

FÍSICA PARA LAS CIENCIAS DE LA VIDA

CROMER, A.

Barcelona, Reverté, 1996

Caps. 17-18 (págs. 390-439)

CAMPO ELÉCTRICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA

Capítulo 17 Electricidad

La electricidad es una fuerza fundamental de la naturaleza, análoga a la gravedad. Pero mientras que la fuerza de la gravedad entre dos objetos depende de su masa, la fuerza eléctrica entre dos objetos depende de su *carga*. La carga es una propiedad básica de las partículas elementales (electrones, protones y neutrones) que componen toda la materia ordinaria. De hecho, lo que mantiene al átomo unido es la fuerza eléctrica entre los protones y electrones del átomo.

La utilización práctica de la electricidad es posible porque somos capaces de producir y controlar un flujo constante de partículas cargadas. En este capítulo discutimos los principios de la electricidad que se necesitan para entender algunos aparatos, como por ejemplo los tubos de rayos X y de rayos catódicos, los cuales utilizan un flujo de electrones a gran velocidad dentro de un recipiente al que se le ha hecho el vacío. En los capítulos siguientes hablamos de algunos aparatos que utilizan el flujo de electrones en un hilo conductor.

17.1. LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

Todas las fuerzas de las que se ha hablado en este libro, como la de rozamiento, empuje y tensión superficial, son los efectos observables de las fuerzas entre los átomos de los objetos que intervienen. Estas fuerzas observables no se consideran que son fundamentales porque en principio se pueden analizar en función de fuerzas atómicas.* Incluso las fuerzas entre átomos no son fundamentales porque aún se pueden analizar en función de las fuerzas existentes entre las partículas que componen los átomos.

Hay tres clases de partículas dentro de un átomo: *protones*, *neutrones* y *electrones*. Los protones y los neutrones están fuertemente unidos entre sí para formar el denso *núcleo* central del átomo. El núcleo contiene más del 99,95 % de la masa del átomo, pero ocupa solamente una pequeña fracción del volumen del átomo. Los electrones, que pululan en órbitas alrededor del núcleo, contienen el 0,05 % restante de la masa y ocupan la mayor parte del volumen. La Fig. 17.1 muestra un diagrama esquemático de un átomo de carbono.** En la parte VI se dan los detalles de la estructura de los átomos y núcleos.

Como los protones, neutrones y electrones no están compuestos de partículas aún más pequeñas, se les llama partículas *elementales* y las fuerzas que existen entre ellos son las fuerzas fundamentales de

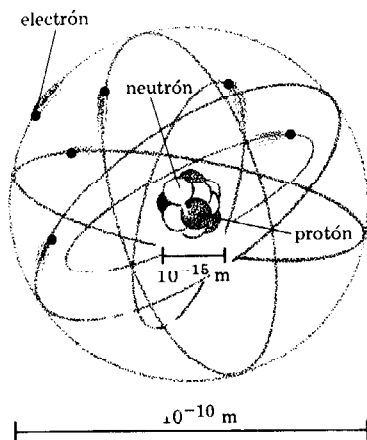


FIGURA 17.1

Diagrama esquemático de un átomo de carbono. Seis electrones dan vueltas alrededor de un núcleo compuesto de seis protones y seis neutrones.

* En el Apart. 9.2. se da un somero análisis de la tensión superficial en función de las fuerzas atómicas.

** Si se hiciese un dibujo a escala del átomo con el núcleo del tamaño que aparece en la Fig. 17.1, las órbitas de los electrones exteriores serían del tamaño de un estadio de fútbol.

la naturaleza. Toda la materia ordinaria está compuesta de estas partículas elementales y por lo tanto todas las fuerzas se pueden entender, en última instancia, en función de las fuerzas fundamentales que existen entre ellas. En la actualidad se conocen cuatro fuerzas fundamentales:

1. Fuerza gravitacional (gravedad).
2. Fuerza electromagnética (electricidad y magnetismo).
3. Fuerza nuclear.
4. Fuerza débil.

En cierto sentido, la fuerza gravitacional es la fuerza fundamental más débil porque el módulo de la fuerza gravitatoria entre dos partículas elementales es mucho más pequeño que el módulo de cualquier otra fuerza fundamental. La fuerza de la gravedad entre partículas elementales es de hecho tan débil que no tiene efecto medible sobre el comportamiento de estas partículas dentro del átomo. Sólo un objeto de tamaño descomunal tiene masa suficiente para ejercer una fuerza gravitatoria importante sobre un átomo. Como esta fuerza es atractiva, un objeto así atrae a los átomos que se hallan en el espacio que le rodea. La acumulación de estos átomos aumenta la masa del objeto, de modo que también aumenta la fuerza gravitacional que puede ejercer. Como consecuencia, el objeto todavía atrae más átomos lo cual hace que su masa aumente aún más. Así es cómo inmensos conglomerados de materia, tales como las estrellas y galaxias de espiral, se forma a partir del polvo y de los átomos esparcidos por el espacio. La gravedad es con mucho la fuerza más importante que controla la estructura de los cuerpos celestes.

La fuerza electromagnética es la fuerza principal que determina la estructura de los átomos. Los electrones se mantienen en órbita alrededor del núcleo por atracción eléctrica, del mismo modo que los planetas se mantienen en órbita alrededor del Sol por la atracción gravitatoria. También los electrones ejercen entre sí fuerzas eléctricas y la fuerza ejercida entre dos átomos próximos es precisamente la fuerza eléctrica entre sus electrones y el núcleo. Todas las fuerzas que hemos discutido hasta ahora en este libro, si exceptuamos la fuerza de gravedad, son el resultado de esta fuerza eléctrica. Así, todas las fuerzas de la vida cotidiana, con excepción de la gravedad, son de origen electromagnético.

Los protones y neutrones del núcleo se mantienen juntos por la fuerza nuclear. Esta fuerza es muy grande cuando las partículas están muy próximas unas de otras, pero disminuye rápidamente con la distancia. Por ejemplo, la fuerza nuclear entre dos neutrones es esencialmente cero cuando tienen una separación de más de 10^{-14} m. Esto quiere decir que la fuerza nuclear no se extiende más allá de los electrones exteriores del átomo que están a 10^{-10} m del núcleo. De este modo, aunque la fuerza nuclear es esencial para mantener unido el núcleo, no juega un papel directo en la interacción de los átomos entre sí.

La fuerza débil es también una fuerza de corto alcance limitada enteramente al núcleo. Es la responsable de algunas formas de radiactividad, que es la transformación espontánea del núcleo de una clase de átomo en el núcleo de otra (Apart. 22.2).

La fuerza electromagnética es por lo tanto la fuerza principal que gobierna la física y la química de la materia ordinaria. Tiene también gran importancia práctica, puesto que toda nuestra civilización industrial está basada en la producción de energía eléctrica y su utilización en motores, alumbrado y calefacción.

17.2. LEY DE COULOMB

Aun cuando las fuerzas eléctricas y de gravitación son fundamentalmente distintas la una de la otra, tienen muchas propiedades similares. Por lo tanto, para entender la electricidad conviene revisar brevemente algunas de las propiedades de la gravedad discutidas en el apartado 5.3.

La gravedad es una fuerza atractiva que existe entre dos objetos con masas m_1 y m_2 . Esto quiere decir que la fuerza F_1 ejercida por m_2 sobre m_1 está dirigida hacia m_2 (Fig. 17.2). Por la tercera ley de Newton (propiedad 3, Apart. 2.1), la reacción a F_1 es la fuerza F_2 ejercida por m_1 sobre m_2 . La fuerza F_2 tiene el mismo módulo que F_1 pero sentido opuesto, por lo tanto está dirigida hacia m_1 , tal como se aprecia en la Fig. 17.2.

La gravedad es una fuerza que actúa a distancia; o sea, dos objetos ejercen una atracción mutua el uno sobre el otro a través del espacio vacío, sin ninguna conexión mecánica. El módulo F_g de las fuerzas de gravitación (F_1 , F_2) sobre dos objetos cuyas masas m_1 y m_2 están separadas por una distancia r , viene dado por la ley de la gravedad de Newton,

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

en donde G es la constante de gravitación universal ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$).

Es costumbre hacer distinción entre fuerzas atractivas y repulsivas por el signo de sus módulos. Una fuerza atractiva se indica por un módulo negativo y una fuerza repulsiva por un módulo positivo. De acuerdo con esto, la fuerza de la gravedad debe escribirse

$$F_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad 17.1$$

para indicar que la fuerza es atractiva.

La electricidad es una fuerza que actúa a distancia entre dos objetos cuyas cargas son q_1 y q_2 . La carga, como la masa, es un atributo básico de la materia. La dimensión de carga se toma como fundamental, lo mismo que la masa, la longitud, el tiempo, y el grado (de temperatura). La dimensión de cualquier magnitud física se puede expresar en función de estas cinco dimensiones. La unidad de carga es el *coulomb* (C). La fuerza eléctrica entre dos objetos con cargas q_1 y q_2 separadas por una distancia r viene dada por la *ley de Coulomb*,

$$F_e = +K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad 17.2$$

en la que K es la constante eléctrica universal ($K = 9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$). Obsérvese la semejanza que hay entre las Ec. 17.1 y 17.2. La fuerza eléctrica depende del producto de las cargas de los dos objetos, lo mismo que la fuerza gravitatoria depende del producto de sus masas. Además, las fuerzas eléctrica y gravitacional son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre los objetos.

La diferencia fundamental entre gravedad y electricidad es que mientras que la gravedad es siempre atractiva, la fuerza eléctrica puede ser atractiva o repulsiva porque hay dos clases de carga, positiva y ne-

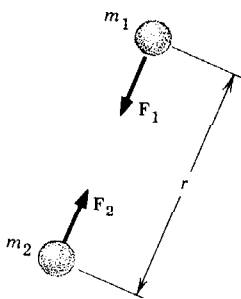


FIGURA 17.2
Atracción gravitacional de
dos masas.

gativa. Los objetos que tienen la misma carga se repelen entre sí y los que tienen carga opuesta se atraen. Este es el sentido del signo más en la Ec. 17.2. Cuando q_1 y q_2 tienen el mismo signo, bien sean los dos positivos o los dos negativos, el producto $q_1 q_2$ es positivo y por lo tanto F_c es positiva, lo que indica que es una fuerza repulsiva (Fig. 17.3). Por el contrario, si q_1 y q_2 tienen signos opuestos el producto $q_1 q_2$ es negativo y por lo tanto F_c es negativa, lo que indica que es una fuerza atractiva (Fig. 17.4).

Las partículas elementales son las portadoras esenciales de la carga. A partir de la tabla 17.1, que da las cargas y las masas de las partículas elementales, vemos que un protón tiene una carga positiva $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C, y un electrón tiene una carga negativa $-e$ de exactamente el mismo valor. (Un neutrón tiene carga cero.) La carga de un objeto es la suma de las cargas de todos sus protones y electrones. Así, un objeto que tiene un número igual de protones y electrones tiene carga cero. Este objeto se dice que no está cargado o que es *neutro*.

Un objeto neutro adquiere carga ganando o perdiendo electrones. Por ejemplo, cuando se frota una varilla de vidrio con un trozo de seda, pasan electrones del vidrio a la seda. Si el vidrio pierde N electrones, tendrá N protones más que electrones, por lo que su carga total será Ne . Análogamente, la seda tendrá N electrones más que protones, por lo que su carga total será $-Ne$. La carga total de la varilla y la seda juntas es

$$Ne + (-Ne) = 0$$

o sea, la misma que tenían antes de frotarse.

Este es un ejemplo de la ley de *conservación de la carga*, que establece que en cualquier proceso físico, la carga total no cambia. Esta ley es evidentemente cierta para un proceso en el que sólo interviene el paso de electrones de un objeto a otro. Sin embargo, la ley es mucho más general que esto e incluso es válida para procesos en los que se crean y destruyen protones y electrones, como en el caso de la desintegración de un núcleo (Apart. 22.2).

Ejemplo. Comparar las fuerzas eléctrica y gravitatoria entre un electrón y un protón.

A partir de la tabla 17.1 y de la Ec. 17.1 hallamos que la fuerza gravitatoria entre un protón y un electrón separados por una distancia r es

$$\begin{aligned} F_g &= -G \frac{m_p m_e}{r^2} \\ &= - \frac{(6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{r^2} \\ &= - \frac{1,01 \times 10^{-67} \text{ N} \cdot \text{m}^2}{r^2} \end{aligned}$$

TABLA 17.1 Masa y carga de las partículas elementales.

Partícula	Masa, kg	Carga, C
Protón	$1,673 \times 10^{-27}$	$+1,602 \times 10^{-19}$
Neutrón	$1,675 \times 10^{-27}$	0
Electrón	$9,110 \times 10^{-31}$	$-1,602 \times 10^{-19}$

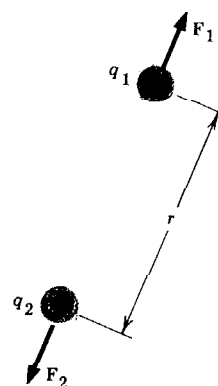


FIGURA 17.3 Repulsión eléctrica de dos cargas positivas.

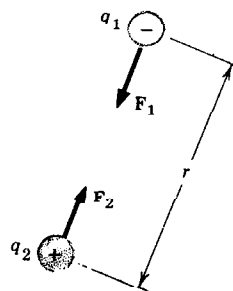


FIGURA 17.4 Atracción eléctrica de cargas opuestas.

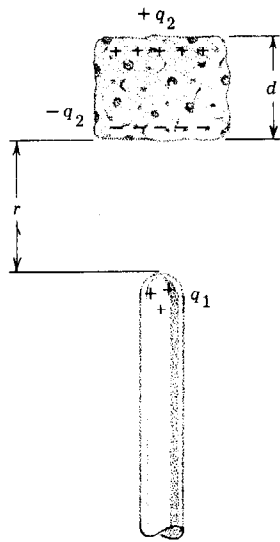


FIGURA 17.5

Inducción de carga sobre un trozo de corcho. El corcho es atraído hacia la carga inductora q_1 porque la atracción entre q_1 y la carga inducida negativa es mayor que la repulsión entre q_1 y la carga inducida positiva.

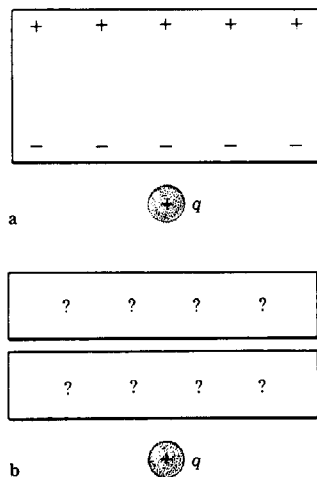


FIGURA 17.6

(a) Inducción de carga sobre un objeto, debida a una carga externa q .
(b) Corte del objeto para intentar aislar la carga inducida.

A partir de la Ec. 17.2 se ve que la fuerza eléctrica entre un electrón y un protón es

$$\begin{aligned} F_e &= +K \frac{q_p q_e}{r^2} \\ &= + \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(-1,60 \times 10^{-19} \text{ C})}{r^2} \\ &= - \frac{2,30 \times 10^{-28} \text{ N}\cdot\text{m}^2}{r^2} \end{aligned}$$

La razón de estas dos fuerzas es

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{2,30 \times 10^{-28}}{1,01 \times 10^{-67}} = 2,28 \times 10^{39}$$

Como la fuerza eléctrica es inmensamente mayor que la fuerza gravitacional, se puede despreciar por completo la fuerza de la gravedad cuando se calcula la fuerza entre partículas elementales. Sin embargo, la fuerza entre grandes conglomerados de materia, como los astros, es dominada por la gravedad porque estos objetos tienden a ser eléctricamente neutros.

Inducción

Una varilla de vidrio que ha sido cargada positivamente frotándola con un tejido de seda, atraerá a un trozo pequeño de corcho aun cuando el corcho esté descargado. El corcho está compuesto de electrones y protones de carga opuesta, los cuales se distribuyen normalmente de modo uniforme, de manera que la carga neta es cero en todo el corcho. Cuando un objeto cargado, como, por ejemplo, una varilla de vidrio, se acerca al corcho, la carga positiva de la varilla atrae a los electrones del corcho y repele a los protones haciendo que estas partículas cambien sus posiciones ligeramente. Como resultado, la carga negativa se acumula en el lado del corcho próximo a la varilla y la carga positiva se acumula en el otro lado. Este proceso recibe el nombre de *inducción*. De acuerdo con la ley de conservación de la carga, la carga total del corcho debe seguir siendo cero puesto que no se ha anadido ni quitado carga de él. Así, pues, hay tanta carga negativa inducida sobre un lado del corcho como carga positiva inducida en el otro.

Supongamos que la varilla de vidrio tiene una carga q_1 y está a una distancia r del lado frontal del corcho (Fig. 17.5). Si la carga inducida en este lado es $-q_2$, la varilla lo atrae con la fuerza

$$F_e = +K \frac{q_1(-q_2)}{r^2} = -K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Al mismo tiempo, la varilla repele la carga $+q_2$ inducida en el lado posterior. Esta carga está a una distancia d más alejada de la varilla, donde d es el espesor del trozo de corcho. Por lo tanto, la fuerza repulsiva sobre la carga positiva inducida es

$$F'_e = K \frac{q_1 q_2}{(r + d)^2}$$

la cual es menor que F_e . El módulo F de la fuerza total ejercida sobre el corcho es la suma de F_e y F'_e , o sea

$$\begin{aligned} F &= F_e + F'_e = -K \frac{q_1 q_2}{r^2} + K \frac{q_1 q_2}{(r + d)^2} \\ &= -K q_1 q_2 \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r + d)^2} \right] \\ &= -K q_1 q_2 \frac{2rd + d^2}{r^2 (r + d)^2} \end{aligned}$$

Esto demuestra que la varilla de vidrio ejerce una fuerza atractiva (negativa) sobre el corcho.

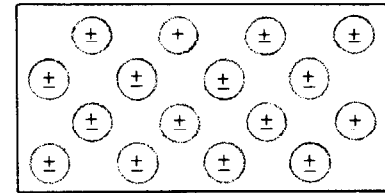
OBSERVACIÓN. Si la varilla estuviese cargada negativamente, se induciría carga positiva sobre el lado del corcho próximo a la varilla y carga negativa sobre el otro lado, por lo que el corcho todavía sería atraído por la varilla. De este modo, cualquier objeto cargado, sea positiva o negativamente, ejerce una fuerza de atracción sobre un objeto no cargado.

Aisladores y conductores

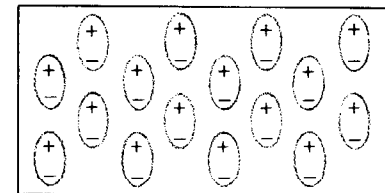
Las sustancias se diferencian por la relativa libertad con que puede desplazarse la carga a través de ellas. Una sustancia en la que la carga se puede desplazar libremente se llama *conductor* y una sustancia en la que la carga se puede mover sólo ligeramente se llama *aislador* (o *dieléctrico*). Los metales son todos buenos conductores; el vidrio, la goma, y el corcho son ejemplos de buenos aisladores.

La diferencia entre aisladores y conductores se ve ilustrada por el siguiente experimento. Se pone cerca de un objeto no cargado una carga q que induce carga en él (Fig. 17.6a). A continuación se parte el objeto por la mitad, tal como se muestra en la Fig. 17.6b, y se suprime la carga q . ¿Se queda cada una de las dos mitades del objeto con la carga inducida? La respuesta es sí, si el objeto es un conductor y no si el objeto es un aislador. Para entender esto hay que comparar las estructuras atómicas de los aisladores y de los conductores.

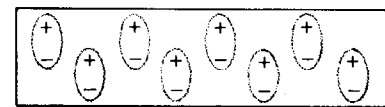
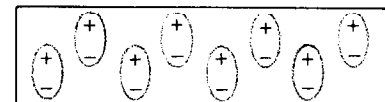
En un aislador cada electrón está ligado a un átomo y no es libre para separarse por completo. Los átomos de un aislador están representados en la Fig. 17.7a como unidades neutras compuestas de cargas positivas y negativas superpuestas unas encima de otras. Una carga positiva q puesta cerca de un aislador atrae a los electrones cargados negativamente que hay en los átomos y repele a los núcleos cargados positivamente. Esto hace que la carga negativa y positiva de cada átomo se separen ligeramente. El átomo en conjunto permanece neutro, pero un extremo se carga positivamente y el otro negativamente. El extremo negativo de cada átomo se coloca frente a la carga inductora q , tal como se ve en la Fig. 17.7b. Como consecuencia se forma en la superficie del aislador que se halla frente a q un exceso de carga negativa y en la superficie opuesta se forma un exceso de carga positiva. Es evidente que éstas no son cargas libres; son simplemente los extremos cargados de los átomos neutros. La Fig. 17.7c muestra que si el aislador se escinde en dos, aparece carga inducida sobre las superficies cortadas, pero la carga total de cada mitad permanece cero. En un conductor metálico se separa de cada átomo un electrón por lo menos y es libre para desplazarse por el conductor. Los átomos que pierden electrones se llaman *iones*. En un metal están cargados posi-



a



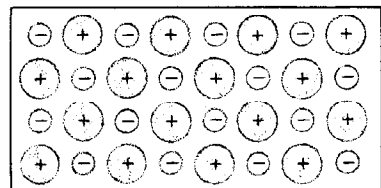
b



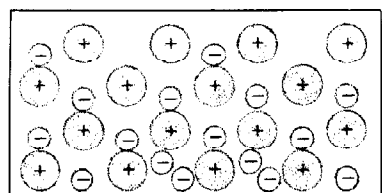
c

FIGURA 17.7

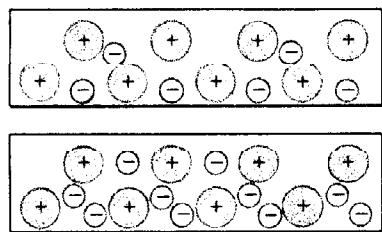
(a) Un aislador. Cada átomo es un objeto neutro compuesto de cargas positivas y negativas. (b) Inducción de carga sobre un aislador. La carga externa q hace que la carga positiva y negativa de cada átomo se separen ligeramente. (c) Las cargas inducidas sobre un aislador no están separadas cuando el aislador se parte en dos.



a



b



c

FIGURA 17.8

(a) Un conductor. Las cargas positivas son los iones, los cuales tienen posiciones fijas y las cargas negativas son los electrones, los cuales se pueden desplazar libremente. (b) Inducción de carga sobre un conductor. La carga externa q hace que los electrones libres se desplacen hacia un lado del conductor. (c) Cuando se corta el conductor por la mitad, queda atrapado un exceso de electrones en una mitad y en la otra un déficit.

vamente y permanecen en posiciones fijas. Así, pues, un metal está compuesto de iones cargados positivamente en posiciones fijas y electrones cargados negativamente, libres para desplazarse de un lado a otro. Normalmente, los iones y los electrones están distribuidos de manera uniforme, de modo que la carga neta es cero en todo el metal (Fig. 17.8a). Sin embargo, un objeto cargado puesto cerca de un conductor cambia esta distribución. Una carga positiva q atrae a los electrones y repele a los iones. Como los electrones se pueden mover libremente, se acumulan en el lado próximo a q , que así se carga negativamente (Fig. 17.8b). El lado opuesto, al no tener suficientes electrones, queda cargado positivamente. Si se corta por la mitad el conductor, se atrapa un exceso de electrones en la mitad que se halla frente a q , quedando la otra mitad con un déficit de electrones (Fig. 17.8c). Por lo tanto, cada mitad sigue cargada, incluso después de quitar la carga inductora.

Para descargar estos conductores sólo es necesario conectar un hilo conductor de uno al otro. Los electrones en exceso sobre el conductor cargado negativamente, atraídos hacia el conductor cargado positivamente, fluyen libremente por el hilo hasta que cada conductor es de nuevo neutro.

Máquinas de inducción

La posibilidad de separar las cargas por inducción en un conductor se utiliza en un dispositivo denominado *máquina de inducción* para producir de manera continua una separación de carga. Hoy en día estas máquinas se usan principalmente para demostraciones de física, pero en el siglo XIX se utilizaron para investigaciones sobre la electricidad. En la máquina que se muestra en la Fig. 17.9, las varillas metálicas están dispuestas radialmente en una rueda que se hace girar en la dirección indicada mediante una manivela. La placa P tiene inicialmente una pequeña carga positiva, de modo que se inducen cargas sobre la varilla en la posición 1. Cuando esta varilla gira hasta la posición 2, establece un contacto momentáneo con el hilo W , que simultáneamente está en contacto con la varilla en la posición 6. De la varilla en la posición 6 fluye carga negativa, de modo que cuando el contacto desaparece, esta varilla, que ahora está en la posición 1, queda cargada positivamente. Del mismo modo, la varilla en la posición 3 queda cargada negativamente. Estas varillas depositan su carga en las dos esferas conductoras por medio de los contactos A y B .

Parte de la carga positiva depositada en A se acumula en la placa P . Al aumentar la carga en P , aumenta la cantidad de carga inducida sobre la varilla en la posición 2. Esta, a su vez, aumenta la carga devuelta a P . Así, pues, esta máquina hace uso de la realimentación positiva para establecer rápidamente una gran carga en las dos esferas conductoras. Cuando esta carga es suficientemente grande, el aire que hay entre las esferas se hace de repente conductor y los electrones pueden pasar de la esfera negativa a la positiva. Esto se manifiesta por un chisporroteo que se produce entre las dos esferas.

17.3. EL CAMPO ELÉCTRICO

La Fig. 17.10 muestra una configuración arbitraria de cargas (q_1, q_2, \dots, q_n). La fuerza \mathbf{F} que ejerce este conjunto de cargas sobre cualquier

otra carga positiva q en el punto P es la suma vectorial de las fuerzas F_1, F_2, \dots, F_n que cada carga del conjunto ejerce individualmente sobre q . Esta fuerza depende conjuntamente de la carga de prueba q y de las cargas fuente q_1, q_2, \dots, q_n de la configuración original. Es útil expresar F como el producto de un factor que depende solamente de la carga de prueba y un factor que depende solamente de las cargas fuente. Esto se hace fácilmente por que F es proporcional a q , y por lo tanto la razón

$$E = \frac{F}{q} \quad 17.3$$

es independiente de q . El vector E es el *campo eléctrico* en el punto P producido por las cargas fuente. Es igual a la fuerza que ejercerían estas cargas sobre una carga positiva de 1 C situada en P . La unidad de E es newtons por coulomb (N/C). En función de E , la fuerza que ejercen las cargas fuente sobre una carga arbitraria q en el punto P se puede escribir en la forma

$$F = qE \quad 17.4$$

La Ec. 17.4 expresa el vector F como el producto de un número q que depende tan sólo de la carga de prueba y un vector E que depende solamente de las cargas fuente. El producto de un número *positivo* q y un vector E es un vector F que tiene la dirección de E y el módulo qE . Si q es negativo, el sentido de F es opuesto al de E .

El campo eléctrico es un concepto importante porque nos permite pensar en la fuerza que ejercería una configuración de cargas sobre una carga en un punto, aun cuando en realidad no hubiese allí carga. Como la fuerza que se ejercería sobre una carga de prueba depende de la posición del punto, el campo eléctrico varía de punto a punto. El efecto de una configuración de carga se puede representar dibujando el campo

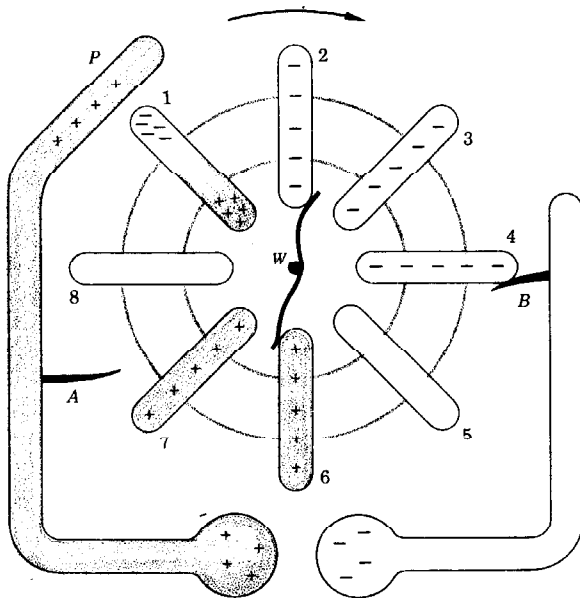


FIGURA 17.9
Una máquina de inducción. La rotación de la rueda en el sentido de las agujas del reloj hace que la carga positiva se acumule en la izquierda y que la negativa se acumule en la derecha.

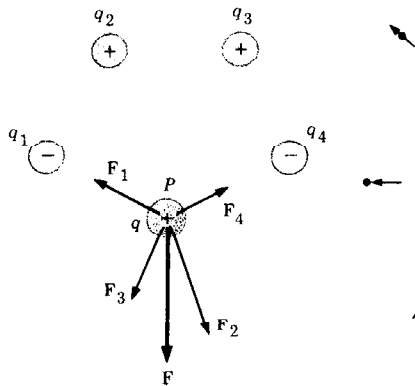


FIGURA 17.10
La fuerza sobre una carga de prueba q debida a cuatro cargas fuente q_1, q_2, q_3, q_4 .

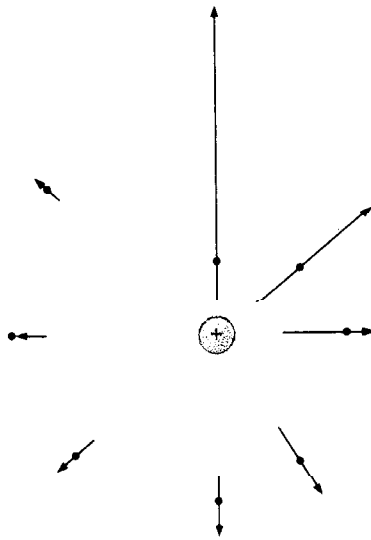


FIGURA 17.11
Campo eléctrico en varios puntos producido por una carga puntual positiva.

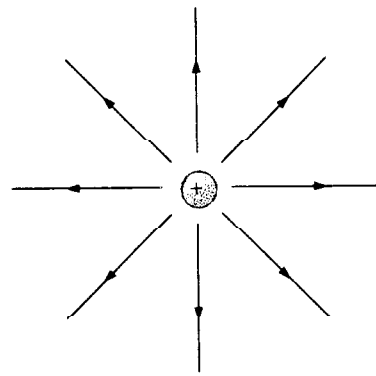


FIGURA 17.12
Líneas de fuerza de una carga puntual positiva.

eléctrico en varios puntos. Por ejemplo, la Fig. 17.11 muestra el campo eléctrico en varios puntos producido por una carga puntual positiva. Las flechas que representan el campo están todas apartándose de la carga porque el sentido del campo es el sentido de la fuerza que se ejercería sobre una carga de prueba positiva. La longitud de las flechas disminuye con la distancia a la carga, porque la fuerza sobre una carga, de prueba disminuye con la distancia, de acuerdo con la ley de Coulomb (Ec. 17.2).

La Fig. 17.12 es otra representación del campo eléctrico de una carga puntual positiva. Las líneas, llamadas *líneas de fuerza*, se dibujan paralelas al campo en cada punto, consiguiéndose así una buena imagen de la dirección del campo eléctrico. Si se comparan las Figs. 17.11 y 17.12, vemos que las líneas de fuerza están más juntas donde E es grande y más separadas donde E es pequeño. Así, la separación de las líneas de fuerza da idea del valor relativo del campo.

La Fig. 17.13 muestra las líneas de fuerza para una carga puntual negativa. Son idénticas a las líneas de fuerza de una carga puntual positiva con la única diferencia de que están orientadas hacia la carga. Esto es así, porque una carga de prueba positiva es atraída hacia la carga negativa.

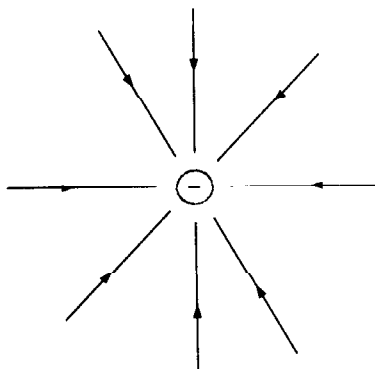
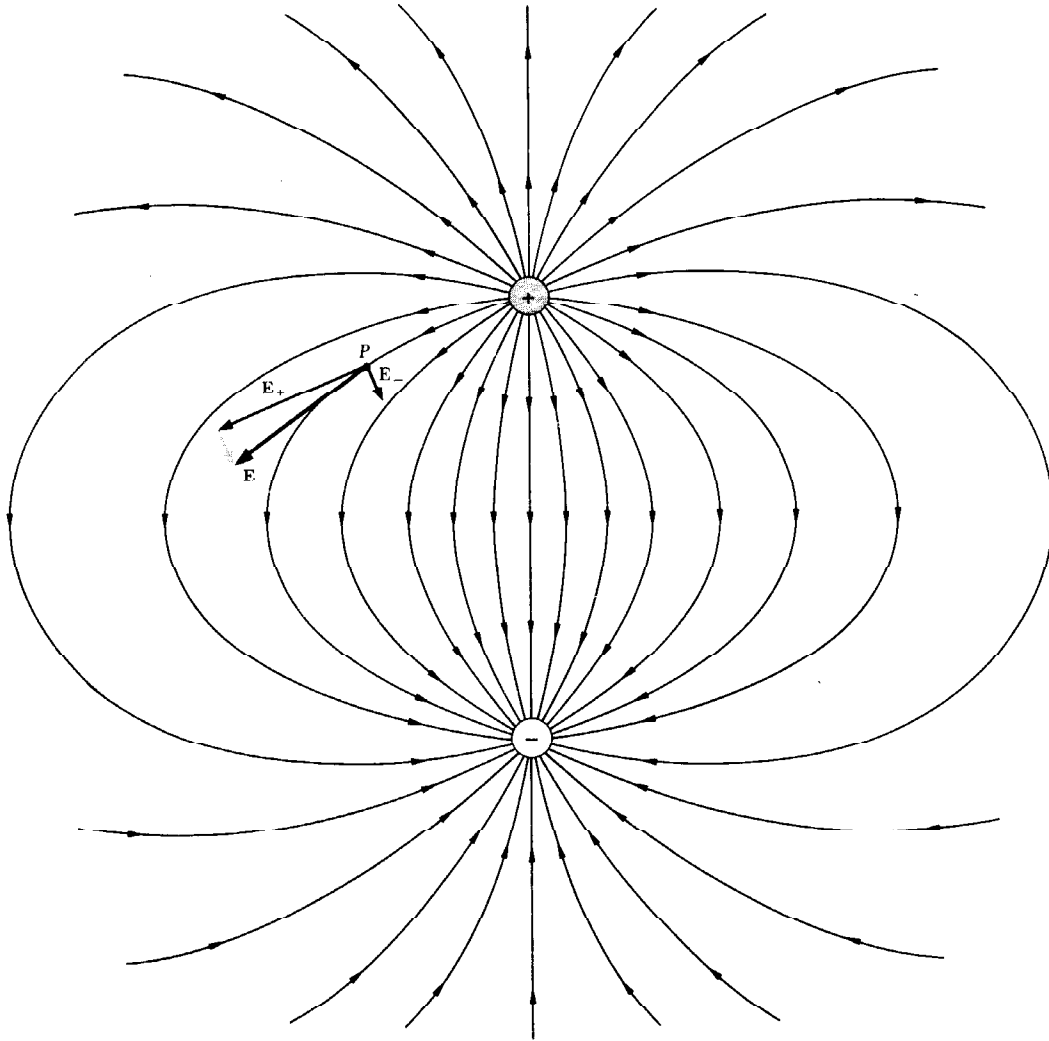


FIGURA 17.13
Líneas de fuerza de una carga puntual negativa.

Campo de un dipolo

La Fig. 17.14 muestra las líneas de fuerza producidas por dos cargas iguales y opuestas separadas por una distancia d . Las líneas de fuerza parten todas de la carga positiva y terminan en la carga negativa. El campo eléctrico en cualquier punto P es tangente a la línea de



fuerza que pasa por P y es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos debidos a cada carga por separado.

La configuración de carga de la Fig. 17.14 recibe el nombre de *dipolo*. Aun cuando la carga total de la configuración sea cero, ejercerá una fuerza eléctrica sobre otra carga. Ésta es la situación que ya hemos visto al discutir la fuerza entre un objeto cargado y un trozo de corcho sin cargar (Apart. 17.2). El objeto cargado inducía carga positiva y negativa sobre lados opuestos del corcho. Estas cargas inducidas forman un dipolo que ejerce una fuerza sobre el objeto cargado.

El campo eléctrico producido por un dipolo se puede calcular en cualquier punto por la ley de Coulomb. El cálculo es particularmente sencillo para el caso especial de un punto P que se halla en el eje del dipolo (Fig. 17.15). Supongamos que q_1 y $q_2 = -q_1$ son las cargas del dipolo, y supongamos que hay una carga de prueba q en el eje del dipolo a una distancia r de su centro. La fuerza total \mathbf{F} sobre q es la suma de las fuerzas \mathbf{F}_1 y \mathbf{F}_2 debidas a q_1 y q_2 . Como estas fuerzas son paralelas, el

FIGURA 17.14

Líneas de fuerza de un dipolo.
El campo eléctrico en cualquier punto P es tangente a la línea de fuerza que pasa por aquel punto.

módulo de \mathbf{F} es

$$\begin{aligned}
 F &= F_1 + F_2 \\
 &= K \frac{qq_1}{(r + \frac{1}{2}d)^2} + K \frac{qq_2}{(r - \frac{1}{2}d)^2} \\
 &= Kqq_1 \left[\frac{1}{(r + \frac{1}{2}d)^2} - \frac{1}{(r - \frac{1}{2}d)^2} \right] \\
 &= Kqq_1 \frac{-2rd}{(r + \frac{1}{2}d)^2(r - \frac{1}{2}d)^2}
 \end{aligned}$$

Cuando r es muy grande comparado con d , los términos $\frac{1}{2}d$ se pueden despreciar en el denominador. Entonces la fuerza viene dada por

$$F = -Kqq_1 \frac{2rd}{r^4} = -Kqq_1 \frac{2d}{r^3}$$

Esto demuestra que la fuerza ejercida por un dipolo disminuye en razón inversa al cubo de la distancia al dipolo, en contraste con la fuerza ejercida por una sola carga que disminuye como el cuadrado de la distancia. A grandes distancias, la fuerza del dipolo es mucho más débil que la fuerza producida por q_1 o q_2 por separado, porque las fuerzas individuales se neutralizan entre sí en gran parte (aunque no completamente). El módulo del campo eléctrico producido por el dipolo en P es

$$E = \frac{F}{q} = -K \frac{2dq_1}{r^3}$$

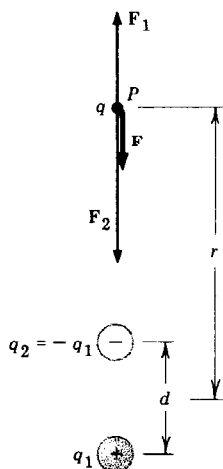


FIGURA 17.15

Fuerza sobre una carga de prueba q localizada sobre el eje de un dipolo.

17.4. POTENCIAL ELÉCTRICO

Consideremos un objeto de masa m y carga q en presencia de una carga fija q_1 (Fig. 17.16). Si ambas cargas son positivas, q_1 ejerce una fuerza repulsiva

$$F = K \frac{qq_1}{r^2}$$

sobre el objeto. Si el objeto se encuentra inicialmente en reposo en el punto A , se alejará con movimiento acelerado a lo largo de una línea de fuerza. En el punto B tendrá una velocidad v_B y una energía cinética $K_B = \frac{1}{2}mv_B^2$. De acuerdo con el teorema trabajo-energía (apartado 5.1), el trabajo W_{AB} realizado sobre q por la fuerza \mathbf{F} al desplazar el objeto de A a B es igual a la variación de su energía cinética

$$W_{AB} = K_B - K_A \quad 17.5$$

Como el objeto parte del reposo, K_A es en este caso cero.

El trabajo W_{AB} realizado por la fuerza eléctrica, lo mismo que el trabajo realizado por la gravedad (Apart. 5.3), se puede escribir como la diferencia de la *energía potencial* U del objeto en A y B ,

$$W_{AB} = U_A - U_B \quad 17.6$$

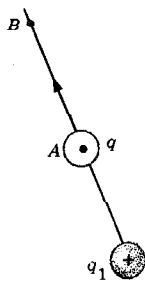


FIGURA 17.16

Una carga de prueba q que se mueve de A a B en presencia de una carga fija q_1 .

O sea, que se puede asignar un número U a cada punto, de tal manera que el trabajo realizado por la fuerza eléctrica al desplazar el objeto entre dos puntos cualesquiera viene dado por la Ec. 17.6. Se ve claramente que si se añade al valor de U en cada punto el mismo número, no cambiaría la Ec. 17.6. Esta libertad en la definición de U se utiliza para hacer U igual a cero en algún punto conveniente de una situación dada.

A partir de las Ecs. 17.5 y 17.6 obtenemos el resultado:

$$\begin{aligned} U_A - U_B &= K_B - K_A \\ \text{o también} \quad U_A + K_A &= U_B + K_B \end{aligned} \quad 17.7$$

Esto establece que la suma de las energías cinética y potencial del objeto en A es igual a la suma de las energías en B . Como A y B son puntos arbitrarios, la suma de estas energías es la misma en todos los puntos, o sea, es una constante.

Se puede demostrar que la energía potencial de una carga puntual q debida a una carga puntual q_1 viene dada por

$$U = K \frac{qq_1}{r} \quad 17.8$$

Esta expresión es muy parecida a la de la energía potencial de gravitación (Ec. 5.18) salvo en el signo, el cual refleja simplemente la diferencia de signo de las leyes de fuerza (Ecs. 17.1 y 17.2). Si q y q_1 tienen el mismo signo, las cargas se repelen mutuamente y U es positiva. Si q y q_1 tienen signo opuesto se atraen mutuamente y U es negativa. Como la fuerza de gravitación siempre es atractiva, la Ec. 5.18 debe tener signo menos. La energía potencial dada por la Ec. 17.8 nunca es cero, pero se hace cada vez más pequeña al hacerse r cada vez más grande. Así podemos decir que la energía potencial es cero cuando las cargas están infinitamente separadas.

Ejemplo 1. ¿Cuál es la energía potencial de un electrón en un punto A , a una distancia $r_A = 0,53 \times 10^{-10}$ m de un protón? * ¿Cuál es la velocidad mínima v_A necesaria para que el electrón pueda escapar completamente del protón?

Utilizando la tabla 17.1 y la Ec. 17.8, hallamos que la energía potencial del electrón en A es

$$\begin{aligned} U_A &= K \frac{q_e q_p}{r_A} \\ &= \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(-1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{5,3 \times 10^{-11} \text{ m}} \\ &= -4,3 \times 10^{-18} \text{ N}\cdot\text{m} = -4,3 \times 10^{-18} \text{ J} \end{aligned}$$

La energía es negativa porque el electrón es atraído por el protón. La Ec. 17.7 se puede utilizar para calcular la velocidad mínima v_A que debe

* Esta es la distancia media entre un electrón y un protón en un átomo de hidrógeno (Apart. 21.2).

tener el electrón en A para escapar completamente del protón. Un electrón con la velocidad mínima de escape se puede desplazar infinitamente lejos del protón, pero su velocidad en el infinito será cero. Así, cuando el electrón está infinitamente lejos del protón, tanto su energía potencial U_{∞} como su energía cinética K_{∞} son cero. Por lo tanto, de acuerdo con la Ec. 17.7, tenemos

$$K_A + U_A = K_{\infty} + U_{\infty} = 0$$

o sea

$$K_A = \frac{1}{2}mv_A^2 = -U_A = 4,3 \times 10^{-18} \text{ J}$$

en donde m es la masa del electrón. Despejando v_A tenemos

$$\begin{aligned} v_A^2 &= \frac{4,3 \times 10^{-18} \text{ J}}{\frac{1}{2}m} \\ &= \frac{4,3 \times 10^{-18} \text{ J}}{0,5(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})} \\ &= 9,4 \times 10^{12} \text{ J/kg} \end{aligned}$$

de modo que

$$v_A = 3,1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

OBSERVACIÓN. Este cálculo debería compararse con el del Apart. 5.3 (ejemplo 2) acerca de la velocidad que necesita un objeto para escapar completamente de la Tierra. Los principios son los mismos en ambos cálculos. Sin embargo, la velocidad de escape en el caso de la gravedad no depende de la masa del objeto, mientras que en el caso de la electricidad sí que depende. ¿Por qué?

La energía potencial de una carga de prueba q debida a una configuración de cargas fuente (q_1, q_2, \dots, q_n) es la suma de las energías potenciales debidas a cada carga individualmente. La energía potencial depende conjuntamente de la carga de prueba q y de las cargas fuente q_1, q_2, \dots, q_n . Es útil expresar la energía potencial, lo mismo que la fuerza eléctrica, como el producto de un factor que depende solamente de la carga de prueba y de un factor que depende únicamente de las cargas fuente. Como U es proporcional a q , la razón

$$V = \frac{U}{q} \quad 17.9$$

es independiente de q . La magnitud V , llamada *potencial eléctrico*, depende sólo de las cargas fuente. La energía potencial U de la carga de prueba se expresa simplemente en función del potencial V ,

$$U = qV \quad 17.10$$

La unidad de potencial es joules por coulomb (J/C), que recibe el nombre de *volt* (V):

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

A partir de las Ecs. 17.8 y 17.9, se obtiene que el potencial debido a una carga puntual q_1 es

$$V = \frac{U}{q} = K \frac{q_1}{r} \quad 17.11$$

Ejemplo 2. ¿Cuál es el potencial a una distancia $r = 5,3 \times 10^{-11}$ m de un protón?

Según la Ec. 17.11, el potencial vale

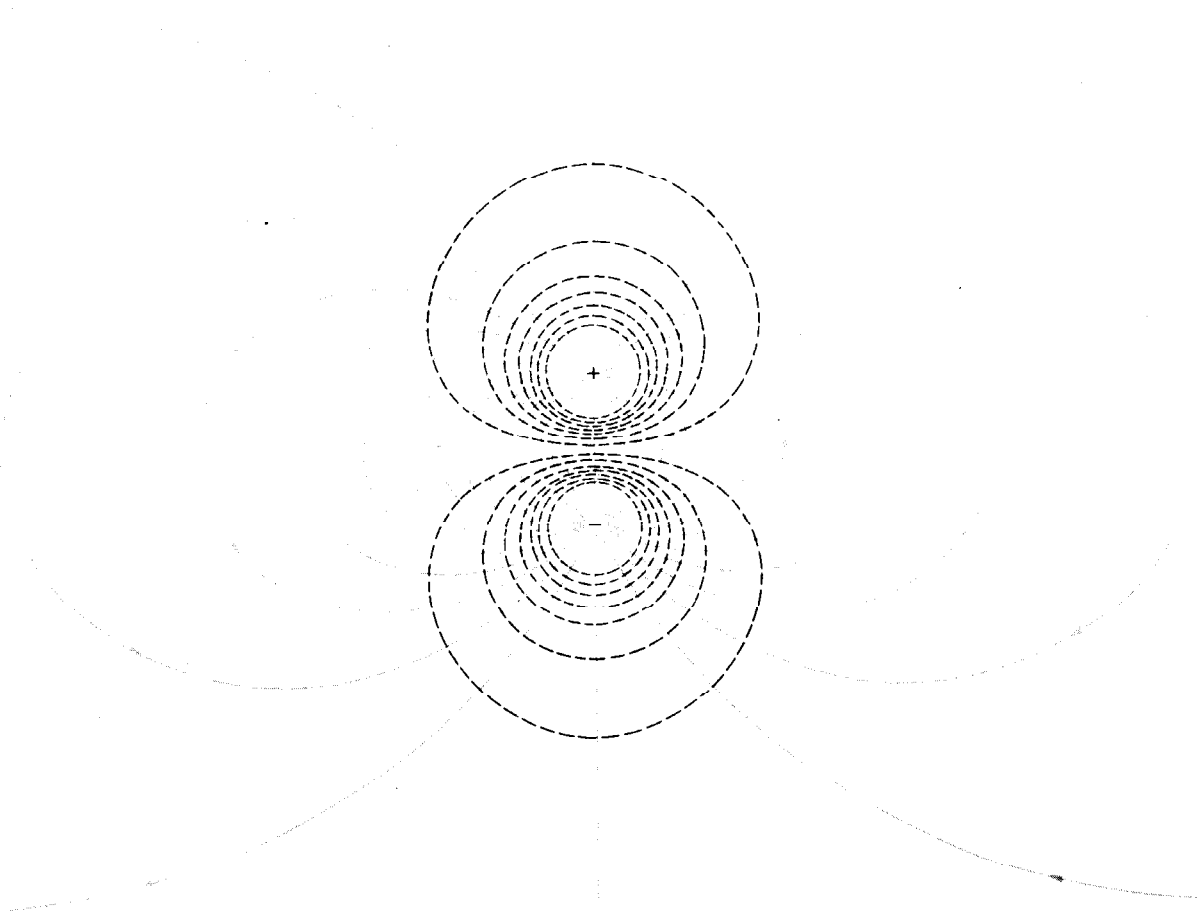
$$V = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{5,3 \times 10^{-11} \text{ m}}$$

$$= 27,2 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{C} = 27,2 \text{ J}/\text{C} = 27,2 \text{ V}$$

El potencial en todos los puntos de una configuración de carga se representa gráficamente usando *equipotenciales*, o sea, líneas a lo largo de las cuales el potencial es constante. La Fig. 17.17 muestra las equipotenciales (líneas de trazos) y las líneas de fuerza (líneas continuas) de un dipolo (dos cargas iguales y opuestas). El campo eléctrico no realiza trabajo sobre una carga de prueba que se desplaza a lo largo de una equipotencial, puesto que la energía potencial de la carga no cambia. Esto quiere decir que las líneas de fuerza deben ser perpendiculares a las equipotenciales, tal como se muestra en la Fig. 17.17, pues si no fuera así, la fuerza eléctrica tendría una componente paralela a una equipo-

FIGURA 17.17

Equipotenciales y líneas de fuerza de un dipolo. Las líneas de fuerza en cualquier punto son perpendiculares a las superficies equipotenciales.



tencial y algo de trabajo se realizaría sobre una carga de prueba que se desplazase a lo largo de ella. La fuerza sobre una carga de prueba positiva está siempre dirigida desde una región de alto potencial a una región de bajo potencial, perpendicularmente a las equipotenciales. La fuerza sobre una carga de prueba negativa es a la inversa: está dirigida desde una región de bajo potencial a una región de alto potencial. Cuando un conductor metálico es colocado en un campo eléctrico estático, partes diferentes del conductor pueden estar momentáneamente a potenciales diferentes. Si eso es lo que sucede, los electrones cargados negativamente, que pueden desplazarse libremente por el metal, fluirán desde las regiones de bajo potencial a las de alto potencial. Los electrones se vuelven a distribuir hasta que, en menos de una millonésima de segundo, el potencial es el mismo en todo el metal. Así, cuando no hay flujo de carga en él, un metal u otro objeto conductor es una región equipotencial. Además, como cualquier campo eléctrico en un conductor haría que los electrones libres se desplazaran, el campo eléctrico en un conductor debe ser cero cuando no hay flujo de carga.

Un conductor que está en buen contacto con la Tierra se dice que está unido a *tierra*. La superficie terrestre es en sí misma un conductor moderadamente bueno, de modo que la Tierra y todos los conductores unidos a ella forman un gran conductor, todo él al mismo potencial que la Tierra. Para aplicaciones prácticas el potencial de la Tierra se toma como cero.

Por ejemplo, la toma de corriente de una casa está normalmente a 120 V. Esto quiere decir que un extremo del enchufe se mantiene a un potencial de 120 V con respecto al que está unido a tierra. Cuando se enchufa un aparato fluye carga positiva del extremo de alto potencial, pasa por el aparato y vuelve a tierra. El trabajo realizado por la carga es

$$\begin{aligned} W &= U_{120} - U_0 \\ &= q \times 120 \text{ V} - 0 = q \times 120 \text{ V} \end{aligned}$$

Por ejemplo, el trabajo realizado sobre una carga de 10 C es

$$W = 10 \text{ C} \times 120 \text{ V} = 1200 \text{ C} \cdot \text{V} = 1200 \text{ J}$$

Este trabajo se convierte en calor, luz o energía mecánica, según la naturaleza del aparato enchufado.

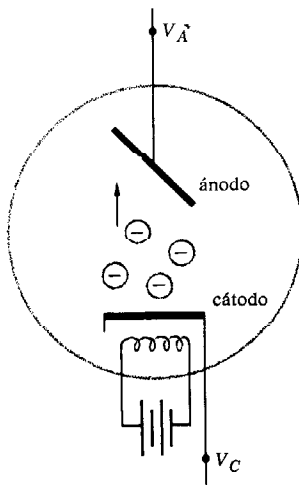


FIGURA 17.18
Una válvula de vacío.
Los electrones que se evaporan del cátodo calentado se aceleran hacia el ánodo, que se mantiene a un potencial positivo con respecto al cátodo.

17.5. HACES DE ELECTRONES

Muchos aparatos importantes, como, por ejemplo, osciloscopios, receptores de televisión, aparatos de rayos X, microscopios electrónicos y válvulas electrónicas, utilizan un haz de electrones acelerados por un campo eléctrico. En todos los casos se mantiene el haz en un tubo de vidrio al que se ha hecho el vacío, tal como se ve en la Fig. 17.18. Las placas metálicas o *electrodos* están montadas dentro del tubo y los hilos unidos a los electrodos pasan por la pared del tubo. Un electrodo, llamado *cátodo*, es calentado por medio de un filamento de alambre en el que hay corriente (Apar. 18.1). Cuando la temperatura del cátodo es suficientemente alta, algunos de sus electrones libres poseen energía suficiente para escapar del metal, lo mismo que las moléculas que se evaporan de un líquido (Apar. 9.1). Estos electrones evaporados forman

una nube electrónica alrededor del cátodo y cuando ésta se hace suficientemente densa, la nube impide que haya más evaporación.

Si el otro electrodo, llamado *ánodo*, se mantiene a un elevado potencial positivo con respecto al cátodo, los electrones de la nube serán atraídos por él. Como no hay aire en el tubo, estos electrones se mueven libremente hacia el ánodo sin chocar con las moléculas de aire. Al alejarse de la nube electrónica son reemplazados por nuevos electrones evaporados del cátodo.

Supongamos que V_A es el potencial del ánodo y que V_C es el potencial del cátodo. Las energías potenciales de un electrón de carga $q = -e$ en el ánodo y el cátodo son

$$U_A = -eV_A \quad \text{y} \quad U_C = -eV_C$$

La fuerza eléctrica es la única fuerza que actúa sobre los electrones, de modo que cuando un electrón se mueve del cátodo al ánodo, la suma de sus energías cinética y potencial permanece constante:

$$K_C + U_C = K_A + U_A$$

Despejando de aquí la energía cinética K_A en el ánodo, se obtiene

$$\begin{aligned} K_A &= K_C + (U_C - U_A) \\ &= K_C + e(V_A - V_C) \end{aligned}$$

La energía cinética K_C de los electrones cuando salen del cátodo es aproximadamente cero, de modo que tenemos

$$K_A = \frac{1}{2}mv_A^2 = e(V_A - V_C) \quad 17.12$$

$$\text{o sea} \quad v_A^2 = \frac{2e(V_A - V_C)}{m} \quad 17.13$$

en donde m es la masa de un electrón.

Ejemplo. Si el ánodo de un tubo de vacío está a un potencial de 5000 V con respecto al cátodo, ¿cuál es la velocidad de un electrón cuando alcanza el ánodo?

Según la Ec. 17.13, la velocidad del electrón viene dada por

$$\begin{aligned} v_A^2 &= \frac{2e(V_A - V_C)}{m} = \frac{2(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(5000 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \\ &= 17,6 \times 10^{11} \text{ J/kg} \end{aligned}$$

$$\text{o sea} \quad v_A = 4,2 \times 10^7 \text{ m/s}$$

Tubo de rayos X

En un tubo de rayos X los electrones chocan con el ánodo, tal como se observa en la Fig. 17.18. La repentina desaceleración de los electrones

genera los rayos X, que son simplemente ondas electromagnéticas de longitud de onda muy corta (Apart. 15.1). La longitud de onda de los rayos X producidos se hace más corta al crecer la diferencia de potencial $V_A - V_C$ (Apart. 21.1). Como los rayos X de longitud más corta son más penetrantes que los de longitud de onda más larga, hoy en día se utilizan aparatos de rayos X con diferencias de potencial muy grandes. Con una diferencia de potencial de 8000 V, la energía cinética de los electrones al chocar con el ánodo es

$$K_A = e(V_A - V_C) \\ = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 8000 \text{ V} = 12,8 \times 10^{-16} \text{ J}$$

Normalmente es más conveniente expresar la energía de una partícula elemental en *electronvolts* (eV). Un electronvolt es la energía adquirida por un electrón al desplazarse a través de una diferencia de potencial de 1 V. O sea, el electronvolt está relacionado con el joule por

$$1 \text{ eV} = e \times 1\text{V} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

y

$$1 \text{ J} = 6,25 \times 10^{18} \text{ eV}$$

Por ejemplo, la energía cinética del electrón en electronvolts es

$$K_A = (12,8 \times 10^{-16} \text{ J}) \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ = 8000 \text{ eV}$$

Así, la energía en electronvolts es igual a la diferencia de potencial en volts.

Tubo de rayos catódicos

El tubo de rayos catódicos (Fig. 17.19) se utiliza tanto en osciloscopios como en receptores de televisión para dar una imagen controlada eléctricamente. Los electrones evaporados del cátodo son acelerados hasta el ánodo, lo mismo que en un tubo de rayos X. Sin embargo, existe un orificio en el ánodo de un tubo de rayos catódicos por el que pasan algunos electrones. Estos electrones chocan después con la superficie interior del extremo aplastado del tubo. Esta superficie está cubierta con un material fluorescente que produce una mancha brillante en el lugar donde choca el haz.

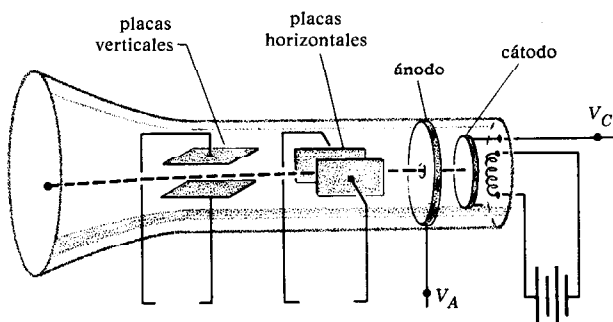


FIGURA 17.19

Tubo de rayos catódicos. Algunos electrones pasan por el orificio que hay en el ánodo y siguen hasta chocar con la pantalla fluorescente. La posición del haz sobre la pantalla se controla por medio de los potenciales aplicados a las placas deflectoras.

La posición de la mancha es controlada por dos pares de placas deflectoras orientadas en ángulo recto. Cuando los electrones pasan entre un par de placas son desviados hacia la placa de potencial más elevado. El valor de la desviación es controlado variando la diferencia de potencial entre las placas. Un par de placas produce desviación horizontal y el otro par produce desviación vertical. Los dos pares juntos pueden mover la mancha por toda la pantalla.

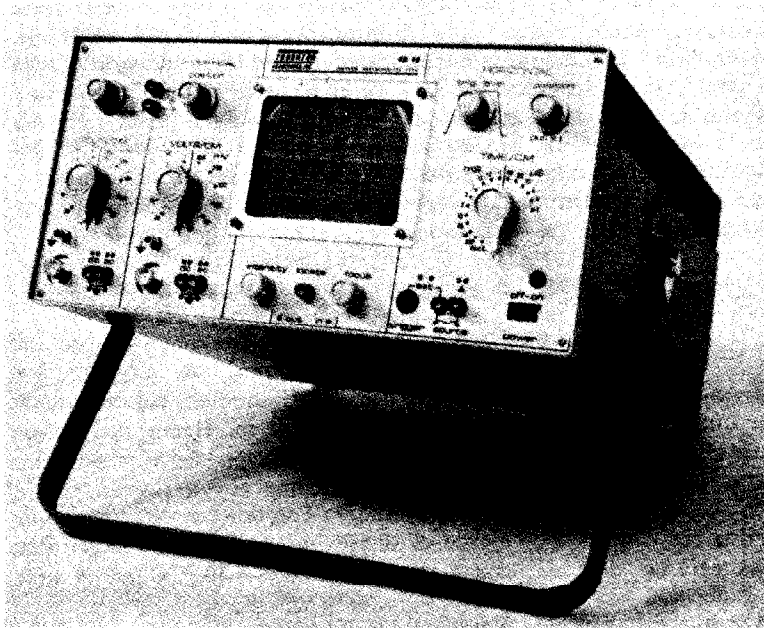


FIGURA 17.20
Un osciloscopio.
(Thornton Associates.)

Se utiliza un osciloscopio (Fig. 17.20) para mostrar un potencial que varía con el tiempo, por ejemplo, el producido por impulsos que se mueven a lo largo del axón de una célula nerviosa. Por medio de electrodos implantados en la célula, el potencial de interés se aplica a las placas verticales de un osciloscopio, produciendo desviaciones de la mancha. Para mostrar la variación temporal de los pulsos, el haz es barrido simultáneamente de izquierda a derecha a velocidad constante y en sentido horizontal. Al final del barrido, vuelve rápidamente a la izquierda y se le hace pasar otra vez de un lado a otro. Este barrido requiere que el potencial aplicado a las placas horizontales tenga la forma de la onda en diente de sierra que aparece en la Fig. 17.21. Este potencial de barrido es proporcionado por los circuitos electrónicos del osciloscopio y existen controles para variar la frecuencia de barrido. Cuando está en funcionamiento, la frecuencia de barrido se ajusta para igualar la frecuencia con la que llegan los pulsos a las placas verticales. Entonces, con cada barrido horizontal, se pone de manifiesto un nuevo pulso en la misma posición que el anterior, el cual produce una imagen estacionaria de un pulso único. La Fig. 17.22 muestra el potencial de acción (Apart. 18.5) del axón gigante de un calamar, como aparece en la pantalla de un osciloscopio. El funcionamiento de un osciloscopio se describe con mayor detalle en el Apart. 20.2.

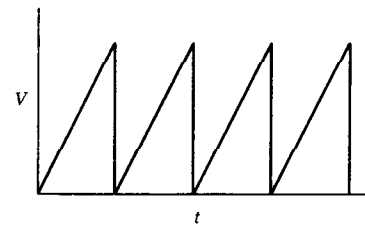


FIGURA 17.21
Variación temporal del potencial de barrido aplicado a las placas deflectoras horizontales de un osciloscopio.

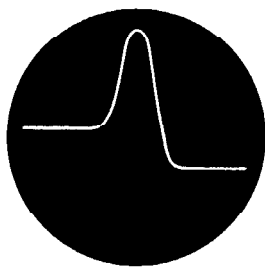


FIGURA 17.22
Potencial de acción del axón gigante de un calamar tal como aparece en un osciloscopio.

Tubo de televisión

Un tubo de televisión es muy parecido a un tubo de rayos catódicos, excepto en que el haz es desviado magnéticamente más que eléctricamente. La imagen está compuesta de 525 líneas horizontales individuales y cambia 30 veces por segundo. Esto quiere decir que el haz barre horizontalmente la pantalla $525 \times 30 = 15\,750$ veces por segundo. Mientras el haz es barrido horizontalmente, también lo hace verticalmente a una velocidad de 60 veces por segundo. Para formar una imagen hacen falta dos barridos verticales porque sólo la mitad de las líneas son exhibidas en cada barrido.* Los barridos horizontales y verticales son producidos por los circuitos electrónicos que hay en el aparato, pero están sincronizados con la señal transmitida por la emisora. Esta señal controla también la intensidad del haz electrónico y por lo tanto el brillo del punto luminoso producido cuando el haz barre la pantalla. Lo que produce una imagen determinada es la variación de la intensidad del haz que recorre la pantalla de un lado a otro.

PROBLEMAS

- (a) ¿Cuál es el módulo de la fuerza ejercida sobre una carga de $+7\text{ C}$ por una carga de -3 C que se halla a 2 m de distancia? (b) ¿Es la fuerza atractiva o repulsiva?

Resp. (a) $4,72 \times 10^{10}\text{ N}$; (b) atractiva.

- Supongamos que la carga en las esferas metálicas de una máquina de inducción (Fig. 17.9) es $+1,4 \times 10^{-8}\text{ C}$ y $-1,4 \times 10^{-8}\text{ C}$, respectivamente. ¿Cuál es la fuerza que ejerce una esfera sobre la otra cuando están separadas 5 cm ?

- (a) ¿Cuál es la masa de un grupo de protones que tienen una carga total de 1 C ? (b) ¿Cuál es la carga total de 1 kg de protones?

Resp. (a) $1,04 \times 10^{-6}\text{ kg}$; (b) $0,96 \times 10^8\text{ C}$.

- (a) Hallar la fuerza eléctrica entre un kilogramo de protones y un kilogramo de electrones separados por $6 \times 10^6\text{ m}$ (el radio de la tierra). (b) ¿Cuál es la fuerza de gravitación entre estos mismos objetos?

- Una varilla de vidrio frotada con un trozo de tela adquiere una carga de $+3 \times 10^{-10}\text{ C}$. ¿Cuántos electrones pasaron del vidrio a la seda?

Resp. $1,9 \times 10^9$.

- Hallar la fuerza sobre una carga de $5 \times 10^{-8}\text{ C}$ ejercida por una carga de $3 \times 10^{-9}\text{ C}$ para los siguientes valores de r : $0,5$, $1,0$, $2,0$, $2,5$ y $3,0\text{ m}$. Hacer un gráfico de la fuerza en función de r y unir los puntos mediante una curva suave.

- Hallar la fuerza (módulo y dirección) que ejerce el dipolo de la Fig. 17.23 sobre una carga de prueba $q = +10^{-10}\text{ C}$ en el punto P .

Resp. $-0,176\text{ N}$.

- Hallar la fuerza (módulo y dirección) que ejerce el dipolo de la Fig. 17.23 sobre una carga de prueba $q = +10^{-10}\text{ C}$ en el punto Q .

- Hallar la fuerza (módulo y dirección) que ejerce el dipolo de la Fig. 17.23 sobre una carga de prueba $q = +10^{-10}\text{ C}$ en el punto R . (Se necesita la suma vectorial.)

Resp. $1,8\text{ N}$.

- Hallar la fuerza (módulo y dirección) que ejerce el dipolo de la Fig. 17.23 sobre una carga de prueba $q = +10^{-10}\text{ C}$ en el punto S .

- Una carga q_1 ejerce una fuerza de 100 N sobre una carga de prueba $q_2 = 2 \times 10^{-5}\text{ C}$ localizada en un punto a $0,20\text{ m}$ de q_1 . (a) ¿Cuál es el campo eléctrico debido a q_1 en el punto? (b) ¿Cuál es el módulo de q_1 ?

Resp. (a) $5 \times 10^6\text{ N/C}$; (b) $2,2 \times 10^{-5}\text{ C}$.

* El ojo ve una sola imagen, porque el ojo retiene la imagen de una línea alrededor de $1/20\text{ s}$ después de que la línea ha desaparecido (persistencia de la visión). Así, pues, el ojo todavía ve la primera línea de una imagen concreta cuando la última línea se forma $1/30\text{ s}$ más tarde.

12. Hallar el módulo del campo eléctrico a 0,2, 0,5 y 0,8 m de una carga de 2×10^{-10} C. Hacer un dibujo a escala semejante al de la fig. 17.11 trazando flechas que representen el campo en estos puntos.
13. (a) ¿Cuáles son el módulo y la dirección de la fuerza total sobre la carga $q_3 = +5$ C ejercida por las cargas q_1 y q_2 de la figura 17.24? (b) ¿Cuál es el campo eléctrico en el punto P debido a q_1 y q_2 ?
 Resp. (a) $1,06 \times 10^{11}$ N; (b) $2,12 \times 10^{10}$ N/C.
- *14. (a) ¿Cuáles son el módulo y la dirección de la fuerza total sobre la carga $q_2 = 10$ C ejercida por las cargas q_1 y q_3 de la figura 17.24? (b) ¿Cuál es el campo eléctrico en el punto P debido a q_1 y q_3 ?
- *15. (a) ¿Cuáles son el módulo y la dirección de la fuerza total sobre la carga $q_3 = +3$ C ejercida por las cargas q_1 y q_2 de la figura 17.25? (Hace falta la suma de vectores.) (b) ¿Cuál es el campo eléctrico en el

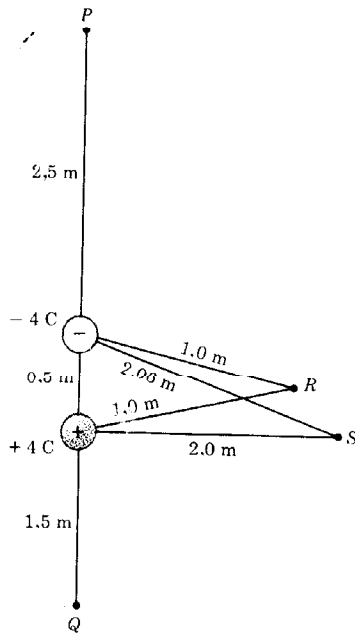


FIGURA 17.23. Problemas 7 al 10, 21 y 22.

punto P debido a q_1 y q_2 ?

Resp. (a) $1,3 \times 10^{10}$ N; (b) $4,3 \times 10^9$ N/C.

- *16. (a) ¿Cuáles son el módulo y la dirección de la fuerza total sobre la carga $q_2 = -8$ C ejercida por las cargas q_1 y q_3 de la figura 17.25? (b) ¿Cuál es el campo eléctrico en el punto Q debido a q_1 y q_3 ?

17. (a) ¿Cuál es el potencial a una distancia de 3 m de la carga $q_1 = 15 \times 10^{-6}$ C? (b) Una carga $q = +3$ C se halla originalmente a 3 m de q_1 . ¿Cuánto trabajo realiza sobre q el campo eléctrico cuando se desplaza esta carga hasta un punto situado a 5 m de distancia de q_1 ?
 Resp. (a) $4,5 \times 10^4$ V; (b) $5,4 \times 10^4$ J.
18. (a) ¿Cuál es la energía potencial de un electrón que se halla a 20 cm de una carga de 6×10^{-8} C? (b) ¿Cuánto trabajo hace falta para llevar al electrón muy lejos de la carga?
19. La energía potencial U de un protón es 3×10^{-18} J en un punto concreto. ¿Cuál es el potencial eléctrico V en este punto?
 Resp. 18,75 V.



FIGURA 17.24. Problemas 13, 14, y 23.

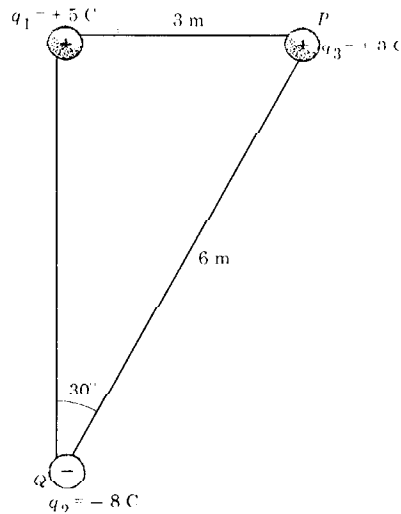


FIGURA 17.25. Problemas 15, 16, y 24.

20. Demostrar que la unidad de intensidad del campo eléctrico es igual a volts por metro.
21. (a) Hallar los potenciales en los puntos P, Q, R, y S de la Fig. 17.23. (b) ¿Cuánto trabajo se necesita para desplazar una carga de $7,5 \times 10^{-7}$ C desde el punto P al punto Q?
 Resp. (a) $-2,4 \times 10^9$, $+6,0 \times 10^9$, 0, y $+0,52 \times 10^9$ V; (b) 6300 J.

- * 22. Hallar varios puntos en la fig. 17.23 en los que el potencial es $-4,0 \times 10^9$ V.
23. (a) ¿Cuál es la energía potencial de la carga $q_3 = +5$ C de la fig. 17.24? (b) ¿Cuál es el potencial en el punto P debido a q_1 y q_2 ?
Resp. (a) $3,75 \times 10^{11}$ J; (b) $7,5 \times 10^{10}$ V.
24. (a) ¿Cuál es la energía potencial de la carga $q_3 = +3$ C de la fig. 17.25? (b) ¿Cuál es el potencial en el punto P debido a q_1 y q_2 ?
25. El núcleo de uranio tiene un radio de 8×10^{-15} m y contiene 92 protones. (a) ¿Cuál es el potencial en un punto P justo en la parte exterior del núcleo? (b) Un protón originalmente en reposo en P es repelido por la carga positiva del núcleo. ¿Cuál es la velocidad del protón cuando está muy alejado del núcleo?
Resp. (a) $1,65 \times 10^7$ V; (b) $5,62 \times 10^7$ m/s.
26. El ánodo de un tubo de rayos X se mantiene a un potencial de 12 000 V con respecto al cátodo. ¿Cuál es la velocidad de los electrones cuando tocan al ánodo?

Corriente

Capítulo 18

Una corriente es un flujo de carga. Cuando una carga positiva se mueve desde una región de potencial alto a otra de bajo potencial, su energía potencial se transforma en otras formas de energía. Por ejemplo, en una resistencia de calefacción la energía potencial de la carga en movimiento se transforma en calor, en una bombilla se transforma en luz (y calor) y en un motor se transforma en energía mecánica (la energía cinética del rotor). Una corriente pulsada y modulada se puede utilizar en las comunicaciones, como en el caso del telégrafo y la televisión, y en control, como en las computadoras. De hecho, todos los aparatos eléctricos y electrónicos utilizan corrientes de un modo u otro.

También utilizan corriente los sistemas biológicos. La anguila eléctrica crea una gran corriente para defenderse y ciertos peces navegan por medio de pequeñas corrientes que crean en el agua que les rodea. Y lo que es más importante, las corrientes intervienen en el transporte de impulsos nerviosos a lo largo de una fibra nerviosa.

18.1 LEY DE OHM

La Fig. 18.1 muestra dos esferas metálicas con carga igual y opuesta apoyadas en soportes aislados. Cuando se conectan las esferas por medio de un alambre conductor, los electrones fluyen de la esfera cargada negativamente a través del alambre y pasan a la esfera cargada positivamente. Durante este proceso hay un flujo de carga, o *corriente*, en el alambre. Específicamente, la intensidad de la corriente I en el alambre es la carga que pasa por segundo por el alambre. La unidad de intensidad es el coulomb por segundo (C/s), y se llama *ampere* (A):

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

La corriente existe en el alambre hasta que las esferas están completamente descargadas, y esto tiene una duración de aproximadamente un microsegundo ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$). Así, si la carga inicial sobre las esferas es $q = 10^{-8} \text{ C}$ y la corriente persiste durante el tiempo $t = 10^{-6} \text{ s}$, la intensidad media I durante este tiempo es

$$\begin{aligned} I &= \frac{q}{t} = \frac{10^{-8} \text{ C}}{10^{-6} \text{ s}} \\ &= 10^{-2} \text{ C/s} = 10^{-2} \text{ A} \end{aligned}$$

El alambre mismo permanece descargado, aun cuando en él haya corriente, porque entran en él tantos electrones de la esfera negativa como salen de él hacia la esfera positiva. No hay acumulación de carga en el alambre.

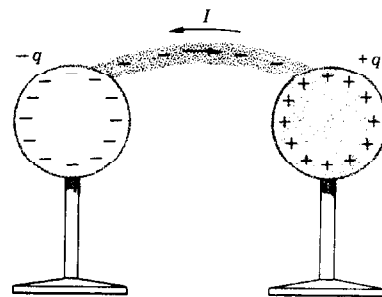


FIGURA 18.1
Dos esferas metálicas con carga igual y opuesta. Los electrones pasan de la esfera negativa a la positiva cuando las esferas están conectadas por un alambre.

OBSERVACIÓN. Se ha convenido en que la dirección de una corriente se defina como la dirección en la que fluiría una carga positiva. Como las cargas que se mueven en un metal resulta que son electrones cargados negativamente, la corriente convencional en un alambre está dirigida en sentido contrario al flujo real de carga. Sin embargo, esto no produce ningún problema porque un flujo de carga negativa en una dirección equivale a un flujo de carga positiva en dirección opuesta. Así, podemos evitar los signos menos innecesarios pensando que una corriente consiste en una carga positiva que fluye en una dirección aunque de hecho consista en una carga negativa que fluye en la dirección opuesta.

La corriente de la Fig. 18.1 está dirigida desde la esfera positiva (de alto potencial) a la negativa (de potencial bajo) y sólo dura hasta que la diferencia de potencial entre las esferas se anula. Sin embargo, se puede mantener una corriente permanente entre las dos esferas si hubiese un mecanismo para devolver la carga positiva a la esfera positiva tan rápidamente como fluye a la esfera negativa. Un mecanismo que haga esto recibe el nombre de *generador de fem*.* Por ejemplo, la máquina de inducción que aparece en la Fig. 17.9 (Apart. 17.2) es un generador de fem que utiliza la energía mecánica para separar la carga positiva y negativa. Esta energía mecánica es proporcionada por el trabajo realizado al girar la rueda y se transforma en energía potencial de las cargas sobre las esferas metálicas. Cuando se conectan las esferas por medio de un alambre, la carga pasa por el alambre y la energía potencial se transforma en calor y en otras formas de energía. Una corriente permanente puede mantenerse en el alambre dando vueltas continuamente a la rueda.

OBSERVACIÓN. Cuando la diferencia de potencial entre las esferas es suficientemente grande (20 000 V o más), el aire que hay entre ellas se ioniza y puede conducir una corriente. Esa corriente es visible en forma de una chispa. Se puede mantener un chisporroteo continuo entre las esferas dando vueltas continuamente a la rueda de la máquina de inducción. Esto demuestra la conversión de energía mecánica en energía potencial y de energía potencial en calor y luz. Una central eléctrica convierte, del mismo modo, la energía mecánica de la turbina del generador en energía eléctrica. El proceso, sin embargo, utiliza el principio de la inducción magnética (Apart. 19.4) más que la inducción eléctrica.

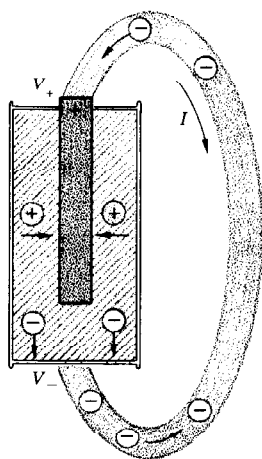


FIGURA 18.2

Dentro de una batería se utiliza energía química para desplazar la carga positiva al borne positivo y la carga negativa al borne negativo.

Una batería es un generador de fem que utiliza energía química para mantener una diferencia de potencial entre sus dos bornes. Cuando los bornes no están conectados se mantiene entre ellos una diferencia de potencial \mathcal{E} , llamada la fem de la batería. La fem de la batería de un flash es 1,5 V, o sea, que el borne positivo está a 1,5 V por encima del borne negativo. Cuando no hay corriente no se gasta energía, pero cuando están conectados los bornes por un hilo conductor, la carga pasa por el alambre para igualar la diferencia de potencial. Entonces la batería gasta energía química para separar las cargas tan pronto como se combinan. Esto se puede ver en la Fig. 18.2, la cual muestra que dentro de la batería, la carga positiva se desplaza hacia el borne positivo. La energía química se necesita para desplazar la carga contra la fuerza eléctrica repulsiva. (Si la corriente es grande, la diferencia de potencial V entre los bornes puede ser menor que \mathcal{E} . Sin embargo, despreciaremos aquí esta posibilidad.)

La energía que gasta la batería es descargada en el circuito externo. Así, supongamos que una intensidad I se mantiene en el circuito de la Fig. 18.2. En un tiempo t , la cantidad de carga positiva que pasa del

* Fem es una abreviatura de *fuerza electromotriz*.

borne positivo al negativo es

$$q = It \quad 18.1$$

El trabajo realizado sobre esta carga al moverla por el alambre es igual a la variación de su energía potencial. Por las Ecs. 17.6 y 17.10 tenemos

$$W = U_+ - U_- - qV_+ - qV_- - q(V_+ - V_-) = qV$$

en donde $V = V_+ - V_-$ es la diferencia de potencial entre los bornes. El trabajo realizado por segundo, o potencia P , es

$$P = \frac{W}{t} = \frac{qV}{t} = IV \quad 18.2$$

Ejemplo 1. ¿Cuál es la potencia desarrollada por una batería de 1,5 V que produce una corriente de 0,2 A?

La diferencia de potencial V es precisamente la fem de la batería, y por lo tanto obtenemos, a partir de la ecuación 18.2

$$P = I\mathcal{E} = 0,2 \text{ A} \times 1,5 \text{ V} = 0,3 \text{ A} \cdot \text{V}$$

Pero $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ y $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$, por lo tanto

$$1 \text{ A} \cdot \text{V} = (1 \text{ C/s})(1 \text{ J/C}) = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$$

O sea, que el producto de la diferencia de potencial en volts y la intensidad de la corriente en amperes es igual a la potencia en watts. Por lo tanto, la potencia entregada al circuito externo es

$$P = 0,3 \text{ A} \cdot \text{V} = 0,3 \text{ W}$$

Esta potencia es suministrada a expensas de la energía química interna de la batería.

OBSERVACION. El sistema SI ha sido adoptado sobre todo porque proporciona una relación simple entre las unidades eléctricas comunes (volts y amperes) y las unidades mecánicas de energía y potencia (joules y watts).

La intensidad I en un alambre depende de la diferencia de potencial V entre sus extremos. Para la mayoría de los metales I es proporcional a V y por lo tanto, la relación entre I y V se puede expresar

$$I = \frac{V}{R} \quad 18.3$$

o también

$$V = RI \quad 18.4$$

Ésta es la *ley de Ohm*. La constante de proporcionalidad R recibe el nombre de *resistencia* y su unidad es el volt por ampere (V/A), llamado *ohm* (Ω):

$$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

La ley de Ohm es válida sólo para ciertos materiales, sobre todo metales. Tiene gran importancia, no obstante, porque se aplica a los materiales usados corrientemente en circuitos eléctricos.

La resistencia de un conductor a un flujo de carga tiene su origen en las frecuentes colisiones que efectúan los electrones en movimiento con los átomos fijos. Cuando una diferencia de potencial es aplicada a lo largo de un alambre, se establece un campo eléctrico que ejerce una fuerza

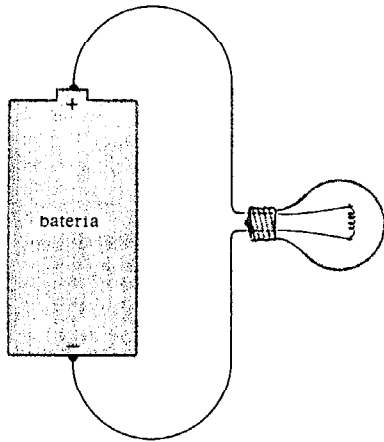


FIGURA 18.3
Una batería conectada
a una bombilla.

sobre cada electrón del alambre. Esta fuerza imprime una aceleración a un electrón libre y aumenta su energía cinética hasta que choca con un átomo estacionario. En la colisión, el exceso de energía cinética del electrón se transforma en energía vibratoria del átomo. Después de la colisión, el electrón es de nuevo acelerado por el campo hasta que choca otra vez con un átomo. En cada colisión el electrón pierde la energía cinética que adquirió desde la anterior colisión. Así, cuando el electrón se mueve por el alambre en arrancadas y paradas, su energía eléctrica se transforma en energía térmica.

OBSERVACIÓN. La Ec. 18.3 es análoga a la Ec. 7.16 para el flujo de un fluido por una cañería. El flujo Q es la análoga de la intensidad I , la diferencia de presión $p_2 - p_1$ es el análogo de la diferencia de potencial V , y la resistencia al fluido de una cañería (Ec. 7.17) es la análoga de la resistencia eléctrica de un alambre. La resistencia eléctrica de un alambre está relacionada con la longitud L y el radio r del alambre por

$$R = \frac{\rho L}{\pi r^2} \quad 18.5$$

en la que ρ es una constante, llamada *resistividad*, que es característica del metal de que está hecho el alambre. Esta ecuación es semejante a la Ec. 7.17 para la resistencia al fluido, excepto en que la resistencia eléctrica es proporcional a $1/r^2$, mientras que la resistencia al fluido es proporcional a $1/r^4$. Pero, igual que lo que pasa en una cañería, la resistencia de un alambre aumenta si aumenta la longitud y disminuye si aumenta el radio.

Se puede llevar muy lejos la analogía entre la corriente eléctrica y el flujo de un fluido. Por ejemplo, una bomba para fluido es la análoga de un generador de fem. Una bomba utiliza una fuente exterior de energía para crear una diferencia de presión entre sus aberturas de entrada y salida. Cuando están conectadas estas aberturas por una cañería, el fluido sale del lado de presión elevada, a través de la tubería, hacia el lado de presión baja. La bomba gasta energía por elevar la presión del fluido que circula.

La Fig. 18.3 muestra una batería conectada a una bombilla. La resistencia de los alambres de conexión es muy pequeña y se puede despreciar. Toda la resistencia R del circuito procede del filamento extremadamente delgado de la bombilla. Este circuito se representa esquemáticamente en la Fig. 18.4. El símbolo $\text{---}||| \text{---}$ representa una batería, siendo la línea vertical larga el borne positivo (alto potencial). El símbolo $\text{---} \sim \text{---}$ representa una *resistencia* eléctrica, o sea, un elemento del circuito, como la bombilla, que tiene una resistencia finita R . Las líneas continuas representan alambres sin resistencia. La corriente I se dirige desde el borne positivo al negativo por el circuito externo porque ésta es la dirección en la que fluiría la carga positiva.

La Ec. 18.4 se puede utilizar para calcular la diferencia de potencial entre varios puntos del circuito. La diferencia de potencial entre los puntos a y b es

$$V_b - V_a = 0$$

porque la resistencia entre a y b es cero. Del mismo modo, la diferencia de potencial entre c y d es

$$V_d - V_c = 0$$

La diferencia de potencial entre b y c , sin embargo, es

$$V_c - V_b = RI$$

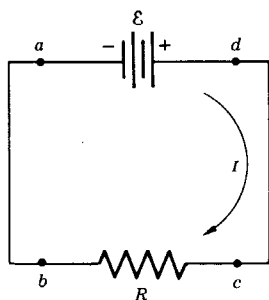


FIGURA 18.4
Diagrama esquemático
de un circuito consistente en una
batería conectada a una
resistencia (bombilla).

Si sumamos todas estas ecuaciones, tenemos

$$(V_b - V_a) + (V_d - V_c) + (V_c - V_b) = RI$$

o sea

$$V_d - V_a = RI$$

Pero $V_d - V_a$, que es la diferencia de potencial entre d y a , es la fem \mathcal{E} de la batería. Por lo tanto, tenemos

$$\mathcal{E} = RI \quad 18.6$$

En otras palabras, la diferencia de potencial a través de la resistencia es igual a la fem de la batería.

De acuerdo con la Ec. 18.2, se pierde energía en la resistencia en la proporción

$$P = VI \quad 18.7$$

Si V es reemplazada por RI (Ec. 18.4), la ecuación precedente se puede escribir

$$P = RI^2 \quad 18.8$$

Por otro lado, si I es reemplazada por V/R (Ec. 18.3), la potencia también se puede expresar

$$P = \frac{V^2}{R} \quad 18.9$$

Las tres expresiones para la potencia son de utilidad. Sin embargo, sólo hace falta recordar una expresión, porque las otras dos se deducen fácilmente de ella utilizando la ley de Ohm.

Ejemplo 2. ¿Cuál es la disipación de potencia en una bombilla de 4Ω conectada a una batería de 12 V ? ¿Cuál es la disipación de potencia en una bombilla de 2Ω conectada a la misma batería? ¿Qué bombilla es más brillante?

Utilizando la Ec. 18.8, se podría decir que se disipa más potencia en la bombilla de mayor resistencia; sin embargo, esto no es cierto porque cuanto mayor es la resistencia, menor es la intensidad de la corriente. Por la Ec. 18.3 vemos que la intensidad en la bombilla de 4Ω es

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12 \text{ V}}{4 \Omega} = 3 \text{ A}$$

y por lo tanto, de acuerdo con la Ec. 18.8, la potencia es

$$P = RI^2 = 4 \Omega \times (3 \text{ A})^2 = 36 \text{ W}$$

La intensidad en la bombilla de 2Ω es

$$I = \frac{12 \text{ V}}{2 \Omega} = 6 \text{ A}$$

y la potencia es

$$P = 2 \Omega \times (6 \text{ A})^2 = 72 \text{ W}$$

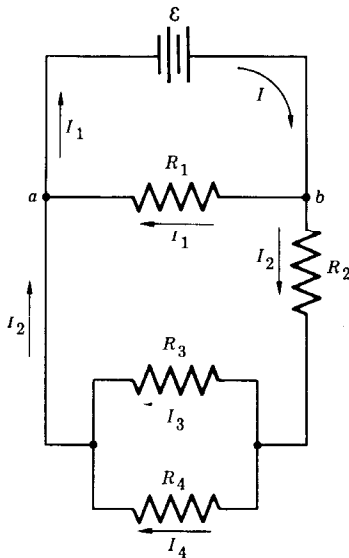


FIGURA 18.5
Red compleja de circuitos.

Como el potencial es el mismo en ambos casos, se obtienen los mismos resultados más directamente utilizando la Ec. 18.9 Para la bombilla de $4\ \Omega$ tenemos

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(12\ \text{V})^2}{4\ \Omega} = 36\ \text{W}$$

y para la de $2\ \Omega$ tenemos

$$P = \frac{(12\ \text{V})^2}{2\ \Omega} = 72\ \text{W}$$

Como el brillo de una bombilla aumenta con la potencia, la bombilla de $2\ \Omega$ es más brillante que la de $4\ \Omega$.

18.2 REDES DE CIRCUITOS

Los circuitos consisten a menudo en una red de resistencias interconectadas, como la que aparece en la Fig. 18.5 El problema básico de la teoría de circuitos es hallar la intensidad de la corriente en cada rama del circuito, cuando se conocen los valores de las resistencias. El análisis de ésta o de cualquier otra red utiliza solamente dos principios, conocidos como *leyes de Kirchhoff*.

Primera ley de Kirchhoff. *La intensidad total de la corriente que entra en un punto cualquiera del circuito es igual a la intensidad que sale del punto.* Esta ley es una consecuencia del hecho de que no se acumula carga en un punto de un circuito, de modo que sale de él tanta carga como ha entrado. Esto significa, por ejemplo, que la corriente I que entra en el punto b de la Fig. 18.5 es igual a la suma de $I_1 + I_2$ de las corrientes que salen de b .

Segunda ley de Kirchhoff. *La diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera de un circuito es la misma a lo largo de cualquier camino que conecte los puntos.* Esto quiere decir, por ejemplo, que la diferencia de potencial entre los puntos a y b de la Fig. 18.5 es la misma a lo largo del camino que pasa por R_1 que a lo largo del camino que pasa por R_2 y R_3 .

Estos principios pueden utilizarse para hallar la intensidad de la corriente en el circuito de la Fig. 18.6 que tiene dos resistencias conectadas en *serie*. Por la primera ley de Kirchhoff, la intensidad I que entra en el punto c procedente de R_1 es igual a la intensidad que sale del punto c y pasa por R_2 . De hecho, la intensidad I es la misma en cualquier punto del circuito porque sólo hay un camino a través de cada punto. La diferencia de potencial entre los puntos a y e a lo largo del camino $abcde$ se puede calcular por la ley de Ohm (Ec. 18.4). La diferencia de potencial entre los puntos a y b es

$$V_b - V_a = 0$$

porque la resistencia entre a y b es cero. Del mismo modo, la diferencia de potencial entre d y e es

$$V_e - V_d = 0$$

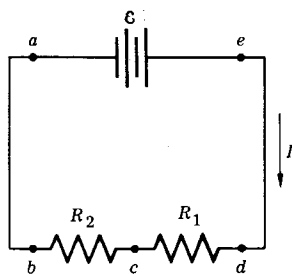


FIGURA 18.6
Dos resistencias conectadas en serie a una batería.

La caída de potencial a través de la resistencia R_2 es

$$V_c - V_b = R_2 I$$

y a través de R_1 es

$$V_d - V_c = R_1 I$$

Si sumamos estas cuatro ecuaciones, tenemos

$$\begin{aligned} (V_b - V_a) + (V_e - V_d) + (V_c - V_b) + (V_d - V_c) &= R_1 I + R_2 I \\ \text{o sea } V_e - V_a &= (R_1 + R_2) I \end{aligned}$$

que es la diferencia de potencial entre e y a a lo largo del camino $abcde$. Por la segunda ley de Kirchhoff, esto es igual a la diferencia de potencial entre e y a a lo largo del camino que pasa por la batería, que es la fem de la batería. Por lo tanto, tenemos

$$\mathcal{E} = (R_1 + R_2) I$$

y así, la intensidad en el circuito es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2}$$

Comparando esta expresión con la Ec. 18.6, vemos que las dos resistencias R_1 y R_2 conectadas en serie actúan como una sola resistencia cuyo valor es

$$R = R_1 + R_2 \quad \text{serie} \quad 18.10$$

Ejemplo 1. Consideremos una batería con $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$ conectada en serie a dos bombillas cuyas resistencias son $R_1 = 2 \Omega$ y $R_2 = 4 \Omega$. ¿Cuál es la intensidad de corriente en el circuito y la potencia disipada en cada bombilla?

A partir de la Ec. 18.10 la resistencia del circuito es

$$R = R_1 + R_2 = 2 \Omega + 4 \Omega = 6 \Omega$$

Por la Ec. 18.6 la intensidad de la corriente es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12 \text{ V}}{6 \Omega} = 2 \text{ A}$$

La caída de potencial en R_1 es

$$V_1 = R_1 I = (2 \Omega)(2 \text{ A}) = 4 \text{ V}$$

y la caída de potencial en R_2 es

$$V_2 = R_2 I = (4 \Omega)(2 \text{ A}) = 8 \text{ V}$$

La suma de las caídas de potencial en las dos resistencias es igual a la fem de la batería. La potencia disipada en las resistencias se halla utilizando la Ec. 18.8:

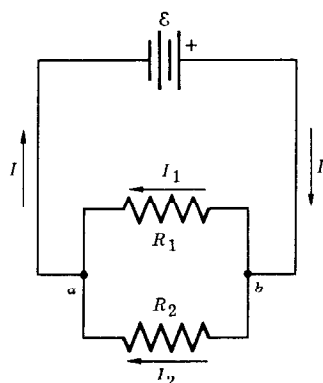


FIGURA 18.7
Dos resistencias conectadas
en paralelo a una batería.

$$P_1 = R_1 I^2 = (2 \, \Omega)(2 \, \text{A})^2 = 8 \, \text{W}$$

$$P_2 = R_2 I^2 = (4 \, \Omega)(2 \, \text{A})^2 = 16 \, \text{W}$$

En este ejemplo se disipa más potencia en la resistencia grande porque la intensidad es la misma en las dos resistencias. En el ejemplo 2 del Apart. 18.1 se disipaba más potencia en la resistencia pequeña porque la diferencia de potencial en los extremos de las resistencias era la misma.

La Fig. 18.7 muestra dos resistencias conectadas en *paralelo* a una batería. Comparemos esto con el circuito en serie de la Fig. 18.6. En el circuito en serie toda la corriente pasa por R_1 y R_2 , mientras que en el circuito en paralelo la corriente se divide, pasando parte por R_1 y parte por R_2 . Como la conexión en paralelo proporciona dos caminos entre los puntos a y b , la resistencia total entre estos puntos es menor que lo que sería si en el circuito hubiese una sola resistencia. Supongamos que I es la intensidad de la corriente que pasa por la batería y que I_1 e I_2 son las intensidades en R_1 y R_2 , respectivamente. La corriente que entra en el punto b es I y las corrientes que salen del punto b son I_1 e I_2 . Por lo tanto, según la primera ley de Kirchhoff tenemos que

$$I = I_1 + I_2 \quad 18.11$$

Las caídas de potencial a través de R_1 y R_2 son iguales porque cada resistencia es un camino entre los puntos a y b . Esta diferencia de potencial es también igual a la fem de la batería porque la batería es otro camino entre estos puntos. En consecuencia, tenemos

$$V_b - V_a = R_1 I_1 = R_2 I_2 = \varepsilon$$

y por lo tanto, las intensidades en las resistencias son

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1} \quad \text{y} \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2}$$

De acuerdo con la Ec. 18.11 la intensidad que pasa por la batería es

$$\begin{aligned} I = I_1 + I_2 &= \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} \\ &= \varepsilon \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \\ &= \frac{\varepsilon}{R} \end{aligned}$$

O sea, dos resistencias conectadas en paralelo actúan como una sola resistencia R , dada por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{paralelo} \quad 18.12$$

El valor de R es siempre menor que R_1 o R_2 .

Ejemplo 2. Dos bombillas cuyas resistencias son $R_1 = 2 \, \Omega$ y $R_2 = 4 \, \Omega$ se conectan en paralelo a una batería de 12 V. ¿Cuánto valen la resistencia total del circuito y la intensidad que pasa por cada resistencia?

Según la ecuación 18.12 la resistencia total del circuito viene dada por

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{4\Omega} = \frac{3}{4}\Omega^{-1}$$

o sea

$$R = \frac{4}{3}\Omega$$

y por lo tanto, la intensidad que pasa por la batería es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12\text{ V}}{4/3\Omega} = 9\text{ A}$$

$$12 \cdot \frac{3}{4} = \frac{36}{4} = 9\text{ A}$$

Esto hay que compararlo con el valor de 2 A que se obtuvo cuando las resistencias fueron conectadas en serie. Las intensidades en las resistencias individuales son

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1} = \frac{12\text{ V}}{2\Omega} = 6\text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = \frac{12\text{ V}}{4\Omega} = 3\text{ A}$$

y

corriente total
9 A

La corriente total de 9 A se divide entre las dos resistencias, correspondiendo la intensidad mayor a la resistencia más pequeña.

OBSERVACIÓN. Las reglas para sumar resistencias en serie y paralelo se aplican también a la resistencia de fluidos. El sistema circulatorio del cuerpo es una red compleja de vasos en serie y paralelo, y los métodos utilizados para analizar los circuitos eléctricos son aplicables a los problemas de flujo de fluidos en el cuerpo. Por ejemplo, la Fig. 18.8 muestra dos vasos sanguíneos de resistencias R_1 y R_2 conectados en paralelo. Supongamos que $p = p_b - p_a$ es la diferencia de presión entre los puntos a y b . El flujo de fluido Q que pasa por los dos vasos viene dado por la Ec. 7.17.

$$Q = \frac{p}{R}$$

en donde

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

Así, pues, podemos escribir $Q = p \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$ 18.13

Supongamos que se obstruye la vena 2 de modo que no pasa sangre por ella. (Esto significa que R_2 es infinitamente grande o que $1/R_2$ es cero.) Entonces toda la sangre fluirá por la vena 1, de modo que

$$Q' = \frac{p'}{R_1} \quad 18.14$$

Para mantener el mismo flujo de fluido, debe crecer la presión p' de la vena. O sea que el cuerpo intenta hacer $Q' = Q$ aumentando la presión. El aumento necesario de presión se halla haciendo Q' igual a Q en la Ec. 18.14 y despejando p' :

$$p' = R_1 Q$$

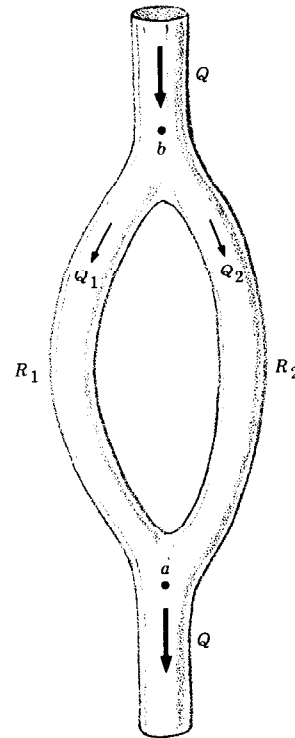


FIGURA 18.8
Dos vasos sanguíneos conectados en paralelo.

Sustituyendo el valor de Q dado por la Ec. 18.13, tenemos

$$p' = p \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Por ejemplo, si R_2 era originalmente igual a R_1 , la presión p' debe igualar a $2p$ para mantener el mismo flujo una vez que la vena 2 queda obstruida. ¿Cuál es el equivalente del generador de fem del sistema circulatorio?

Ejemplo 3. Hallar las intensidades I , I_1 , I_2 , I_3 , e I_4 del circuito de la Fig. 18.5 cuando las resistencias valen

$$R_1 = 15 \, \Omega; \quad R_2 = 8 \, \Omega; \quad R_3 = 3 \, \Omega; \quad R_4 = 6 \, \Omega$$

y la fem de la batería es de 3 V.

La intensidad en las distintas partes de un circuito complicado se calcula utilizando repetidamente las Ecs. 18.10 y 18.12. Las resistencias R_3 y R_4 están conectadas en paralelo, por lo que son equivalentes a una única resistencia R' dada por

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{3 \, \Omega} + \frac{1}{6 \, \Omega}$$

o sea

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

La resistencia R' está en serie con R_2 , por lo tanto la resistencia efectiva de R' y R_2 juntas es

$$R'' = R_2 + R' = 8 \, \Omega + 2 \, \Omega = 10 \, \Omega$$

El circuito está dibujado de nuevo en la Fig. 18.9, en el que R'' reemplaza a R_2 , R_3 y R_4 . Esto muestra que R_1 y R'' están en paralelo y, por lo tanto, la resistencia total R de todo el circuito es

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R''} = \frac{1}{15 \, \Omega} + \frac{1}{10 \, \Omega}$$

o sea

$$R = 6 \, \Omega$$

Si la fem de la batería es 3,0 V, la intensidad I es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = 0,5 \, \text{A}$$

La diferencia de potencial en los extremos de R_1 y R'' es también 3,0 V, de modo que las intensidades I_1 e I_2 son

$$I_1 = \frac{3,0 \, \text{V}}{R_1} = \frac{3,0 \, \text{V}}{15 \, \Omega} = 0,2 \, \text{A}$$

e

$$I_2 = \frac{3,0 \, \text{V}}{R''} = \frac{3,0 \, \text{V}}{10 \, \Omega} = 0,3 \, \text{A}$$

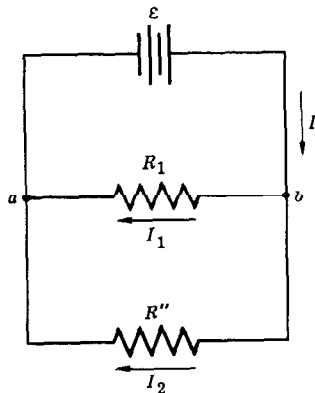


FIGURA 18.9
El mismo circuito de la Fig. 18.5 reconstruido con R_2 , R_3 y R_4 sustituidos por la resistencia equivalente R'' .

Obsérvese que $I_1 + I_2 = I$, de acuerdo con la primera ley de Kirchhoff. La diferencia de potencial entre los puntos a y b se puede expresar (ver la Fig. 18.5)

$$V_b - V_a = 3,0 \text{ V} = I_2 R_2 + I_3 R_3 \\ = 0,3 \text{ A} \times 8 \Omega + I_3 \times 3 \Omega$$

Despejando I_3 obtenemos

$$I_3 \times 3 \Omega = 3,0 \text{ V} - 2,4 \text{ V} = 0,6 \text{ V}$$

de modo que

$$I_3 = \frac{0,6 \text{ V}}{3 \Omega} = 0,2 \text{ A}$$

Finalmente, de acuerdo con la condición $I_2 = I_3 + I_4$, la intensidad en R_1 resulta ser

$$I_4 = I_2 - I_3 = 0,3 \text{ A} - 0,2 \text{ A} = 0,1 \text{ A}$$

Esto demuestra cómo por medio de un análisis sistemático del circuito se pueden hallar las intensidades en todas las resistencias del mismo.

18.3. CORRIENTE ALTERNA

Una batería mantiene una diferencia de potencial constante entre sus bornes. Cuando estos bornes están conectados a una resistencia, se produce una corriente permanente que va a través de la resistencia desde el borne de alto potencial al de bajo potencial. Como la dirección de la corriente es constante, se dice que es una *corriente continua* (cc).

Un generador eléctrico produce un potencial oscilante entre sus bornes, tal como se ve en la Fig. 18.10. El potencial recorre un ciclo completo de oscilación en el tiempo τ , llamado *período*. La curva del potencial tiene la forma de una onda sinusoidal (Apart. 13.4) y se representa por la ecuación

$$V = V_p \sin\left(2 \pi \frac{t}{\tau}\right) \quad 18.15$$

en donde V_p es el potencial máximo. La intensidad de la corriente I en una resistencia colocada entre los bornes de un generador viene dada por la ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R} = I_p \sin\left(2 \pi \frac{t}{\tau}\right) \quad 18.16$$

en donde

$$I_p = \frac{V_p}{R} \quad 18.17$$

Como la corriente oscila con el tiempo, se le llama *corriente alterna* (ca).

En los Estados Unidos y Canadá, el período de toda la corriente alterna comercial es $\tau = 1/60$ s. La *frecuencia* f , que se define como $1/\tau$, es

$$f = \frac{1}{\tau} = 60 \text{ s}^{-1}$$

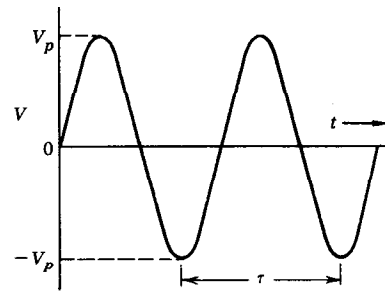


FIGURA 18.10
Variación temporal del potencial
en los bornes de un generador ca.

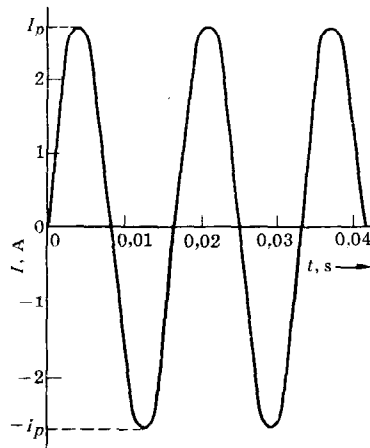


FIGURA 18.11
Variación temporal de una corriente alterna de 60 Hz en una resistencia.

La unidad de frecuencia es el hertz, de modo que

$$f = 60 \text{ s}^{-1} = 60 \text{ Hz}$$

En Europa la frecuencia de la corriente alterna es 50 Hz.

Si se coloca una resistencia de 50Ω entre los bornes de un generador de corriente alterna cuyo potencial máximo es 170 V, la corriente en la resistencia viene dada por las Ecs. 18.16 y 18.17 con

$$I_p = \frac{V_p}{R} = \frac{170 \text{ V}}{50 \Omega} = 3,4 \text{ A}$$

Esta corriente está representada gráficamente en la Fig. 18.11, suponiendo que $f = 60 \text{ Hz}$. La corriente alterna el signo y también el potencial. Cuando la corriente es positiva, la carga fluye en una dirección y cuando la corriente es negativa, la carga fluye en la otra dirección. Así, pues, no hay un flujo neto de carga alrededor del circuito; por el contrario, la carga se mueve hacia atrás y adelante en la resistencia.

La potencia disipada en una resistencia todavía viene dada por las Ecs. 18.7, 18.8 y 18.9. Utilizando las Ecs. 18.8 y 18.16 obtenemos

$$\begin{aligned} P &= RI^2 = R[I_p \sin(2\pi ft)]^2 \\ &= RI_p^2 \sin^2(2\pi ft) \end{aligned}$$

Esta potencia aparece representada en la Fig. 18.12. De este modo, aunque la corriente cambia de signo, la potencia, que es proporcional al cuadrado de la intensidad, es siempre positiva. La potencia varía entre cero y RI_p^2 dos veces cada ciclo, o sea 120 veces por segundo, pero en la mayoría de los casos sólo interesa la potencia media \bar{P} . Se puede demostrar que

$$\bar{P} = R\bar{I}^2 = \frac{1}{2}RI_p^2$$

en donde \bar{I}^2 es el valor medio del cuadrado de la intensidad de la corriente.

Intensidad eficaz y tensión eficaz

Es útil definir una corriente continua I_{ef} que dé la misma disipación de potencia que la corriente alterna. O sea, I_{ef} se define por la condición†

$$RI_{ef}^2 = \bar{P} = R\bar{I}^2 = \frac{1}{2}RI_p^2$$

de modo que

$$I_{ef}^2 = \bar{I}^2 = \frac{1}{2}I_p^2$$

e

$$I_{ef} = \sqrt{\bar{I}^2} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = \frac{I_p}{1,41}$$

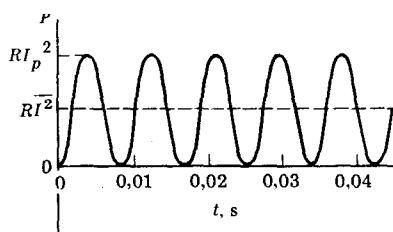


FIGURA 18.12
Variación temporal de la potencia disipada en una resistencia debida a una corriente alterna de 60 Hz.

† La intensidad eficaz I_{ef} es la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de la intensidad I : $I_{ef} = \sqrt{\bar{I}^2}$.

La tensión continua o eficaz V_{ef} se define en función de I_{ef} por la ley de Ohm:

$$V_{ef} = RI_{ef}$$

Pero $I_{ef} = I_p/\sqrt{2}$, luego

$$V_{ef} = \frac{RI_p}{\sqrt{2}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

puesto que $RI_p = V_p$. Así, pues, una corriente alterna se puede tratar como una corriente continua de tensión

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad 18.18$$

e intensidad

$$I_{ef} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad 18.19$$

y de aquí que los métodos del Apart. 18.2 se puedan utilizar para analizar circuitos de corriente alterna. La importancia de I_{ef} y V_{ef} es que se pueden utilizar en las Ecs. 18.7, 18.8 y 18.9 para hallar la potencia media.

En los Estados Unidos y Canadá, la tensión eficaz de una toma de corriente es $V_{ef} = 120$ V. La tensión máxima que sale por el enchufe es

$$V_p = \sqrt{2} \times 120 \text{ V} = 170 \text{ V}$$

En Europa, la tensión eficaz es 240 V, que corresponde a una tensión máxima de 340 V.

Ejemplo. ¿Cuánto vale la resistencia de un tostador americano de 1200 W? ¿Cuál sería la disipación de potencia de dicho tostador si se conectara a un enchufe en Inglaterra?

La potencia nominal da la potencia media disipada a 120 V. Por lo tanto, utilizando la Ec. 18.9 hallamos

$$R = \frac{V_{ef}^2}{P} = \frac{(120 \text{ V})^2}{1200 \text{ W}} = 12 \Omega$$

Si enchufásemos este tostador en Inglaterra, la potencia disipada sería

$$P = \frac{(240 \text{ V})^2}{12 \Omega} = 4800 \text{ W}$$

A esta potencia, el elemento calefactor del tostador se fundiría. En general, un aparato proyectado para funcionar a una tensión no funcionará de manera conveniente a una tensión notablemente distinta.

Instalación doméstica

La energía eléctrica se distribuye desde el generador a las casas por un par de líneas de transporte de energía. Cada casa está conectada en

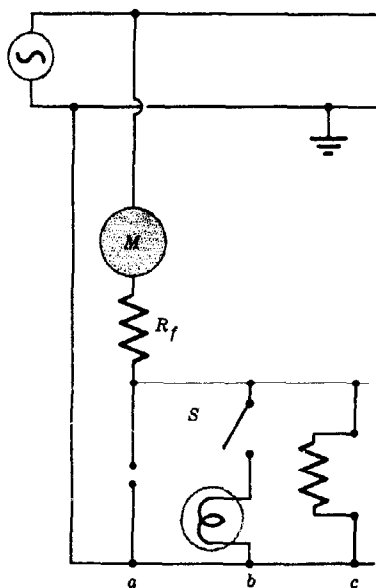


FIGURA 18.13
Conexiones eléctricas de una casa.

paralelo a estas líneas y la compañía de electricidad mantiene una tensión eficaz constante entre las líneas. Esto aparece en forma de diagrama en la Fig. 18.13, en donde el símbolo $\text{---}(\text{S})\text{---}$ designa un generador de ca y el símbolo $\text{---}||| \text{---}$ designa una conexión a tierra. La línea eléctrica de tierra se conecta a ésta por medio de cables enterrados en el suelo, lo cual mantiene la línea a potencial cero. El potencial de la otra línea (la que lleva corriente) oscila con respecto a la de tierra. Un fusible R_f y un contador M están colocados en serie con la línea que entra en la casa, pero todos los aparatos están conectados en paralelo. La línea a muestra la conexión a un enchufe de pared. Toda la tensión de 120 V se mantiene entre los terminales del enchufe, pero cuando no hay conectado ningún aparato al enchufe, no hay corriente en esta parte del circuito. La línea b muestra la conexión a una luz del techo controlada por un interruptor de pared S . La línea c es otro enchufe de pared con un aparato conectado a él.

Cuando se enchufan más aparatos en paralelo a la línea de la casa, disminuye la resistencia total a través de la línea y aumenta la corriente total I_{et} que entra en la casa. De acuerdo con la Ec. 18.7, la potencia total que llega a la casa es

$$\bar{P} = V_{et} I_{et}$$

Por ejemplo, si $I_{et} = 35$ A, la potencia es

$$\bar{P} = 120 \text{ V} \times 35 \text{ A} = 4200 \text{ W} = 4.2 \text{ kW}$$

en la que $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$. Si se mantiene la potencia de 4,2 kW durante 5 h, la energía consumida es

$$E = 4.2 \text{ kW} \times 5 \text{ h} = 21 \text{ kWh}$$

en donde el *kilowatt-hora* (kWh) es la unidad de energía usada por la industria de energía eléctrica. Está relacionada con el joule por

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

En 1974, la capacidad total de producción de los Estados Unidos fue de 4.6×10^5 MW (1 megawatt = $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$), y se produjo un total de 1.9×10^{12} kWh de energía eléctrica. Lo que la industria eléctrica vende al público es energía, o sea, que la industria cobra por kilowatts-hora no por kilowatts.

El contador M de la Fig. 18.13 es un pequeño elemento que da vueltas a una velocidad proporcional a la corriente y registra, a efectos de facturación, la energía total consumida. El fusible R_f consiste en una resistencia metálica especial que se funde cuando la corriente pasa de cierto valor, interrumpiendo de este modo la conexión entre la casa y la línea de transporte. Se produce una corriente muy grande cuando hay aplicados demasiados aparatos a la línea (*circuito sobrecargado*) o cuando se coloca accidentalmente una pequeña resistencia a través de los terminales de un enchufe (*cortocircuito*). Un cortocircuito reduce la resistencia total del circuito de la casa a casi cero, produciéndose una corriente demasiado grande. Si el fusible no rompiese inmediatamente el circuito, los conductores de las paredes se podrían calentar tanto como para dar lugar a un incendio.

Seguridad eléctrica

Como un lado de una toma de corriente está unido a tierra, un circuito queda cerrado cuando el otro lado (el que lleva corriente o lado activo) se conecta directamente a tierra. Esto sucede, por ejemplo, si el conductor activo está conectado a una cañería de agua o a una cañería de desagüe con un buen contacto eléctrico a tierra. Así, una persona puede quedar electrocutada tocando simultáneamente una cañería de agua y el terminal activo de una toma de corriente. También se puede recibir un shock con sólo tocar el terminal activo de un enchufe si se está de pie sobre un suelo mojado o sobre el piso de un sótano húmedo, ya que el agua es un conductor bastante bueno.

Si una persona está en buen contacto con el suelo cuando toca el enchufe, la única resistencia del circuito es la de su cuerpo. La piel seca es un buen aislante, cuya resistencia es de $10^6 \Omega$ o más, pero la piel húmeda es un buen conductor. Así, si se hace contacto con una mano mojada, la resistencia de la piel queda cortocircuitada y la única resistencia que queda es la del cuerpo como un todo, que vale solamente unos $10^3 \Omega$. Por lo tanto, haciendo un buen contacto con un enchufe de 120 V, la corriente en el cuerpo es

$$I_{ef} = \frac{120 \text{ V}}{1000 \Omega} = 0,12 \text{ A} = 120 \text{ mA}$$

en donde 1 miliampere = 1 mA = 10^{-3} A.

El 75 % de la población percibe una corriente de 1,0 mA a 60 Hz como un pequeño hormigueo. Una corriente mayor empieza a romper el propio sistema eléctrico del cuerpo, interfiriendo la transmisión de los impulsos nerviosos. Una corriente de 10 mA es lo suficientemente grande como para paralizar la mano que sujeta el hilo eléctrico, impidiendo escapar a la persona. Una corriente de 120 mA (a 60 Hz), si dura más de unos pocos segundos, es suficiente para producir fibrilación ventricular (o sea, una contracción nerviosa de parte del músculo cardíaco que impide las contracciones coordinadas del corazón).

Una persona puede quedar electrocutada por tocar un aparato eléctrico en el que un conductor activo se ha soltado accidentalmente, porque ahora hay un circuito completo desde el terminal activo del enchufe pasando por el aparato y el cuerpo de la persona hasta tierra. Para evitar esto, todos los aparatos modernos tienen un tercer hilo que conecta el cuerpo del aparato a las cañerías del agua de la casa. Si se suelta un hilo, se produce inmediatamente un cortocircuito a través del tercer hilo y el fusible interrumpirá el circuito.

18.4. CONDENSADORES

Una resistencia es solamente uno de los muchos elementos que se utilizan en los circuitos eléctricos. Otro elemento importante es el *condensador*, que consta de dos superficies conductoras separadas por una delgada lámina aislante (Fig. 18.14). Los hilos unidos a las superficies permiten que el condensador sea conectado en un circuito eléctrico. La Fig. 18.15 es un diagrama de un circuito en el que un condensador, simbolizado por $\text{—}||\text{—}$ está conectado en serie a una resistencia R y una batería \mathcal{E} . Como hay aislamiento entre las placas del condensador, la carga no puede fluir por este elemento y, por lo tanto, no se puede establecer una corriente continua a través de un condensador. Sin embargo, cuando el interruptor S está cerrado, habrá una *corriente*

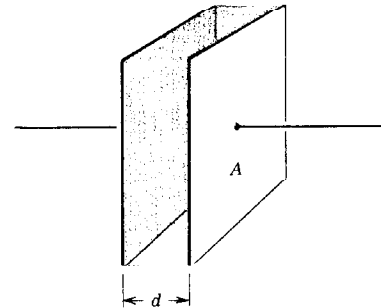


FIGURA 18.14
Condensador.

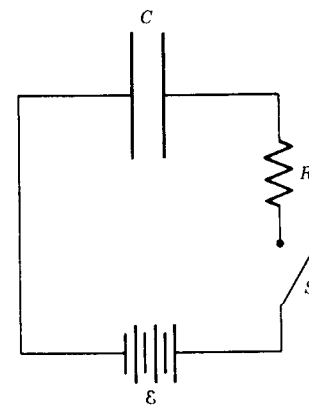


FIGURA 18.15
Condensador conectado en serie
a una batería y a una resistencia.

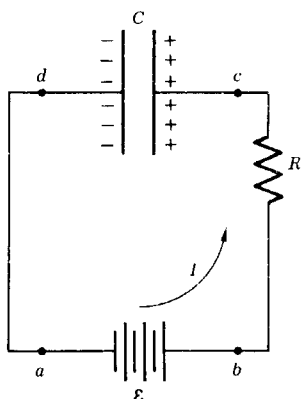


FIGURA 18.16

La corriente transitoria existe en un circuito de condensadores hasta que el potencial entre las placas del condensador es igual a la fem de la batería.

transitoria a través de la resistencia puesto que los electrones fluyen de una placa del condensador a la otra (Fig. 18.16). En consecuencia, la carga positiva q se acumulará sobre una placa, mientras que una cantidad igual de carga negativa q se acumulará en la otra, hasta que el potencial $V = V_c - V_d$ del condensador sea igual a la fem de la batería. La corriente transitoria I es grande en el instante en el que se cierra el interruptor, pero disminuye rápidamente hasta cero cuando el condensador se ha cargado (Fig. 18.17a). Al mismo tiempo, el valor de la carga de cada placa del condensador aumenta desde cero hasta su valor final q_0 , tal como se ve en la Fig. 18.17b. En cualquier instante, la carga q del condensador es proporcional a su potencial V . Esto se puede expresar

$$q = CV \quad 18.20$$

en donde C es una constante, llamada *capacidad*. La unidad de capacidad es coulombs por volt (C/V) y se llama *farad* (F).

El producto RC de resistencia y capacidad tiene la dimensión del tiempo. Esto se puede ver observando que RC tiene la unidad

$$\frac{V}{A} \frac{C}{V} = \frac{C}{A} = \frac{C}{C/s} = s$$

En el tiempo $\tau = RC$, la corriente transitoria de la Fig. 18.17a disminuye hasta el 37 % de su valor inicial, mientras que la carga del condensador (Fig. 18.17b) alcanza el 63 % de su valor máximo. A partir de la Ec. 18.20, el potencial del condensador es $V = q/C$, por lo tanto V también alcanza el 63 % de su valor máximo en el tiempo τ . Así,

$$\tau = RC \quad 18.21$$

es el *tiempo característico* requerido para que un circuito con un condensador cambie su estado. Tales circuitos se pueden utilizar para producir pulsos eléctricos con una frecuencia definida.

Ejemplo 1. Un condensador de $80 \mu\text{F}$, inicialmente descargado, se conecta a través de una resistencia de 500Ω a una batería de 45 V . ¿Cuál es la carga final del condensador? ¿Cuál es la carga del condensador $0,1 \text{ s}$ después de cerrar el circuito?

Según la Ec. 18.20 la carga final del condensador es

$$q_0 = CV = (80 \times 10^{-6} \text{ F})(45 \text{ V}) = 3,6 \times 10^{-3} \text{ C}$$

Según la Ec. 18.21 el tiempo característico del circuito es

$$\tau = RC = (500 \Omega)(80 \times 10^{-6} \text{ F}) = 0,04 \text{ s}$$

de modo que $0,1 \text{ s}$ es igual a $2,5 \tau$. En la Fig. 18.17b vemos que a $2,5 \tau$ la carga del condensador es

$$q = 0,9 q_0 = (0,9)(3,6 \times 10^{-3} \text{ C}) = 3,24 \times 10^{-3} \text{ C}$$

Una vez que la corriente transitoria se hace cero, no hay corriente continua en el circuito de la Fig. 18.16, porque un condensador es un

$$q(t) = q_0 (1 - e^{-t/\tau}) = 3,316 \times 10^{-3}$$

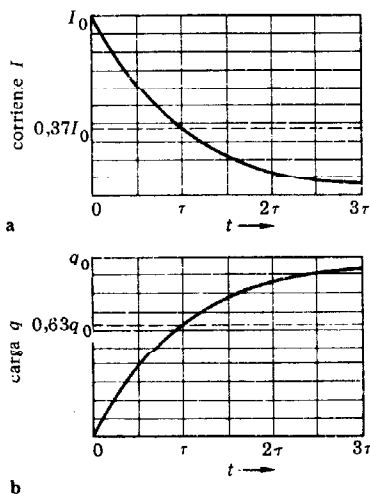


FIGURA 18.17

(a) Variación temporal de la corriente transitoria en un circuito de resistencia y condensador.

(b) Variación temporal de la carga en cada una de las placas de un condensador en un circuito de resistencia y condensador. La unidad de tiempo sobre el eje horizontal es $\tau = RC$, que es el tiempo característico del circuito.

elemento del circuito con una resistencia infinita para un potencial continuo. Por otro lado, supongamos que se aplica a un condensador un potencial alterno (Fig. 18.18). La carga sobre cada placa cambia de positiva a negativa cada vez que el potencial del condensador se invierte y, por lo tanto, hay una corriente alterna en el circuito. Así, pues, un condensador es un elemento que ofrece poca resistencia a un potencial alterno y una resistencia infinita a un potencial continuo. En muchos circuitos electrónicos, en los que el potencial es una mezcla de una componente continua y otra alterna, los condensadores se utilizan para filtrar la componente continua de la componente alterna. El valor de C está relacionado con el área A de las placas del condensador y la distancia d entre ellas por medio de

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi K d} \quad 18.22$$

en donde $K = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ es la constante eléctrica (Apart. 17.2), y ϵ es la *constante dieléctrica*, un número adimensional característico del material aislante. Es 1 para el aire y varía entre 2 y 6 para la mayoría de los materiales aislantes. Como K es tan grande, la capacidad (en farads) de un condensador de tamaño normal es muy pequeña. Los condensadores que se utilizan en los circuitos varían entre 0,1 F y 1 pF (1 picofarad = 10^{-12} F).

Ejemplo 2. ¿Cuál es la capacidad de un condensador de placas de superficie 5 cm^2 separadas por un aislante de 0,1 mm de espesor? La constante dieléctrica del aislante es 3,5. Según la Ec. 18.22 la capacidad vale

$$\begin{aligned} C &= \frac{\epsilon A}{4\pi K d} = \frac{(3,5)(5 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{(4\pi)(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(0,1 \times 10^{-3} \text{ m})} \\ &= 1,24 \times 10^{-10} \text{ F} = 124 \text{ pF} \end{aligned}$$

18.5. BIOELECTRICIDAD

En la mayoría de las células animales hay una diferencia de potencial entre el interior y el exterior de la célula. Esto es aún más pronunciado en las células nerviosas y musculares donde, en estado de reposo, el potencial interior es de unos -85 mV con respecto al potencial exterior. Un impulso nervioso es un cambio en este potencial que se propaga a lo largo de una fibra nerviosa o axón. Los impulsos nerviosos llevan señales de información desde las células sensoriales al cerebro y mandan señales en sentido inverso desde el cerebro a las células musculares. Un impulso nervioso, al alcanzar una fibra muscular, produce cambios de potencial semejantes que se propagan a lo largo de la fibra, iniciando la contracción de la misma. De este modo, la electricidad juega un papel fundamental en la organización neuromuscular de los animales. Los músculos de algunos peces han perdido su capacidad para contraerse y son utilizados exclusivamente para producir un potencial eléctrico. La conocida anguila eléctrica produce un gran potencial que utiliza para su defensa, pero muchos peces producen un pequeño potencial que emplean para detectar objetos en las aguas circundantes.

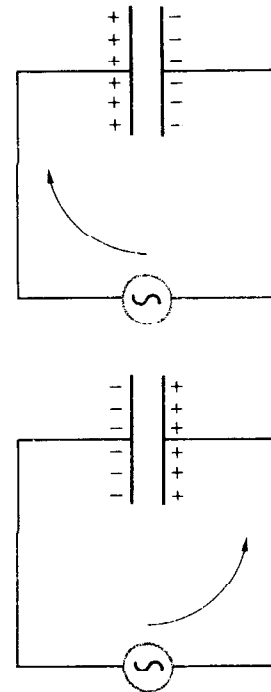
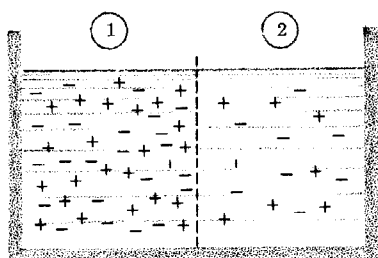


FIGURA 18.18
La carga pasa de una placa de un condensador a la otra cada vez que cambia de signo el potencial de un generador de ca.

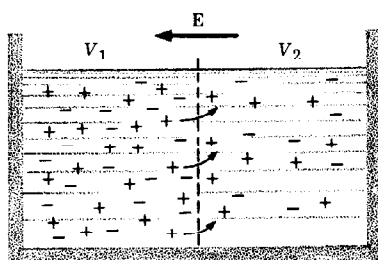
El potencial de Nernst

El potencial de reposo de una célula es producido por diferencias en la concentración de iones dentro y fuera de la célula y por diferencias en la permeabilidad de la pared celular a los diferentes iones. Para entender esto, veamos primero el caso simple de dos soluciones de cloruro potásico, KCl, de distinta concentración, separadas por una membrana semipermeable (Fig. 18.19). En solución, el KCl se disocia en iones potasio cargados positivamente, K^+ , e iones cloruro cargados negativamente, Cl^- . Estos iones se mueven independientes unos de otros, pero cualquier pequeña región de fluido tiene por término medio igual número de iones K^+ y Cl^- y, por lo tanto, es eléctricamente neutra. Si la membrana es permeable a los iones K^+ pero no a los iones Cl^- , los iones K^+ se difundirán libremente a un lado y otro de la membrana. Sin embargo, como hay más iones en el compartimiento 2, inicialmente fluirán más iones K^+ del 1 al 2 que del 2 al 1. Como el Cl^- no puede difundirse a través de la membrana, pronto hay un exceso de carga positiva en el compartimiento 2 y un exceso de carga negativa en el compartimiento 1 (Fig. 18.19b). Estas cargas en exceso se concentran a lo largo de la membrana, mientras que la masa de fluido en cada compartimiento permanece neutra. Las capas de carga positiva y negativa a cada lado de la membrana producen una diferencia de potencial $V = V_1 - V_2$ a través de la membrana y un campo eléctrico E , que retarda el flujo de iones positivos del compartimiento 1 al compartimiento 2, y acelera su flujo del compartimiento 2 al 1.

Pronto se establece un equilibrio dinámico en el que se difunden tantos iones K^+ del 1 al 2 como del 2 al 1. Este equilibrio proviene del balance de dos tendencias opuestas, la diferencia de concentración que favorece la difusión del 1 al 2 y la diferencia de potencial que favorece la difusión del 2 al 1. La diferencia de potencial V en el equilibrio viene dada, en función de las concentraciones * c_1 y c_2 de los iones K^+ en los dos compartimientos, por la ecuación



a



b

FIGURA 18.19

(a) Dos soluciones de KCl separadas por una membrana permeable sólo a los iones K^+ .
(b) La difusión de los iones K^+ desde la solución más concentrada del compartimiento 1 a la menos concentrada del compartimiento 2 da como resultado un exceso de carga negativa en el 1 y un exceso de carga positiva en el 2.

$$V = V_1 - V_2 = \pm 2,3 \frac{kT}{e} \log \frac{c_1}{c_2} \quad 18.23$$

Este es el *potencial de equilibrio de Nernst*. Es negativo cuando la membrana es permeable a los iones positivos, y positivo cuando la membrana es permeable a los iones negativos. Aquí k es la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta. La magnitud kT es proporcional a la energía cinética media de los iones en solución (Apart. 8.4) y $kT \log (c_1/c_2)$ es proporcional al flujo neto de iones debido a la diferencia de concentración. La magnitud eV es proporcional al flujo neto de iones debido a la diferencia de potencial. La Ec. 18.23 es la condición para que estos dos flujos sean iguales y opuestos.

A la temperatura corporal de 37°C el valor de kT/e es

* La concentración se mide en moles por unidad de volumen. Es la densidad de partículas η (Apart. 8.1) dividida por el número de Avogadro.

$$\frac{kT}{e} = \frac{(1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(310 \text{ K})}{1,60 \times 10^{-19} \text{ C}} \\ = 0,0267 \text{ V} = 26,7 \text{ mV} \approx 27$$

de modo que el potencial de Nernst es

$$V = V_1 - V_2 = \pm(61,4 \text{ mV}) \log \frac{c_1}{c_2} \quad 18.24$$

El fluido intracelular de una célula nerviosa tiene una concentración de iones K^+ de 0,141 mol/l, mientras que el fluido extracelular tiene una concentración de K^+ de sólo 0,005 mol/l (tabla 18.1). Si estas concentraciones están en equilibrio, el potencial a través de la membrana será

$$V = -61,4 \text{ mV} \log \frac{0,141}{0,005} = -(61,4 \text{ mV}) (\log 28,2) \\ = -61,4 \text{ mV} \times 1,45 = -89,2 \text{ mV}$$

donde se ha utilizado la tabla II.1 para evaluar el $\log 28,2$.

A partir de medidas experimentales se obtiene que la diferencia de potencial es de -85 mV , de modo que las concentraciones de K^+ están casi en equilibrio. Sin embargo, como el interior de la célula es ligeramente menos negativo que lo que se necesita para contrarrestar la diferencia de concentración, hay una pequeña cantidad de iones K^+ que salen de la célula. Estos iones son bombeados de nuevo a la célula de un modo activo por medio de un proceso metabólico que tiene lugar en la pared de la célula y que todavía es desconocido. Utilizamos el término «bombeados» para hacer hincapié en que no es un proceso de difusión, sino un mecanismo activo que exige una energía metabólica. Por otro lado, la cantidad de iones K^+ que son transportados así es muy pequeña.

OBSERVACIÓN. Es muy importante darse cuenta de que solamente una pequeña fracción de iones K^+ de una célula toman parte en el establecimiento del potencial de Nernst. Una célula típica tiene un volumen de unos 10^{-9} cm^3 y una concentración de K^+ de unos 0,14 mol/l, o unos 10^{20} iones K^+ por centímetro cúbico. Así, pues, hay unos $(10^{20} \text{ iones/cm}^3)(10^{-9} \text{ cm}^3) = 10^{11}$ iones K^+ en una célula. Cuando los iones K^+ se difunden hacia el exterior de la célula, el exceso de carga dentro y fuera de la célula se acumula a lo largo de la pared celular (Fig. 18.20). La pared de la célula actúa como un condensador con un área A de unos $5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ y un espesor de unos 10^{-6} cm . Su capacidad C se calcula a partir de la Ec. 18.22 y tiene un valor de

$$C = \frac{\epsilon(5 \times 10^{-10} \text{ m}^2)}{(4\pi)(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(10^{-8} \text{ m})} = 13 \times 10^{-13} \text{ F}$$

en donde ϵ se ha supuesto que es 3. Con una diferencia de potencial de $0,085 \text{ V}$ a través de la pared de la célula, se halla la carga neta a ambos lados de la pared que, según la Ec. 18.20, es

$$q = CV = (13 \times 10^{-13} \text{ F})(0,085 \text{ V}) = 11 \times 10^{-14} \text{ C}$$

El número de iones K^+ necesarios para producir esta carga es

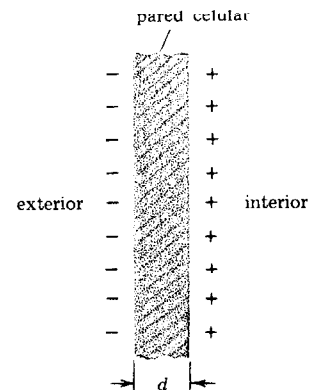


FIGURA 18.20
La pared celular actúa como un condensador con carga positiva en el interior y carga negativa en el exterior.

TABLA 18.1 Concentraciones de iones K^+ , Na^+ y Cl^- en el fluido intracelular y extracelular.

Todos los demás iones se representan por A^- .

Ion	Concentración, mol/l	
	Extracelular c_E	Intracelular c_I
K^+	0,005	0,141
Na^+	0,142	0,010
	0,147	0,151
Cl^-	0,103	0,004
A^-	0,044	0,147
	0,147	0,151

$$\frac{q}{e} = \frac{11 \times 10^{-14} \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6,9 \times 10^5$$

que es solamente de alrededor de una millonésima parte de los iones K^+ que hay dentro de la célula. Así, pues, aun cuando el potencial de Nernst exige que salgan de la célula algunos iones K^+ , la cantidad de iones que lo hacen es demasiado pequeña para afectar de manera significativa a la concentración de éstos a ambos lados de la pared celular.

Tanto en el fluido intracelular como en el extracelular se disuelven muchas clases de iones, pero solamente aquellos iones que pueden difundirse a través de la pared de la célula contribuyen al potencial de Nernst. En el estado de reposo, la pared celular es permeable sólo a los iones K^+ y Cl^- . Los iones Cl^- se distribuyen entre los compartimientos intracelular y extracelular, de acuerdo con la Ec. 18.24. O sea, que la razón c_I/c_E de las concentraciones intracelular y extracelular de Cl^- viene dada en función del potencial celular $V = V_I - V_E$ por

$$\log \frac{c_I}{c_E} = \frac{+V}{61,4 \text{ mV}}$$

en donde se ha utilizado el signo más porque los iones están cargados negativamente. Como el potencial es -85 mV , esto da

$$\log \frac{c_I}{c_E} = -1,38 = -2 + 0,62$$

o lo que es lo mismo
$$\frac{c_I}{c_E} = (10^{-2})(4,2) = 0,042$$

donde se ha utilizado la tabla II.2 para hallar el antilogaritmo de 0,62.

Las mediciones muestran que la concentración extracelular de Cl^- es $c_E = 0,103 \text{ mol/l}$, y que la concentración intracelular c_I es

$$c_I = (0,042)(0,103 \text{ mol/l}) = 0,0043 \text{ mol/l}$$

El potencial negativo del interior de la célula favorece una alta concentración intracelular de K^+ y una baja concentración intracelular de Cl^- . La completa neutralidad del fluido en los dos compartimientos se logra por la presencia de iones a los que la pared de la célula es impermeable. Los más importantes de éstos son los iones de sodio, Na^+ , y varios iones orgánicos negativos, A^- . La tabla 18.1 da las concentraciones de estos iones en los fluidos intracelular y extracelular, mostrando así que la carga total en ambos compartimientos es cero. (Como se hizo notar en la observación anterior, el exceso de carga en cada compartimiento se concentra a lo largo de la pared de la célula y el número de iones que toman parte es demasiado pequeño para afectar al valor de las concentraciones de un modo significativo.)

El potencial de Nernst se determina tanto por la diferencia en la concentración de los iones en los fluidos intracelular y extracelular como por la permeabilidad selectiva de la pared celular a los iones de diferentes clases. Por ejemplo, la diferencia en la concentración de iones Na^+ en los dos compartimientos tendría un potencial de Nernst de

$$V = -(61,4 \text{ mV}) \log \frac{0,010}{0,142} \\ = +70,6 \text{ mV}$$

si la pared celular fuera permeable a los iones Na^+ . Este potencial anularía e incluso invertiría los potenciales de K^+ y Cl^- . La situación es análoga a la del circuito eléctrico mostrado en la Fig. 18.21. Las baterías \mathcal{E}_K , \mathcal{E}_{Cl} , y \mathcal{E}_{Na} representan los potenciales de Nernst que resultan de las diferencias de concentración de los iones K^+ , Cl^- y Na^+ , respectivamente. Estas baterías están conectadas en paralelo a conductores que representan el interior y el exterior de la célula. En estado de reposo, el circuito que contiene la batería Na^+ está abierto y solamente las baterías K^+ y Cl^- contribuyen a la diferencia de potencial. (Hay

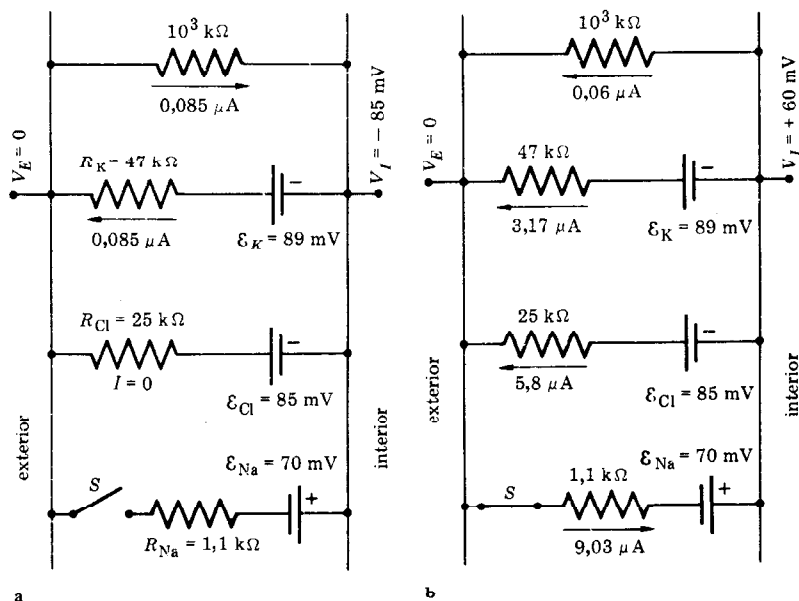


FIGURA 18.21

Circuito analógico de los potenciales de Nernst en una célula.

(a) En estado de reposo la pared de la célula es impermeable a los iones Na^+ , lo cual corresponde a tener abierto el interruptor S . Las baterías Cl^- y K^+ mantienen una diferencia de potencial de -85 mV entre el interior y el exterior de la célula. (b) Durante un potencial de acción, la pared de la célula se hace de repente permeable a los Na^+ , lo cual corresponde al cierre del interruptor S . Entonces la batería Na^+ hace que el interior de la célula esté a $+60 \text{ mV}$ con respecto al exterior.

una pequeña corriente I a través de la resistencia R_K porque el potencial total entre los conductores es $85 \text{ mV} = \mathcal{E}_K - R_K I$.)

La pared de las células nerviosas y musculares tiene la capacidad de cambiar su permeabilidad relativa a los iones K^+ y Na^+ . Cuando una célula nerviosa es estimulada eléctrica, química o mecánicamente, la pared de la célula se hace permeable de repente a los Na^+ . Esto es análogo a cerrar el interruptor S del circuito de la Fig. 18.21. Los iones Na^+ fluyen ahora a través de la pared celular hasta el interior de la célula, neutralizando la carga negativa que hay dentro de la misma. Para un período de unos $0,2 \text{ ms}$ la pared de la célula es unas 100 veces más permeable a los iones Na^+ que a los K^+ . (En la Fig. 18.21 se ha representado esto haciendo R_{Na} menor que R_K y R_{Cl} .) Durante este período domina la batería Na^+ y el potencial interior cambia de -85 a $+60 \text{ mV}$. (Las resistencias de la Fig. 18.21 se eligen de manera que el potencial en los extremos de los conductores varíe de -85 a $+60 \text{ mV}$ cuando se cierra el interruptor.) Después de este período, la pared de la célula se hace otra vez impermeable a los iones Na^+ , de modo que, de nuevo, domina la batería K^+ . Los iones K^+ salen de la célula hasta que se reestablece el potencial de equilibrio de -85 mV . Estos cambios en el potencial celular aparecen en la Fig. 18.22. La repentina subida y bajada del potencial celular recibe el nombre de *potencial de acción*.

Durante el siguiente período de reposo, el exceso de iones Na^+ , que había entrado en la célula durante el potencial de acción, es bombeado activamente fuera de la célula. El mecanismo del bombeo de Na^+ es desconocido, pero se cree que es semejante al bombeo de K^+ . Hay que hacer hincapié otra vez, en que el número total de iones que se desplazan a través de la pared celular durante estos cambios de potencial, es muy pequeño comparado con el número de iones que hay en la célula. Por lo tanto, un solo potencial de acción no produce un cambio

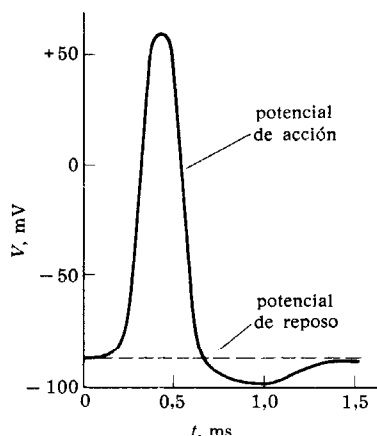


FIGURA 18.22
Variación temporal del potencial de acción.

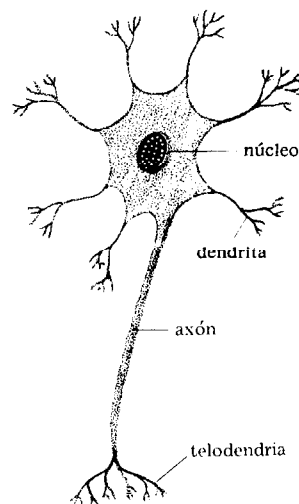


FIGURA 18.23
Célula nerviosa.

importante en la concentración de iones de la célula. La célula se puede excitar muchos miles de veces antes de que la concentración de Na^+ se vea afectada de modo apreciable. El bombeo de Na^+ es así un mecanismo para mantener a la larga la adecuada concentración de Na^+ , y no es significativo para una sola puesta en marcha del potencial de acción.

Impulsos nerviosos

Una célula nerviosa, Fig. 18.23, consta de un cuerpo celular y una larga prolongación llamada *axón*. El fluido de un axón tiene una composición parecida al fluido del cuerpo celular y, en el estado de reposo, el interior del axón tiene un potencial de -85 mV con respecto al fluido extracelular. Los axones actúan como cables que transmiten impulsos nerviosos desde una célula nerviosa a otra célula nerviosa o muscular. Un impulso nervioso es un potencial de acción que se propaga a lo largo del axón.

La Fig. 18.24a muestra la sección de un axón en estado de reposo. Cuando el axón es estimulado en un punto *A*, sólo se hace permeable a los iones Na^+ la región de la pared de la célula que se halla alrededor de *A*. En esta región se establece un potencial de acción, el cual momentáneamente hace que el exterior de la célula llegue a ser negativo y el interior, positivo (Fig. 18.24b). En la parte exterior del axón es atraída carga positiva a esta región negativa, con lo que las regiones adyacentes se hacen menos positivas. De igual modo, en el interior, la carga negativa es atraída hacia la región positiva y las regiones adyacentes se hacen menos negativas. Esto produce un pequeño cambio en el potencial de la pared celular en estas regiones adyacentes, lo que a su vez hace que la pared celular en estas regiones se convierta de repente en permeable a los iones Na^+ , disparando así un potencial de acción. Los iones Na^+ entran en la célula, invirtiendo el potencial en estas regiones (Fig. 18.24c). La carga de las áreas más alejadas del axón es atraída a estas regiones, estimulando los potenciales de acción en estas áreas. De este modo, un pulso de potencial, con la forma del potencial de acción, se propaga a lo largo del axón en ambas direcciones. Poco después de que el pulso se haya alejado de *A*, el potencial en *A* vuelve a tener su valor de reposo y está preparado para dispararse otra vez.

Un impulso nervioso se mueve a lo largo de un axón a una velocidad de 30 m/s , que es pequeña comparada con la velocidad de los impulsos eléctricos en los circuitos electrónicos. La velocidad de un impulso nervioso se determina por el tiempo que necesitan los iones para fluir en ambos sentidos a través de la pared de la célula. Un impulso nervioso se parece a una onda sobre una cuerda en la que el flujo de carga es, en su mayor parte, perpendicular a la dirección de propagación del pulso.

El mecanismo básico por el que la pared de la célula cambia su permeabilidad a los iones Na^+ no se entiende todavía. La pared celular es una estructura funcionalmente compleja que controla el paso de moléculas entre los compartimientos intracelular y extracelular. Normalmente es lo que los biólogos y biofísicos del mundo entero investigan intensamente, y podemos esperar que se avanzará muchísimo

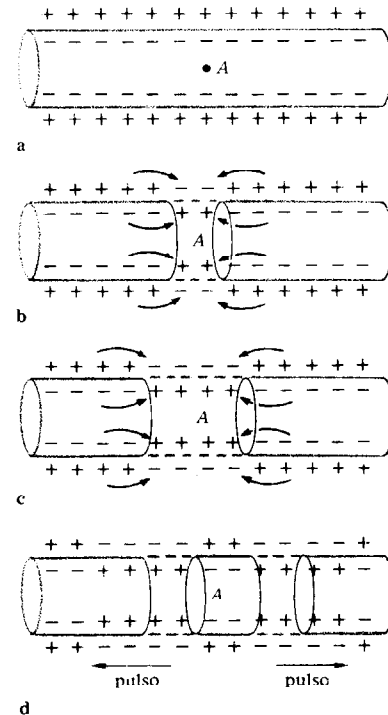


FIGURA 18.24
Transmisión de un impulso nervioso a lo largo de un axón. (a) Estado de reposo. (b) El estímulo en el punto *A* produce un potencial de acción local en ese punto, por lo que el interior de la célula se hace positivo. (c) Al fluir la carga hacia *A* desde las regiones contiguas, se estimulan potenciales de acción en regiones más alejadas del axón. (d) El axón vuelve a su estado de reposo en *A*, mientras que el pulso continúa su propagación a lo largo del axón.

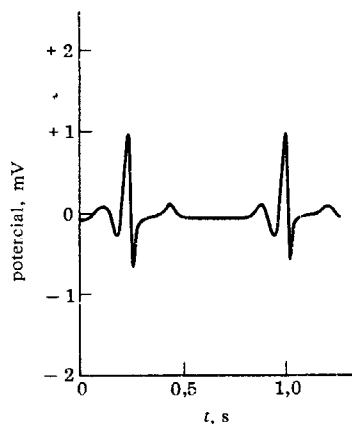


FIGURA 18.25
Un electrocardiograma normal.

en la comprensión de esta estructura fundamental en un futuro próximo.

Cuando un impulso nervioso alcanza una célula muscular, produce un potencial de acción en la célula muscular. Este potencial se propaga a lo largo de la fibra muscular, del mismo modo que se propaga a lo largo de un axón. Lo que inicia la contracción de la fibra es el movimiento de este impulso a lo largo de la misma. Antes de cada latido del corazón se extiende por éste un gran potencial de acción. Este potencial produce corrientes en el tejido contiguo y algunas de ellas llegan a la piel, donde pueden ser detectadas por medio de electrodos colocados en el pecho. Las señales de los electrodos son amplificadas y registradas sobre un gráfico móvil. El registro resultante, que se llama *electrocardiograma* (ECG), tiene gran valor en el diagnóstico de enfermedades del corazón. La Fig. 18.25 muestra un electrocardiograma normal de dos latidos del corazón.

Pez eléctrico

Algunos peces han desarrollado células musculares modificadas que las utilizan principalmente para producir un potencial de acción. Estas células no son fibras largas y delgadas como la célula muscular normal, sino placas cortas y lisas, llamadas *electroplacas*. Están dispuestas unas encima de otras como las baterías de un flash. Al ser estimuladas por impulsos nerviosos, se inicia simultáneamente en un lado de cada célula un potencial de acción. Mientras que cada célula produce un potencial de acción de 0,1 V solamente, un bloque de cientos y miles de estas células produce un pulso de potencial momentáneo de muchos volts. La anguila eléctrica (*Electrophorus*) produce un potencial momentáneo de 300 V, que es suficiente para aturdir a su presa o a sus posibles enemigos.

Más interesantes son los peces de poco potencial eléctrico los cuales mantienen unas ininterrumpidas diferencias de potencial de unos pocos voltios entre la cabeza y la cola. Esta diferencia de potencial es producida en forma de pulsos, a una velocidad de varios cientos de pulsos por segundo. Como consecuencia, se establece alrededor del pez un campo eléctrico pulsante y la carga eléctrica circula a lo largo de las líneas de fuerza de este campo (Fig. 18.26). Cuando el pez se desliza de un lado a otro, la corriente y el campo eléctrico se modifican por la presencia en el agua de objetos con diferente resistencia eléctrica. La Fig. 18.26 muestra el campo eléctrico que se forma alrededor de un pez cuchillo. Cuando en el punto B hay un objeto con una resistencia menor que la del agua que le rodea, la corriente local es mayor que la normal en este punto. Análogamente, cuando en el punto A, cercano al pez, hay un objeto con una resistencia mayor que la del agua que le rodea, la corriente local es entonces menor que la normal en este punto. El pez eléctrico tiene células sensoriales en la piel y con ellas puede detectar estas corrientes. Además, estos peces pueden determinar el tamaño y la posición de objetos próximos por el efecto que estos objetos tienen sobre la corriente. Se ha visto por medio de experimentos que el pez del Nilo (*Gymnarchus*) puede detectar la presencia de una delgada varilla de vidrio oculta dentro de una vasija porosa, gracias al efecto de la resistencia eléctrica de la varilla sobre la corriente que hay alrededor.

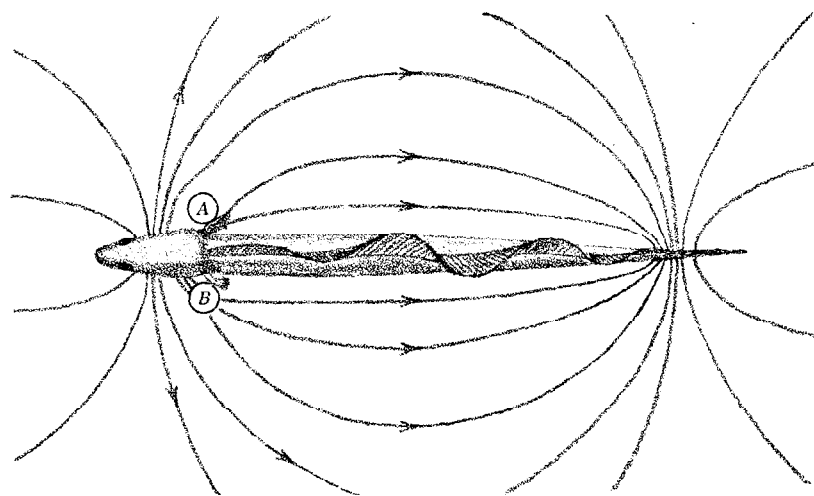


FIGURA 18.26
Líneas de fuerza alrededor de un
pez eléctrico.

Las células eléctricamente sensibles puede que se hayan desarrollado primeramente en algunos peces para detectar los potenciales de acción normales en otros peces. Por ejemplo, los tiburones y las rayas pueden detectar una acedía a una distancia de 5 a 10 cm por el potencial de acción de los músculos respiratorios de este pez. Pero dos órdenes de peces (Mormiriformes y Gimnotoideos) se caracterizan por las adaptaciones que les permiten producir y controlar grandes potenciales de acción; esto les permite detectar objetos animados e inanimados en las oscuras y lóbregas aguas donde viven. Además, algunos de estos peces parece ser que utilizan sus campos eléctricos para indicar entre ellos sus intenciones agresivas y de apareamiento.

En los últimos 30 años es cuando se ha sabido del sentido eléctrico de los peces. Hemos visto que otros animales pueden detectar propiedades físicas que no puede detectar el hombre. Los murciélagos, por ejemplo, detectan sonidos ultrasónicos y las abejas detectan la luz polarizada. En el largo proceso de la evolución, puede que algunos animales hayan adoptado otras propiedades físicas como un sentido especializado.* Se puede esperar con bastante fundamento que todavía se harán nuevos e interesantes descubrimientos en el campo de los sentidos de los animales.

* Ver el Apart. 19.5 para una discusión de la posibilidad de que exista un sentido magnético en los pájaros y en las bacterias.

PROBLEMAS

- Por un alambre pasa una carga de 75 C en 120 s. (a) ¿Cuál es la intensidad de la corriente en el alambre durante este tiempo? (b) ¿Cuántos electrones pasan por el alambre durante este tiempo?
Resp. (a) 0,625 A; (b) $4,69 \times 10^{20}$.
- (a) ¿Cuánta carga pasa en 30 s por un alambre en el que hay una corriente de 4,5 A? (b) ¿Cuántos electrones pasan por el alambre en este tiempo?
- El faraday (F) es la carga de 1 mol de protones. (a) ¿Cuál es el valor del faraday en coulombs? (b) ¿Cuánto le costaría a 1 F de carga pasar por un alambre en el que la corriente es de 15 A?
Resp. (a) $9,6 \times 10^4$ C; (b) 106,7 min.
- Una batería puede producir un total de 0,40 F (ver problema 3). (a) ¿Durante cuánto tiempo puede una batería mantener una corriente de 0,7 A en un circuito? (b) Si la fem de la batería es 1,5 V, ¿cuál es la energía eléctrica total que puede producir la batería?
- Una batería mantiene una corriente de 0,3 A con una fem de 1,5 V. (a) ¿Cuál es la potencia disponible de la batería? (b) ¿Cuánta energía consume la batería en 5 min?
Resp. (a) 0,45 W; (b) 135 J.
- Una batería con una fem de 3,0 V envía energía a un circuito exterior a razón de 0,80 W. (a) ¿Cuál es la corriente en el circuito? (b) Si la batería puede producir un total de energía eléctrica de $3,5 \times 10^4$ J, ¿por cuánto tiempo puede mantener la batería esta corriente?
- Supongamos que la batería de la Fig. 18.4 tiene una fem de 5,0 V y que la resistencia es de 10 Ω . ¿Cuál es (a) la corriente en el circuito y (b) la potencia disipada en la resistencia?
Resp. (a) 0,5 A; (b) 2,5 W.
- Supongamos que la corriente en la Fig. 18.4 es 0,3 A y que la resistencia es 20 Ω . ¿Cuál es (a) la fem de la batería y (b) la potencia disipada en la resistencia?
- Supongamos que la fem de la batería de la Fig. 18.4 es 4,5 V y que la corriente en el circuito es de 0,2 A. ¿Cuál es (a) la resistencia en el circuito y (b) la potencia disipada en el mismo?
Resp. (a) 22,5 Ω ; (b) 0,9 W.

- Supongamos que la corriente en la Fig. 18.4 es 0,4 A y que la potencia disipada en la resistencia es 1,2 W. ¿Cuál es (a) la fem de la batería y (b) la resistencia del circuito?
- Supongamos que la fem de la batería de la Fig. 18.4 es 3,0 V y la potencia disipada en la resistencia es 2,0 W. ¿Cuál es (a) la intensidad de la corriente en el circuito y (b) la resistencia?
Resp. (a) 0,67 A; (b) 4,5 Ω .
- Supongamos que la resistencia en la figura 18.4 es 27 Ω y que la potencia disipada en ella es 3,0 W. ¿Cuál es (a) la fem de la batería y (b) la intensidad de la corriente en el circuito?
- Normalmente una batería tiene una pequeña resistencia interna propia. Esto se indica en la Fig. 18.27 por medio de la resistencia r . Si la fem de la batería es 3,0 V, $r = 0,5 \Omega$ y $R = 5 \Omega$, ¿cuál es la diferencia de potencial entre los bornes a y b de la batería?
Resp. 2,73 V.

OBSERVACION. Debido a la resistencia interna de una batería, el potencial entre sus bornes puede ser menor que la fem de la batería.

- El circuito de la Fig. 18.27 tiene una corriente de 0,5 A cuando R es 10 Ω y una corriente de 0,27 A cuando R es 20 Ω . ¿Cuál es (a) la resistencia interna y (b) la fem \mathcal{E} de la batería?

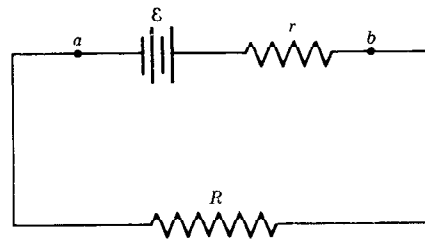


FIGURA 18.27. Problemas 13 y 14.

- Supongamos que la fem de la batería de la Fig. 18.6 es 7,5 V y que las resistencias son $R_1 = 8 \Omega$ y $R_2 = 12 \Omega$. ¿Cuál es (a) la

intensidad de la corriente en el circuito y (b) la potencia disipada en cada resistencia?

Resp. (a) 0,375 A; (b) 1,125 y 1,69 W.

16. Supongamos que la fem de la batería de la Fig. 18.6 es 9,0 V y la resistencia R_1 es 100 Ω . ¿Cuál debe ser la resistencia R_2 para que la corriente sea de 20 mA?

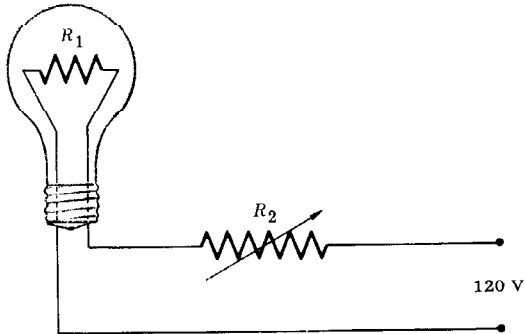


FIGURA 18.28. Problema 17.

17. La Fig. 18.28 muestra una diferencia de potencial de 120 V entre los extremos de un circuito formado por una lámpara de resistencia $R_1 = 144 \Omega$ conectada en serie a una resistencia variable R_2 . El brillo de la lámpara se controla variando el valor de R_2 . ¿Cuál es la potencia disipada en la lámpara (a) cuando R_2 es cero y (b) cuando $R_2 = 144 \Omega$? (c) ¿Cuál debe ser R_2 para que la potencia disipada en la lámpara sea de 50 W?

Resp. (a) 100 W; (b) 25 W; (c) 59,7 Ω .

18. Una bombilla de tres posiciones tiene dos filamentos que se hallan conectados a tres alambres, tal como aparece en la Fig. 18.29. Dando vueltas al interruptor del portalámparas se conectan 120 V a ab , bc o ac . (a) Si $R_1 = 144 \Omega$ y $R_2 = 216 \Omega$, ¿cuáles son las tres posibles potencias disipadas de la bombilla? (b) Otra bombilla de tres posiciones puede funcionar a 300, 100 y 75 W. ¿Cuáles son las resistencias de sus dos filamentos?

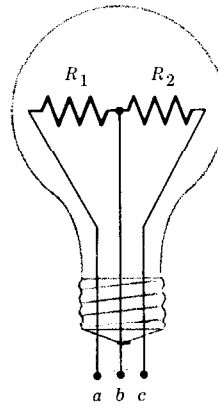


FIGURA 18.29. Problema 18.

19. Supongamos que la fem de la batería de la Fig. 18.29 es 7,5 V y que las resistencias son $R_1 = 8 \Omega$ y $R_2 = 12 \Omega$. ¿Cuáles son las intensidades I , I_1 y I_2 ?

Resp. 1,56, 0,94 y 0,62 A.

20. Supongamos que la fem de la batería que aparece en la Fig. 18.7 es 9,0 V y que la resistencia R_1 es 100 Ω . ¿Cuál debe ser la resistencia R_2 para que la corriente I sea 150 mA?

21. Se colocan seis bombillas de un árbol de Navidad en un circuito en paralelo, tal como aparece en la Fig. 18.30. Cada bombilla consume 10 W cuando funciona a 120 V. (a) ¿Cuál es la resistencia R de cada

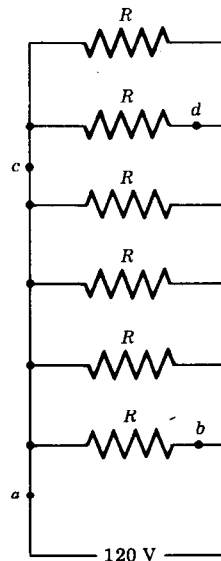


FIGURA 18.30. Problema 21.

bombilla? (b) ¿Cuál es la resistencia de todo el conjunto de bombillas? (c) ¿Cuál es el consumo total de potencia del conjunto? (d) ¿Cuáles son las intensidades de la corriente en los puntos a , b , c , y d ?

Resp. (a) 1440Ω ; (b) 240Ω ; (c) 60 W ; (d) $0,50$, $0,083$, $0,167$ y $0,083 \text{ A}$.

22. Se colocan seis bombillas en un circuito en serie, tal como se ve en la Fig. 18.31. (Así se colocaban antiguamente las bombillas

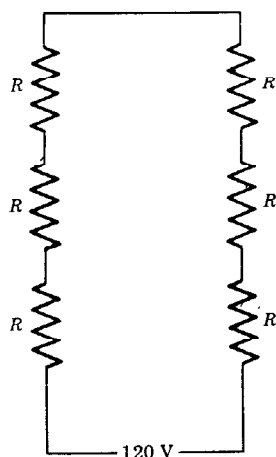
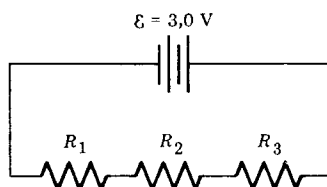


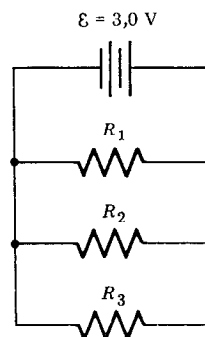
FIGURA 18.31. Problema 22.

en los árboles de Navidad.) Cada bombilla tiene la misma resistencia R y el conjunto está pensado para que consuma 60 W cuando funciona a 120 V . (a) ¿Cuál es la resistencia de cada bombilla? (b) ¿Cuál es la intensidad de la corriente en el circuito cuando funciona a 120 V ? (c) ¿Cuál sería la potencia consumida por una sola bombilla que funcionase a 120 V ? (d) Comparar este circuito con el del problema 21 y comentar las desventajas de la colocación de las bombillas de un árbol de Navidad en serie.

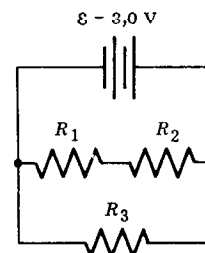
23. En la Fig. 18.32 vemos las tres resistencias $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$ y $R_3 = 25 \Omega$ en cuatro circuitos diferentes. Hallar para cada circuito las intensidades I_1 , I_2 e I_3 en cada resistencia, y la intensidad I en la batería. Resp. (a) $I_1 = I_2 = I_3 = I = 0,067 \text{ (A)}$; (b) $0,6$, $0,2$, $0,12$ y $0,92 \text{ A}$; (c) $0,15$, $0,15$, $0,12$, y $0,27 \text{ A}$; (d) $0,209$, $0,130$, $0,079$, y $0,209 \text{ A}$.
24. Hallar la potencia disipada en cada resistencia para cada circuito de la Fig. 18.32 y



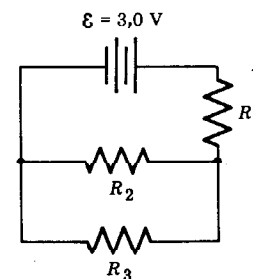
a



b



c



d

FIGURA 18.32. Problemas 23 y 24.

la potencia total disponible de la batería (ver Prob. 23).

25. Hallar todas las resistencias que se pueden hacer con tres resistencias de 10Ω en varias combinaciones. No todas las combinaciones necesitan utilizar las tres resistencias.

Resp. $3,33$, 5 , $6,66$, 10 , 15 , 20 , y 30Ω .

26. Colocar una resistencia de $5\ \Omega$, otra de $10\ \Omega$ y otra de $20\ \Omega$ en una combinación que tenga una resistencia total de $14\ \Omega$.
27. Hallar todas las resistencias que se pueden hacer con una resistencia de $6\ \Omega$, otra de $9\ \Omega$, y otra de $15\ \Omega$ en varias combinaciones. No todas las combinaciones tienen que utilizar las tres resistencias.
Resp. 2,90, 3,6, 4,28, 4,8, 5,625, 6, 6,3, 7,5, 9, 11,625, 13,28, 15, 18,6, 21, 24, y $33\ \Omega$.
28. Colocar una resistencia de $8\ \Omega$, otra de $12\ \Omega$, y otra de $16\ \Omega$ en una combinación que tenga una resistencia total de $8,89\ \Omega$.
29. Se aplica un potencial alterno con un potencial máximo de $75\ \text{V}$ en los extremos de una resistencia de $15\ \Omega$. ¿Cuál es (a) la intensidad eficaz y (b) la potencia media disipada en la resistencia?
Resp. (a) $3,53\ \text{A}$; (b) $187,5\ \text{W}$.
30. Por una resistencia de $25\ \Omega$ pasa una corriente alterna con una intensidad eficaz de $2,4\ \text{A}$. ¿Cuál es (a) el potencial máximo aplicado a la resistencia y (b) la potencia media disipada en ella?
31. (a) ¿Cuánto vale la resistencia de una bombilla que disipa $60\ \text{W}$ con un potencial eficaz de $120\ \text{V}$? (b) ¿Cuánto valen las intensidades eficaz y máxima en la resistencia?
Resp. (a) $240\ \Omega$; (b) $0,5\ \text{A}$, $0,707\ \text{A}$.
32. Una intensidad eficaz de $100\ \text{mA}$ mantenida durante $1\ \text{s}$ en el cuerpo de una persona puede resultar letal. Suponiendo que la resistencia global del cuerpo es de $1000\ \Omega$, ¿qué energía se necesita para matar a una persona por electrocución? Comparar este valor con el de la energía necesaria para matar a una persona con una bala (ver Prob. 15 del Cap. 5).
33. ¿Cuál es el valor de la carga máxima sobre una placa de un condensador de $0,25\ \mu\text{F}$ conectado a una batería de $3,0\ \text{V}$?
Resp. $7,5 \times 10^{-7}\ \text{C}$.
34. Un condensador de $200\ \mu\text{F}$ tiene una carga de $0,015\ \text{C}$ en cada placa. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las placas?
35. Un condensador de $50\ \mu\text{F}$ que está inicialmente descargado es conectado, por medio de una resistencia de $300\ \Omega$ a una batería de $12\ \text{V}$. (a) ¿Cuál es el valor de la carga final q_0 sobre el condensador? (b) Desde que se conecta el condensador a la batería ¿en cuánto tiempo estará cargado a $1/2\ q_0$? (c) ¿Cuánto tiempo le costará al condensador cargarse hasta $0,90\ q_0$?
Resp. (a) $6 \times 10^{-4}\ \text{C}$; (b) $10,5\ \text{ms}$; (c) $37,5\ \text{ms}$.
36. Un condensador de $400\ \mu\text{F}$ se conecta a una batería por medio de una resistencia. Hallar (a) la resistencia R y (b) la fem de la batería \mathcal{E} si el tiempo característico del circuito es $0,5\ \text{s}$ y la carga máxima del condensador es $0,024\ \text{C}$.
37. Un condensador de $150\ \text{pF}$ consiste en placas de $7\ \text{cm}^2$ de superficie separadas por una lámina de plástico de $0,2\ \text{mm}$ de espesor. ¿Cuál es la constante dieléctrica del plástico?
Resp. 4,8.
- *38. (a) Demostrar que cuando se conectan en paralelo dos condensadores de capacidades C_1 y C_2 , la capacidad efectiva C del conjunto es $C = C_1 + C_2$. (b) Demostrar que cuando dichos condensadores se conectan en serie, la capacidad efectiva viene dada por
- $$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$
- (Sugerencia: Al conectarse en paralelo, cada condensador tiene el mismo potencial, mientras que al conectarse en serie cada condensador tiene la misma carga.)
39. Si la membrana de las células fuera permeable a los iones orgánicos electronegativos A^- de los fluidos celulares (tabla 18.1) ¿cuál sería el potencial de Nernst debido a estos iones?
Resp. $+32,1\ \text{mV}$.
40. Supongamos que la concentración intracelular de Cl^- fuese $0,025\ \text{mol/l}$. ¿Cuál sería la concentración extracelular si el potencial de Nernst debido al Cl^- fuera $-72\ \text{mV}$?

BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER, R. M.: «Functional Design in Fishes», Hutchinson University Library, Londres, 1967. En el capítulo 6 se hace una descripción detallada del sentido eléctrico del pez.
- BULLOCK, Theodore Holmes: Seeing the World through a New Sense: Electrorception in Fish, *American Scientist*, **61**: 316 (1973). Es