 22.29**  
Condensadores prácticos.

Un condensador cargado se descarga cuando entre las placas se forma una trayectoria conductora. La descarga de un condensador puede ser una experiencia desagradable si estás en el camino conductor. La transferencia de energía llega a ser fatal cuando implica altos voltajes, por ejemplo, en la fuente de poder de un aparato de TV, aun cuando éste se haya desconectado. Es la causa principal de tantos letreros de advertencia que tienen esos aparatos.

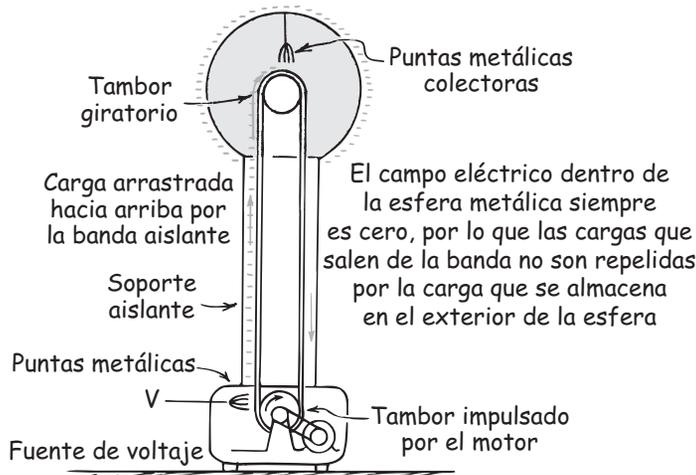
**EXAMÍNATE**

¿Cuál es la carga neta de un condensador con carga?

La energía almacenada en un condensador proviene del trabajo necesario para cargarlo. La energía se guarda en el campo eléctrico entre sus placas. Entre placas paralelas el campo eléctrico es uniforme, como los que se ven en las figuras 22.18c y 22.19c. Así, la energía almacenada en un condensador es la energía de su campo eléctrico. En el capítulo 25 veremos cómo la energía del Sol se irradia en forma de campos eléctricos y magnéticos. El hecho de que la energía esté contenida en los campos eléctricos es verdaderamente trascendental.

**Generador Van de Graaff (opcional)**

Para producir altos voltajes en los laboratorios, un aparato común es el *generador Van de Graaff*. Es una de las máquinas de rayos que solían usar los científicos locos en las viejas películas de ciencia ficción. En la figura 22.30 se muestra un esquema sencillo del generador Van de Graaff. Una esfera metálica grande y hueca está sostenida por un soporte aislante cilíndrico.



**FIGURA 22.30**  
Un modelo sencillo de un generador Van de Graaff.

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La carga neta de un condensador cargado es cero, porque las cargas en sus dos placas son iguales en magnitud y contrarias en signo. Aun cuando se descargue el condensador, por ejemplo, proporcionando una trayectoria para que fluya la carga entre las placas con carga opuesta, la carga neta del condensador seguirá siendo cero, porque entonces cada placa tendrá carga cero.



**FIGURA 22.31**  
Tanto la entusiasta física como el domo esférico del generador Van de Graaff se cargan con un alto voltaje. ¿Por qué se le eriza el cabello?

Una banda de caucho, impulsada por un motor y dentro del soporte, pasa por un conjunto de agujas metálicas, parecido a un peine, que se mantienen a un gran potencial negativo en relación con la tierra. La descarga a través de las puntas deposita un suministro continuo de electrones sobre la banda, que sube hacia la esfera conductora hueca. Como el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga pasa hacia las puntas metálicas (pararrayos diminutos) y se deposita en el interior de la esfera. Como los electrones se repelen entre sí, pasan a la superficie externa de la esfera. La carga estática siempre está en la superficie externa de cualquier conductor. Por eso, el interior permanece sin carga, y puede recibir más electrones conforme los va subiendo la banda. El proceso es continuo y la carga se acumula hasta que el potencial negativo en la esfera es mucho mayor que el de la fuente de voltaje en la parte inferior; ese potencial es del orden de millones de volts.

Una esfera de 1 metro de radio puede llevarse hasta un potencial de 3 millones de volts sin que haya descarga eléctrica al aire. El voltaje se incrementa al aumentar el radio de la esfera, o al colocar todo el sistema en un recipiente con gas a alta presión. Los generadores Van de Graaff producen voltajes de hasta 20 millones de volts. Esos voltajes se usan para acelerar partículas cargadas que se puedan usar como proyectiles para penetrar los núcleos de los átomos. Tocar uno de esos generadores es una experiencia que puede erizar los cabellos.

## Resumen de términos

- Aislante** Un material sin partículas cargadas libres, a través del cual las cargas no fluyen con facilidad.
- Campo eléctrico** Fuerza por unidad de carga; se puede considerar como una “aura” que rodea a los objetos cargados, y es un almacén de energía eléctrica. En torno a un cuerpo cargado, el campo disminuye con la distancia siguiendo la ley del cuadrado inverso, como un campo gravitacional. Entre placas paralelas con carga opuesta, el campo eléctrico es uniforme.
- Carga por contacto** Transferencia de carga eléctrica entre objetos mediante frotamiento o simple contacto.
- Carga por inducción** Redistribución de cargas eléctricas en los objetos causada por la influencia eléctrica de un objeto cargado cercano sin estar en contacto.
- Condensador** Dispositivo eléctrico; en su forma más sencilla es un par de placas paralelas conductoras, separadas por una distancia pequeña, que almacena carga eléctrica y energía.
- Conductor** Cualquier material que contiene partículas cargadas libres, que fluyen con facilidad a través de él, cuando una fuerza eléctrica actúa sobre ellas.
- Conservación de la carga** La carga eléctrica no se crea ni se destruye. La carga total antes de una interacción es igual a la carga total después de ella.
- Coulomb** La unidad SI de la carga eléctrica. Un coulomb (símbolo C) equivale a la carga total de  $6.25 \times 10^{18}$  electrones.
- Eléctricamente polarizado** Término que se aplica a un átomo o una molécula donde se alinean las cargas, de tal modo que un lado tiene un ligero exceso de carga positiva, mientras que el otro tiene un ligero exceso de carga negativa.
- Electricidad** Término general para indicar fenómenos eléctricos, como la relación que tiene la gravedad con los fenómenos gravitatorios, o la sociología con los fenómenos sociales.
- Electrostática** Estudio de la carga eléctrica en reposo (no en movimiento, como en las corrientes eléctricas).
- Energía potencial eléctrica** La energía que posee un objeto cargado gracias a su ubicación en un campo eléctrico.
- Ley de Coulomb** La relación entre la fuerza y la carga eléctrica, y la distancia:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

Si las cargas son de igual signo, la fuerza es de repulsión; si tienen signos distintos, la fuerza es de atracción.

- Potencial eléctrico** La energía potencial eléctrica por unidad de carga; se expresa en volts y con frecuencia se le llama *voltaje*:  
 Voltaje = energía potencial eléctrica/cantidad de carga

**Semiconductor** Dispositivo compuesto de un material no sólo con propiedades de aislante y de conductor, sino también con resistencia que cambia repentinamente cuando cambian otras condiciones, como la temperatura, el voltaje, y los campos eléctricos y magnéticos.

**Superconductor** Material que es un perfecto conductor con cero resistencia al flujo de carga eléctrica.

## Lecturas sugeridas

- Brands, H. W. *The First American: The Life and Times of Benjamin Franklin*. Nueva York: Doubleday, 2000.
- Bodanis, David. *Electric Universe—The Shocking True Story of Electricity*. Nueva York: Crown, 2005.

## Preguntas de repaso

### Fuerzas eléctricas

- ¿Por qué la fuerza gravitacional predomina sobre las fuerzas eléctricas entre la Tierra y la Luna?

### Cargas eléctricas

- ¿Qué parte de un átomo tiene carga *positiva*, y qué parte tiene carga *negativa*?
- ¿Cómo se compara la carga de un electrón con la de otro electrón? ¿Y cómo se compara con la de un protón?
- ¿Cómo se comparan, normalmente, la cantidad de protones en el núcleo atómico con la cantidad de electrones en torno al núcleo?
- ¿Cuál es normalmente la carga neta de un átomo?

### Conservación de la carga

- ¿Qué es un ion positivo? ¿Un ion negativo?
- ¿Qué quiere decir que se *conserva* la carga?
- ¿Qué quiere decir que la carga está *cuantizada*?
- ¿Qué partícula tiene exactamente una unidad cuántica de carga?

### Ley de Coulomb

- ¿Cómo se compara un *coulomb* con la carga de un solo electrón?
- ¿En qué se parece la ley de Coulomb a la ley de Newton de la gravitación? ¿En qué difieren?

### Conductores y aislantes

- ¿Por qué los metales son buenos conductores tanto de calor como de electricidad?
- ¿Por qué los materiales como el vidrio y el caucho son buenos aislantes?

### Semiconductores

- ¿En qué difiere un *semiconductor* de un *conductor* y de un *aislante*?

15. ¿De qué está formado un transistor y cuáles son algunas de sus funciones?

### Superconductores

16. En comparación con el flujo en los conductores ordinarios, ¿en qué difiere el flujo de corriente en un superconductor?

### Carga

17. ¿Qué les sucede a los electrones en cualquier proceso de cargado?

### Carga por fricción y por contacto

18. Menciona un ejemplo de algo que se cargue por fricción.  
19. Describe un ejemplo de algo que se cargue por contacto.

### Carga por inducción

20. Menciona un ejemplo de algo que se cargue por inducción.  
21. ¿Qué función tiene el pararrayos?

### Polarización de carga

22. ¿En qué difiere un objeto eléctricamente polarizado de un objeto eléctricamente cargado?  
23. ¿Qué es un dipolo eléctrico?

### Campo eléctrico

24. Describe dos ejemplos de campos de fuerzas comunes.  
25. ¿Cómo se define la magnitud de un campo eléctrico?  
26. ¿Cómo se define la dirección de un campo eléctrico?

### Blindaje eléctrico

27. ¿Por qué no hay campo eléctrico en el centro de un conductor esférico cargado?  
28. ¿Existe un campo eléctrico dentro de un conductor esférico cargado, en otros puntos que no sean su centro?  
29. Cuando las cargas se repelen mutuamente y se distribuyen sobre la superficie de los conductores, ¿cuál es el efecto dentro del conductor?

### Potencial eléctrico

30. ¿Cuánta energía se agrega a cada coulomb de carga que pasa por una batería de 1.5 volts?  
31. Un globo se puede cargar con facilidad hasta varios miles de volts. ¿Ello quiere decir que tiene varios miles de joules energía? Explica por qué.

### Almacenamiento de la energía eléctrica

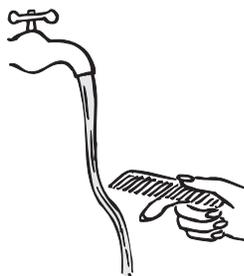
32. ¿Cómo se compara la carga de una de las placas de un condensador con la de la otra placa?  
33. ¿Dónde se almacena la energía en un condensador?

### Generador Van de Graaff

34. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en el interior del domo de un generador Van de Graaff cargado?

## Proyectos

- Demuestra la carga por fricción y la descarga a través de puntas con un amigo parado en el otro extremo de un recinto alfombrado. Arrastra los pies por la alfombra al dirigirte hacia la otra persona, hasta que sus narices queden cerca. Puede ser una experiencia deliciosa, dependiendo de lo seco que esté el aire y de lo afiladas que sean sus narices.
- Frota con vigor un peine contra tu cabello o sobre una prenda de lana, y acércalo a un pequeño y uniforme chorro de agua. ¿El chorro se desvía?

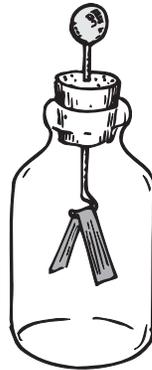


- Escribe una carta a tu abuelito y cuéntale por qué él viaja seguro en el interior de un automóvil durante una tormenta con relámpagos.

## Ejercicios

- No sentimos las fuerzas gravitacionales entre nosotros y los objetos que nos rodean, porque esas fuerzas son extremadamente pequeñas. En cambio, las fuerzas eléctricas son gigantescas. Puesto que nosotros y los objetos que nos rodean estamos formados por partículas cargadas, ¿por qué normalmente no sentimos fuerzas eléctricas?
- En el nivel atómico, ¿qué significa decir que algo está eléctricamente cargado?
- ¿Por qué la carga generalmente se transfiere a través de electrones y no de protones?
- ¿Por qué si los objetos contienen grandes cantidades de electrones, por lo general, no están cargados eléctricamente?
- ¿Por qué las prendas se pegan con frecuencia entre sí después de haber estado girando en una secadora?
- ¿Por qué el polvo es atraído hacia un CD que se limpia con un paño seco?
- Cuando sacas tu traje de lana de la bolsa de la tintorería, la bolsa se carga positivamente. Explica cómo sucede eso.

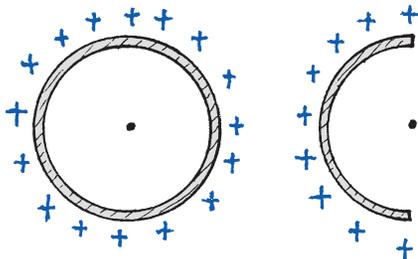
8. El plástico para envoltura se carga eléctricamente cuando se saca del empaque. Como resultado, es atraído hacia objetos tales como recipientes de alimentos. ¿El plástico se adhiere mejor a los recipientes de plástico o a los metálicos?
9. Cuando te peinas, sacas electrones de tu cabello, que se quedan en tu peine. Entonces, ¿tu cabello queda con carga positiva o negativa? ¿Y el peine?
10. En algunas casetas de cobro un alambre metálico delgado sobresale del asfalto y hace contacto con los automóviles antes de que lleguen al lugar de cobro. ¿Cuál es el objetivo de ese alambre?
11. ¿Por qué los neumáticos de los camiones que transportan gasolina y otros líquidos inflamables, se fabrican para ser conductores eléctricos?
12. Un electroscopio es un aparato sencillo formado por una esfera metálica unida con un conductor a dos hojas delgadas de lámina metálica, dentro de un frasco para protegerlas de las turbulencias del aire, como se ve en la figura. Cuando se toca la bola con un cuerpo cargado, las hojas, que normalmente cuelgan directo hacia abajo, se abren. ¿Por qué? (Los electroscopios no sólo se usan para detectar cargas, sino también para medirlas: cuanto más carga se transfiera a la esfera, las hojas se abrirán más.)
13. Las hojas de un electroscopio cargado bajan cuando pasa el tiempo. A mayores alturas bajan más rápido. ¿Por qué? (*Sugerencia:* esta observación fue la que primero indicó la existencia de los rayos cósmicos.)
14. ¿Es necesario que un cuerpo cargado toque realmente la esfera de un electroscopio para que se abran las hojas? Defiende tu respuesta.
15. Estrictamente hablando, cuando un objeto adquiere una carga positiva por transferencia de electrones, ¿qué sucede con su masa? ¿Y cuándo adquiere una carga negativa? ¡Piensa en pequeño!
16. Estrictamente hablando, ¿una moneda será un poco más masiva cuando tiene carga negativa o cuando tiene carga positiva? Explica por qué.
17. En un cristal de sal hay electrones e iones positivos. ¿Cómo se compara la carga neta de los electrones con la carga neta de los iones? Explica por qué.
18. ¿Cómo puedes cargar negativamente un objeto sólo con la ayuda de otro objeto con carga positiva?
19. Es relativamente fácil sacar los electrones externos de un átomo pesado, como el de uranio (que entonces se transforma en un ion uranio); pero es muy difícil sacar sus electrones internos. ¿Por qué crees que sea así?



20. Cuando un material se frota contra otro, los electrones saltan con facilidad entre ambos, pero no los protones. ¿Por qué? (Piensa en términos atómicos.)
21. Si los electrones fueran positivos y los protones fueran negativos, ¿la ley de Coulomb se escribiría igual o diferente?
22. ¿Qué te indica la ley del inverso cuadrado acerca de la relación entre fuerza y distancia?
23. Los cinco mil millones de billones ( $5 \times 10^{21}$ ) de electrones que se mueven libremente en una moneda se repelen entre sí. ¿Por qué no salen despedidos de la moneda?
24. ¿Cómo cambia la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas, cuando se colocan a la mitad de su distancia original? ¿Y a un tercio de la distancia?
25. ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza eléctrica entre un par de partículas cargadas cuando se acercan a la mitad de su distancia original? ¿Y a un cuarto de su distancia original? ¿Y cuando se alejan a cuatro veces su distancia original? (¿Qué ley determina tus respuestas?)
26. Cuando se duplica la distancia entre un par de partículas cargadas, ¿qué sucede con la fuerza entre ellas? ¿Depende del signo de las cargas? ¿Qué ley apoya tu respuesta?
27. Cuando se duplica la carga en sólo una de las partículas que integran un par, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿El efecto depende del signo de la carga?
28. Cuando se duplica la carga en ambas partículas de un par, ¿qué efecto tiene esto sobre la fuerza entre ellas? ¿Depende del signo de la carga?
29. La constante de proporcionalidad  $k$  en la ley de Coulomb es gigantesca, en unidades ordinarias; mientras que  $G$ , la constante de proporcionalidad en la ley de la gravitación de Newton es diminuta. ¿Qué indica eso acerca de las magnitudes relativas de esas dos fuerzas?
30. ¿Cómo es que las líneas del campo eléctrico indican la intensidad de éste?
31. ¿Cómo se indica la dirección de un campo eléctrico con las líneas del campo eléctrico?
32. Imagina que la intensidad del campo eléctrico en torno a una carga puntual aislada tiene determinado valor a 1 m de distancia. ¿Cómo será en comparación la intensidad del campo eléctrico a 2 m de distancia de la carga puntual? ¿Qué ley determina tu respuesta?
33. ¿En qué se diferencia un semiconductor de un conductor o de un aislante?
34. En el fenómeno de superconductividad, ¿qué sucede con la resistencia eléctrica a bajas temperaturas?
35. Las mediciones indican que hay un campo eléctrico que rodea a la Tierra. Su magnitud es aproximada-

mente de 100 N/C en la superficie terrestre, y apunta hacia dentro, es decir, hacia el centro de la Tierra. A partir de esta información, ¿es posible saber si la Tierra tiene carga positiva o negativa?

36. ¿Por qué los pararrayos normalmente son más altos que los edificios a los que protegen?
37. ¿Por qué no se aconseja que los golfistas usen calzado con tacos (*spikes*) metálicos en un día con tormenta?
38. Si te atrapa una tormenta en la intemperie, ¿por qué no te debes parar bajo un árbol? ¿Puedes imaginar algún motivo del porqué no te debes parar con las piernas separadas? ¿O por qué puede ser peligroso acostarte? (*Sugerencia:* imagina la diferencia de potencial eléctrico.)
39. Si se aplica un campo eléctrico suficientemente grande, hasta un aislante conducirá la corriente eléctrica; prueba de ello son las descargas de relámpagos por el aire. Explica cómo sucede eso, teniendo en cuenta las cargas opuestas en un átomo y la forma en que sucede la ionización.
40. ¿Por qué un buen conductor de calor es también buen conductor de electricidad?
41. Si frotas un globo inflado contra tu cabello y lo colocas frente a una puerta, ¿por qué mecanismo se adhiere? Explica tu respuesta.
42. ¿Un átomo cargado (ion) cómo puede atraer a un átomo neutro?
43. Cuando el chasis de un automóvil entra a una caseta de pintura, se rocía pintura alrededor de él. Cuando a la carrocería se le da una carga eléctrica repentina tal que la niebla de pintura sea atraída hacia él, ¡listo! el automóvil queda pintado en forma rápida y uniforme. ¿Qué tiene que ver con esto el fenómeno de la polarización?
44. Si pones un electrón libre y un protón libre en el mismo campo eléctrico, ¿cómo se comparan las fuerzas que actúan sobre ellos? ¿Y las aceleraciones? ¿Y las direcciones de movimiento?
45. Dos piezas de plástico, una en forma de anillo completo y la otra con forma de la mitad de un anillo, tienen los mismos radio y densidad de carga. ¿Cuál campo eléctrico en el centro tiene la mayor magnitud? Argumenta tu respuesta.

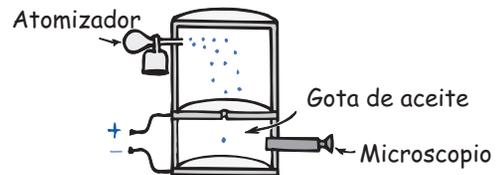


46. ¿Por qué la magnitud del campo eléctrico es cero a medio camino entre cargas puntuales idénticas?

47. Imagina un protón en reposo a cierta distancia de una placa con carga negativa. Se suelta y choca contra la placa. A continuación imagina un caso parecido de un electrón en reposo, a la misma distancia de una placa con carga igual y opuesta. ¿En qué caso la partícula en movimiento tendrá mayor rapidez en el momento del choque? ¿Por qué?
48. Un vector de campo gravitacional apunta hacia la Tierra; un vector de campo eléctrico apunta hacia un electrón. ¿Por qué los vectores de campo eléctrico apuntan alejándose de los protones?
49. ¿Mediante qué mecanismo específico los trozos de hebras se alinean en los campos eléctricos de la figura 22.19?
50. Imagina que un archivero metálico está cargado. ¿Cómo se compara la concentración de carga eléctrica en las esquinas del archivero con la concentración en sus caras planas?
51. Si gastas 10 joules de trabajo para empujar un coulomb de carga contra un campo eléctrico, ¿cuál será su voltaje con respecto a su posición inicial? Cuando lo sueltas, ¿cuál será el valor de energía cinética cuando pasa por su punto de partida?
52. No te daña el contacto con una esfera metálica cargada, aunque su voltaje pueda ser muy alto. ¿La causa de ello se parece al porqué no te dañan las luces de Bengala a más de 1,000°C en la Navidad? Defiende tu respuesta en función de las energías que intervienen.
53. ¿Cuál es el voltaje en el lugar de una carga de 0.0001 C que tiene una energía potencial eléctrica de 0.5 J (medidas ambas en relación con el mismo punto de referencia)?
54. ¿Qué seguridad ofrece quedarse dentro del automóvil durante una tormenta con relámpagos?
55. ¿Por qué las cargas en las placas opuestas de un condensador tienen siempre la misma magnitud?
56. ¿Qué cambios harías en las placas de un condensador de placas paralelas, que funcionara con un voltaje fijo, para almacenar más energía en el condensador?
57. ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un condensador de alto voltaje incluso después de que se haya apagado el circuito de carga?
58. Un electrón volt, eV, es una unidad de energía. ¿Cuál unidad es más grande, un GeV o un MeV?
59. ¿Sentirías efectos eléctricos si estuvieras dentro de la esfera cargada de un generador Van de Graaff? ¿Por qué?
60. Un amigo dice que la razón por la que se le eriza a uno el cabello al tocar un generador Van de Graaff cargado es sólo porque los cabellos se cargan, y son suficientemente livianos como para que sea visible la repulsión entre ellos. ¿Estás de acuerdo o no? ¿Por qué?

## Problemas

- Dos cargas puntuales están a 6 cm de distancia. La fuerza de atracción entre ellas es 20 N. Calcula la fuerza entre ellas cuando estén a 12 cm de distancia. ¿Por qué puedes resolver este problema sin conocer las magnitudes de las cargas?
- Si las cargas que se atraen entre sí en el problema anterior tienen igual magnitud, ¿cuál será la magnitud de cada una?
- Dos pastillas, cada una con una carga de 1 microcoulomb ( $10^{-6}$  C), están a 3 cm (0.03 m) de distancia. ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre ellas? ¿Qué masa debería tener un objeto para sentir esa misma fuerza en el campo gravitacional terrestre?
- Los especialistas en electrónica no tienen en cuenta la fuerza de gravedad sobre los electrones. Para averiguar por qué, calcula la fuerza de la gravedad terrestre sobre un electrón y compárala con la fuerza que ejerce sobre él un campo eléctrico de 10,000 V/m (es relativamente pequeño ese campo). La masa y la carga de un electrón las puedes encontrar en los forros de este libro.
- Los físicos atómicos no tienen en cuenta el efecto de la gravedad dentro de un átomo. Para saber por qué, calcula y compara las fuerzas gravitacional y eléctrica entre un protón y un electrón a  $10^{-10}$  m de distancia entre sí. Las cargas y las masas necesarias las puedes encontrar en los forros de este libro.
- Una gotita de una impresora de inyección de tinta lleva una carga de  $1.6 \times 10^{-10}$  C, y es desviada hacia el papel por una fuerza de  $3.2 \times 10^{-4}$  N. Calcula la intensidad del campo eléctrico que produce esta fuerza.
- La diferencia de potencial entre una nube de tormenta y el suelo es 100 millones de volts. Si en un relámpago pasa una carga de 2 C de la nube al suelo, ¿cuál será el cambio de energía potencial eléctrica de la carga?
- En la esfera metálica de una máquina de Van de Graaff se almacena 0.1 J de energía. Con una chispa que conduce 1 microcoulomb ( $10^{-6}$  C) se descarga esa esfera. ¿Cuál era el potencial eléctrico de la esfera en relación con la tierra?
- En 1909 Robert Millikan determinó por primera vez la carga de un electrón, con su famoso experimento de la gota de aceite. En el experimento se rocían gotas diminutas de aceite en un campo eléctrico uniforme entre un par de placas horizontales con carga opuesta. Las gotas se observan con un microscopio, y el campo eléctrico se ajusta de tal modo que la fuerza hacia arriba, ejercida en algunas gotas con carga negativa, es exactamente la necesaria para contrarrestar la fuerza de la gravedad, hacia abajo. Esto es, cuando están suspendidas, la fuerza  $qE$  hacia arriba es exactamente igual a  $mg$ . Millikan midió con precisión las cargas de muchas gotas de aceite, y determinó que los valores encontrados eran múltiplos enteros de  $1.6 \times 10^{-19}$  C, que es la carga del electrón. Obtuvo el Premio Nobel por haberlo determinado. Preguntas: *a)* Si una gota con  $1.1 \times 10^{-14}$  kg de masa queda estacionaria en un campo eléctrico de  $1.68 \times 10^5$  N/C, ¿cuál será la carga de esa gota? *b)* ¿Cuántos electrones adicionales hay en esta gota (tomando en cuenta la carga del electrón que ya se conoce)?



- Calcula el cambio de voltaje cuando *a)* un campo eléctrico efectúa 10 J de trabajo sobre una carga de 0.0001 C, y *b)* el mismo campo eléctrico efectúa 24 J de trabajo sobre una carga de 0.0002 C.