Física IV

Antología

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PREPARATORIA 16

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FÍSICA IV

PREPARATORIA Nº 16

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

RECTOR/Ing. Gregorio Farías Longoria.

SECRETARIO GENERAL/Ing. Lorenzo Vela Peña.

ESCUELA PREPARATORIA NÚM. 16

DIRECTOR/Sergio Antonio Escamilla Tristán

Primera edición, Febrero, 1990.

Edición no comercial.

* FISICA IV *

OBJETIVO GENERAL: Al terminar el curso, el alumno será capaz de aplicar los conceptos de Calorimetría, de Electrostática y de Electrodinámica.

UNIDAD I Tiempo: 21 frecuencias

OBJETIVOS PARTICULARES:

CALORIMETRIA

Al término de la unidad, el alumno:

- Resolverá problemas donde se calcule la cantidad de calor necesaria en los cambios de fase y en los cambios de temperatura.
- Conocerá las formas de transferencia de calor y resolverá problemas de conducción de calor.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

El alumno:

1.1 Enunciará la ley "cero" de la termodinámica.
1.2 Definirá el concepto de temperatura.
1.3 Identificará las diferentes escalas de temperatura.
1.4 Resolverá conversiones de una escala de temperatura a otra.
1.5 Explicará las propiedades termométricas de la materia.
1.6 Definirá el concepto de calor y las unidades en que se mide.
1.7 Diferenciará entre temperatura y calor.
1.8 Explicará los métodos principales de transferencia de calor.
1.9 Resolverá problemas de conducción de calor.
1.10 Definirá los conceptos siguientes:
   - capacidad térmica.
   - calor específico.
   - punto de fusión.
   - calor latente de fusión.
   - punto de ebullición.
   - calor latente de vaporización.
1.11 Calculará la cantidad de calor necesaria para que un cuerpo cambie su temperatura sin cambiar de estado.
1.12 Calculará la cantidad de calor necesaria para que un cuerpo sufra un cambio en su temperatura, pasando por uno o dos cambios de estado.
1.13 Enunciará la primera ley de la termodinámica.
1.14 Ejemplificará la primera ley de la termodinámica (el equivalente mecánico del calor).

1.15 Enunciará la segunda ley de la termodinámica, según Kelvin.
1.16 Ejemplificará la segunda ley de la termodinámica (máquinas térmicas).

EXAMEN PARCIAL

UNIDAD 2 Tiempo: 10 frecuencias

OBJETIVO PARTICULAR:

ELECTROSTATICA

Al término de la unidad, el alumno:

- Aplicará los principios básicos de electrostática, en la solución de problemas afines.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

El alumno:

2.1 Definirá electrostática.
2.2 Describirá las partes del átomo que tienen carga positiva y carga negativa.
2.3 Explicará las principales formas de electrificar los cuerpos.
2.4 Explicará la ley de la conservación de la carga.
2.5 Enunciará las conclusiones que se obtienen cuando interaccionan dos cargas eléctricas.
2.6 Diferenciará los conductores y aisladores eléctricos, en base a su estructura atómica.
2.7 Indicará la unidad de medida de carga en el sistema M.K.S.
2.8 Expresará la ley de Coulumb y su expresión matemática.
2.9 Utilizará la ley de Coulumb en la solución de problemas (dos cargas).

UNIDAD 3

OBJETIVO PARTICULAR:

ELECTRODINAMICA

Al término de la unidad, el alumno:

- Aplicará los principios básicos de la electrodinámica, en la solución de problemas afines.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

El alumno:

3.1 Definirá electrodinámica.
3.2 Definirá los conceptos siguientes:
- corriente eléctrica.
- corriente directa.
- corriente alterna.
3.3 Definirá la unidad de medida de corriente eléctrica.
3.4 Mencionará las fuentes de la corriente directa y de la corriente alterna.
3.5 Definirá el concepto de resistencia eléctrica y su unidad de medida.
3.6 Mencionará los factores que determinan la resistencia eléctrica de los materiales, y su representación matemática.
3.7 Resolverá problemas utilizando la ecuación del objetivo anterior.
3.8 Enunciará la ley de Ohm y su expresión matemática.
3.9 Identificará la simbología en los circuitos eléctricos.
3.10 Resolverá problemas aplicando la ley de Ohm en circuitos simples.
3.11 Explicará el efecto térmico de la corriente eléctrica.
3.12 Explicará el uso del multímetro.
3.13 Simplificará circuitos de resistencias eléctricas en:
- serie.
- paralelo,
- mixtos.
3.14 Enunciará las leyes de Kirchhoff.
3.15 Resolverá problemas aplicando las leyes de Kirchhoff.

EXAMEN FINAL (GLOBAL)

Número de horas de teoría	42
Número de horas de laboratorio	14
Total	56

Temperatura y expansión

Hasta aquí se ha estudiado el comportamiento de sistemas en reposo y en movimiento. Las cantidades fundamentales de masa, longitud y tiempo se introdujeron para describir el estado de un sistema mecánico dado.

Considérese, por ejemplo, un bloque de 10 kg moviéndose con una velocidad constante de 20 m/s. Las cantidades de masa, longitud y tiempo están todas presentes y se determinó que ellas son suficientes para describir el movimiento. Puede hablarse del peso de un bloque, de su energía cinética o de su momento, pero una descripción completa de un sistema requiere algo más que un simple planteamiento de estas cantidades.

Se ha observado que el bloque de 10 kg encuentra fuerzas de rozamiento. A medida que el bloque se desliza hasta pararse, parece que su energía desaparece, pero se observa que él y la superficie sobre la que se desliza están ligeramente tibios. Si la energía se conserva, debe suponerse que la energía perdida reaparece en alguna forma todavía no descubierta. Cuando desaparece energía del movimiento visible de los objetos y no reaparece en forma de energía potencial visible, con frecuencia se observa una elevación en la temperatura. En este capítulo se introduce el concepto de temperatura como una cuarta cantidad fundamental.

TEMPERATURA Y ENERGÍA TÉRMICA

Hasta ahora sólo se han considerado las causas y los efectos del movimiento *externo*. Un cuerpo en reposo sobre una mesa tiene un equilibrio traslacional y rotacional relativo a sus alrededores. Empero, un estudio más cuidadoso del cuerpo revela que está internamente activo. En la figura 17-1 se muestra un modelo simple de un sólido, en donde las moléculas individuales están unidas por fuerzas elásticas análogas a los resortes de la figura. Las moléculas oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio con una frecuencia y amplitud determinada, así que tanto la energía potencial como la cinética están asociadas con el movimiento molecular. Ya que esta energía interna se relaciona con las partes frías o calientes de un cuerpo, con frecuencia se la denomina energía térmica.

> **La energía térmica** representa la energía interna total de un objeto, es decir, la suma de sus energías moleculares cinética y potencial.

Cuando dos objetos con diferente energía térmica se ponen en contacto se transfiere energía de uno a otro. Por ejemplo, supóngase que se vacía una cubeta de carbón de piedra caliente en un recipiente con agua, como se muestra en la figura 17-2. El carbón transferirá energía térmica al agua hasta que el sistema alcance una condición estable, llamada *equilibrio térmico*. Cuando se tocan el carbón y el agua producen la misma sensación de caliente o frío y no hay más transferencia de energía térmica.

Tales cambios en los estados de energía térmica considerados no pueden explicarse satisfactoriamente teniendo en cuenta sólo la mecánica clásica. Por tanto se deduce que todos los objetos tienen otra propiedad fundamental, la cual determina si ellos están en equilibrio térmico con otros objetos. A esta propiedad

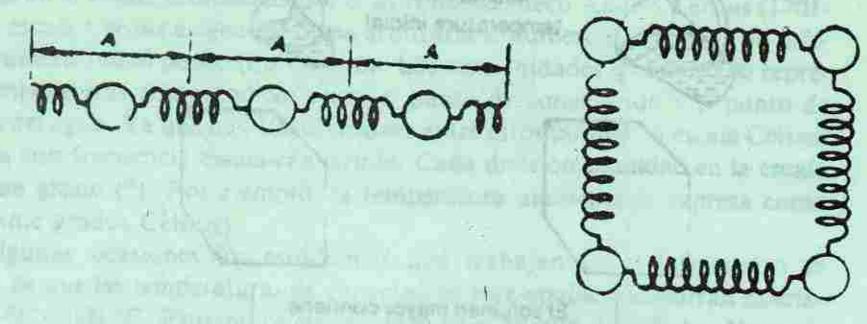


Fig. 17-1 Modelo simplificado de un sólido en el que las moléculas individuales están unidas mediante fuerzas elásticas.

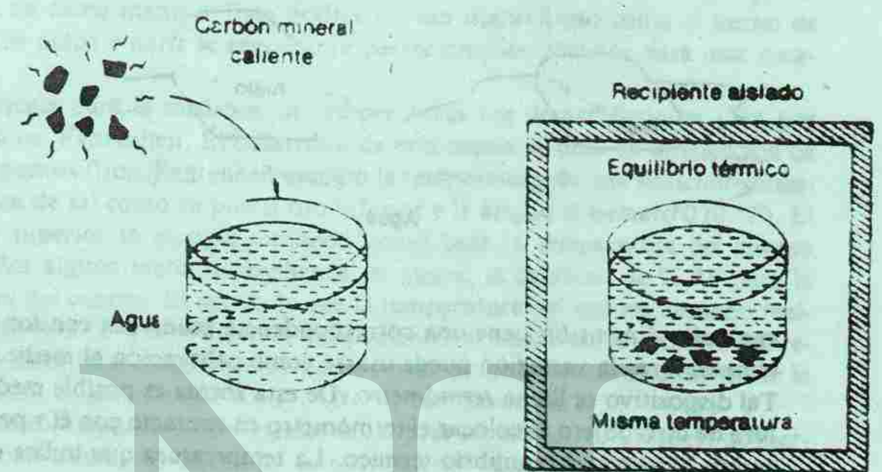


Fig. 17-2 Equilibrio térmico.

se la llama *temperatura*. En el ejemplo anterior, se dice que el carbón y el agua tienen la misma temperatura cuando la transferencia neta de energía térmica es cero.

> *Se dice que dos objetos están en* **equilibrio térmico** *si y sólo si tienen la misma temperatura.*

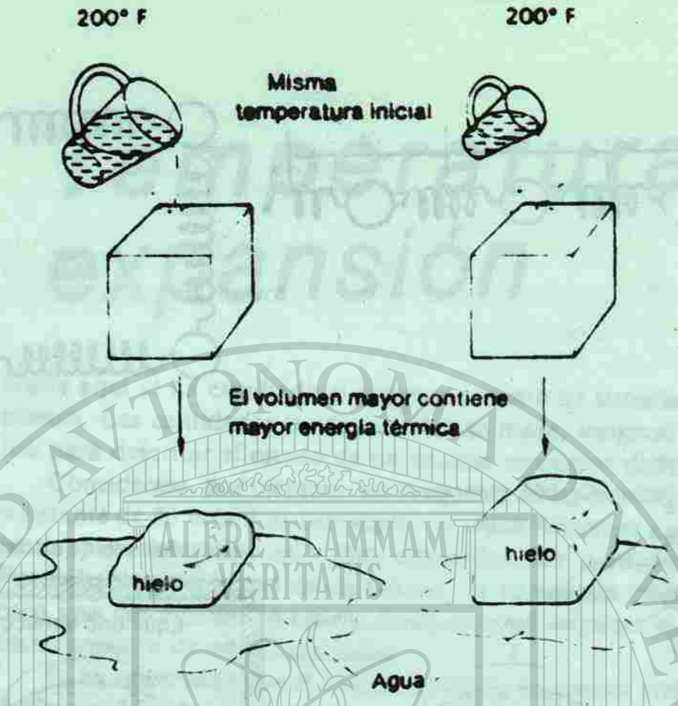
Una vez que se establece un medio para medir temperaturas, se tiene una condición necesaria y suficiente para el equilibrio térmico.

Antes de estudiar la medición de la temperatura, es necesario distinguir claramente entre los conceptos de temperatura y energía térmica. Es posible que dos objetos estén en equilibrio térmico (misma temperatura) con energías térmicas muy diferentes. Por ejemplo, considérese una jarra y una copa ambas llenas de agua, cada una con una temperatura de 200 °F. Si se mezclan, no habrá transferencia de energía, a pesar de que la energía térmica es mucho mayor en la jarra ya que contiene muchas más moléculas. Recuérdese que la energía térmica representa la *suma* de las energías cinética y potencial de todas las moléculas. Si se vacía el agua de cada uno de los recipientes sobre cubos de hielo por separado, como se muestra en la figura 17-3, en uno se fundirá mayor cantidad de hielo debido al mayor volumen de agua de la jarra, indicando que ésta tenía mayor energía térmica.

TERMOMETRÍA

La ciencia que estudia la medición de la temperatura se llama *termometría*. En general, la temperatura se determina al medir alguna cantidad mecánica, óptica o eléctrica que varía con la misma. Por ejemplo, la mayor parte de las sustancias se dilatan cuando la temperatura aumenta. Si puede demostrarse que un cambio de

Fig. 17-3 Distinción entre energía térmica y temperatura.



cualquier dimensión tiene una correspondencia biunívoca con los cambios en la temperatura, la variación puede usarse como calibración al medir temperaturas. Tal dispositivo se llama *termómetro*. De esta forma es posible medir la temperatura de otro objeto al colocar el termómetro en contacto con él y permitiendo que ambos alcancen el equilibrio térmico. La temperatura que indica el termómetro mediante una escala graduada corresponde también a la temperatura de los objetos circundantes.

> Un **termómetro** es un dispositivo que, por medio de una escala marcada, puede dar una indicación de su propia temperatura.

Son necesarias dos cosas en la construcción de un termómetro. Primero, se debe tener una confirmación de que alguna propiedad termométrica X varía con la temperatura T. Si las variaciones son lineales, puede escribirse

$$T = kX$$

donde k es la constante de proporcionalidad. Debe seleccionarse la propiedad termométrica de modo que se mida fácilmente; por ejemplo, la dilatación de un líquido, la presión en un gas o la resistencia en un circuito eléctrico. Otras cantidades que varían con la temperatura son la energía de radiación, el color de la luz emitida, la presión del vapor y la susceptibilidad magnética. Empleando cada una de esas propiedades se han construido los termómetros. La selección se hace con base en el intervalo de temperatura, por lo cual el termómetro es lineal, y por la mecánica de su uso.

El segundo requisito para construir un termómetro es establecer una escala de temperaturas. En general, esto se logra al seleccionar los *puntos fijos* superior e inferior, que son temperaturas fácilmente obtenibles en una medición de laboratorio. Dos temperaturas convenientes fácilmente reproducibles son:

> **El punto fijo inferior** (punto de congelación) es la temperatura a la cual coexisten agua y hielo en equilibrio térmico bajo una presión de 1 atm.

> **El punto fijo superior** (punto de ebullición del agua) es la temperatura en la que coexisten agua y vapor en equilibrio térmico bajo una presión de 1 atm.

La medición de temperatura más ampliamente utilizada en trabajos científicos se basa en la escala establecida por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744). La escala *Celsius* asigna en forma arbitraria el número 0 al punto fijo inferior y el número 100 al punto fijo superior. Las cien unidades entre 0 y 100 representan temperaturas comprendidas entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua. Ya que hay 100 divisiones entre estos puntos, la escala Celsius es llamada con frecuencia escala *centígrada*. Cada división o unidad en la escala se llama un grado (°). Por ejemplo, la temperatura ambiente se expresa como 20 °C (veinte grados Celsius).

En algunas ocasiones los estudiantes que trabajan en el laboratorio se asombran de que las temperaturas de congelación y de ebullición ocurran exactamente a 0 °C y 100 °C. Esto indica cierto orden en el mundo de la física. Naturalmente, la respuesta es que ellos tienen esas temperaturas simplemente porque se definieron de dicha manera. Esto podría ser tan maravilloso como el hecho de que nuestros oídos y nariz se encuentran perfectamente situados para usar anteojos.

Otra escala para la medición de temperaturas fue desarrollada en 1714 por Gabriel Daniel Fahrenheit. El desarrollo de esta escala se basa en la selección de diferentes puntos fijos. Fahrenheit escogió la temperatura de una solución congelada de agua de sal como su punto fijo inferior y le asignó el número 0 (0 °F). El punto fijo superior lo escogió tomando como base la temperatura del cuerpo humano. Por alguna razón no explicada, él asignó la cantidad de 96 °F para la temperatura del cuerpo. El hecho de que la temperatura del cuerpo humano realmente sea de 98.6 °F indica un error experimental al establecer la escala. Si se relaciona la escala Fahrenheit con los puntos fijos aceptados universalmente de la escala Celsius, se observa que 0 °C y 100 °C corresponden a 32 °F y 212 °F.

Es posible comparar las dos escalas al calibrar termómetros comunes de mercurio de vidrio ordinario. Este tipo de termómetro hace uso del hecho de que el mercurio se dilata al incrementarse la temperatura. Consta de un tubo capilar de vidrio al vacío con un depósito de mercurio en el fondo y con el extremo superior cerrado. Ya que el mercurio se dilata más que el tubo de vidrio, la columna de mercurio se eleva en el tubo hasta que el mercurio, el vidrio y sus alrededores logran equilibrarse.

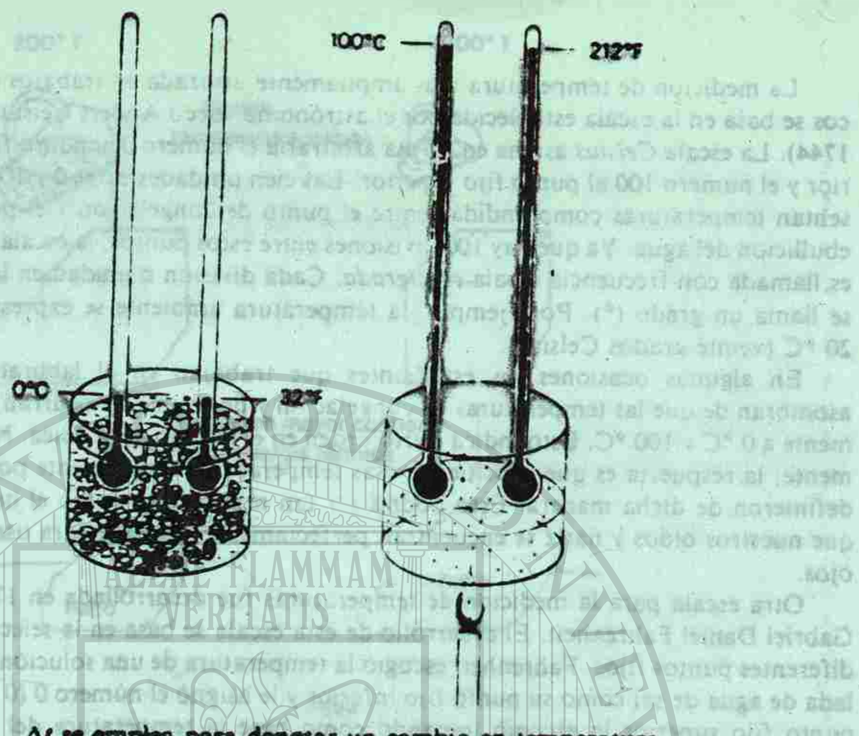
Supóngase que se fabrican dos termómetros no graduados y se colocan en una mezcla de hielo y agua, como se muestra en la figura 17-4. Después de que las columnas de mercurio se estabilizan, una de ellas se marca con 0 °C y la otra con 32 °F. A continuación se colocan los dos termómetros en agua hirviente, hasta que las columnas de mercurio se estabilicen en el punto de ebullición. Nuevamente se marcan los dos termómetros, marcando 100 °C y 212 °F adyacentes al nivel de mercurio arriba de las marcas correspondientes al punto de congelación. El nivel del mercurio es el mismo en ambos termómetros. Así que la única diferencia entre los dos termómetros es la forma en que fueron graduados. Hay 100 divisiones o grados Celsius (C°), entre el punto de congelación y el de ebullición en el termómetro Celsius, y hay 180 divisiones, o grados Fahrenheit (F°), en el termómetro Fahrenheit. Por tanto, 100 grados Celsius representan el mismo intervalo de tempertura que 180 grados Fahrenheit. Simbólicamente,

$$100\ C° = 180\ F° \quad \text{o} \quad 5\ C° = 9\ F° \qquad (17\text{-}1)$$

La marca de grados (°) se coloca después de la C o la F para destacar que los números corresponden a intervalos de temperatura y no a temperaturas específicas. En otras palabras, 20 F° se lee "veinte grados Fahrenheit" y corresponde a una *diferencia* entre dos temperaturas en la escala Fahrenheit. Por otro lado, el símbolo 20 °F se refiere a una marca específica en el termómetro Fahrenheit. Supóngase, por ejemplo, que una sartén con comida caliente se enfría de 98 °F a 76 °F. Estos números corresponden a temperaturas específicas, indicadas por las alturas de la columna de mercurio. Sin embargo, representan un intervalo de temperatura de

$$\Delta t = 98\ °F - 76\ °F = 22\ F°$$

Fig. 17-4 Calibración de los termómetros Celsius y Fahrenheit.



Δt se emplea para denotar un cambio en temperatura.

La física que trata de la transferencia de energía térmica está relacionada siempre con cambios en la temperatura. Es por esto que con frecuencia llega a ser necesario convertir un intervalo de temperatura de una escala en el intervalo correspondiente de la otra. Esto puede lograrse mejor recordando la ecuación (17-1): un intervalo de 5 C° es equivalente a un intervalo de 9 F°. Los factores de conversión apropiados pueden escribirse como

$$\frac{5\ C^\circ}{9\ F^\circ} = 1 = \frac{9\ F^\circ}{5\ C^\circ} \tag{17-2}$$

Cuando se convierten F° en C°, debe emplearse el factor de la izquierda; cuando se convierten C° en F°, debe emplearse el factor de la derecha.

EJEMPLO 17-1 Un riel de acero varía su temperatura de 20 °F en la noche a 70 °F al mediodía durante un periodo de 24 h. Exprésese este intervalo de temperaturas en grados Celsius.

Solución El intervalo de temperatura es

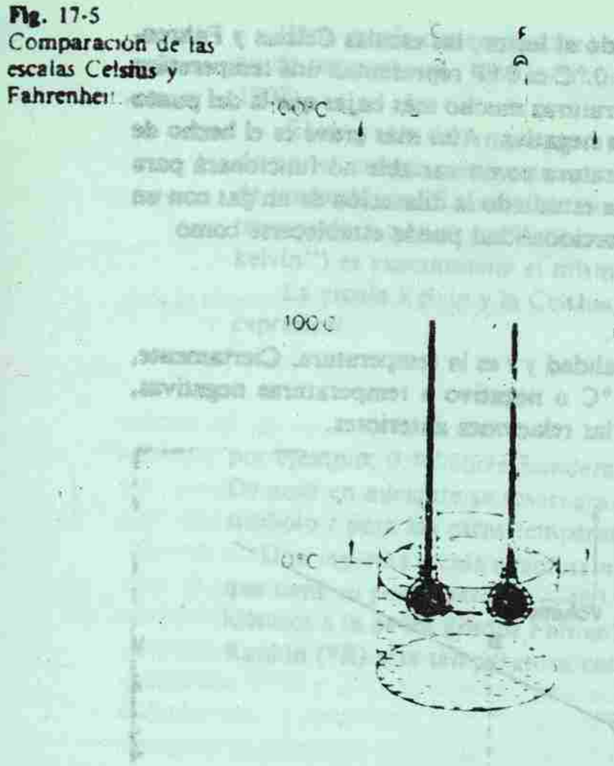
$$\Delta t = 70°F - 20°F = 50\ F°$$

A fin de convertir el intervalo completo en grados Celsius, se selecciona el factor de conversión que cancelará las unidades Fahrenheit. De esta manera

$$\Delta t = 50\ F° \times \frac{5\ C°}{9\ F°} = 27.8\ C°$$

Debe recordarse que la ecuación (17-2) se aplica a intervalos de temperatura. Sólo puede emplearse cuando se trabaja con *diferencias* de temperatura. Es enteramente otra cuestión encontrar la temperatura en la escala Fahrenheit, la cual corresponde a la misma temperatura en la escala Celsius. Puede desarrollarse una ecuación empleando razones y proporciones que ayuden a convertir temperaturas específicas. Supóngase, por ejemplo, que se colocan dos termómetros idénticos en un recipiente con agua, como se muestra en la figura 17-5. Un termómetro se gradúa en grados Fahrenheit y el otro en grados Celsius. Los símbolos t_C y t_F representan la misma temperatura (la temperatura del agua), pero en diferentes

Fig. 17-5 Comparación de las escalas Celsius y Fahrenheit.



escalas. Es evidente que la diferencia entre t_C y 0 °C corresponde al mismo intervalo que la diferencia entre t_F y 32°F. La razón del primero es de 100 divisiones como la razón del último es de 180 divisiones. Por tanto,

$$\frac{t_C - 0}{100} = \frac{t_F - 32}{180}$$

si se simplifica y resuelve para t_C, se obtiene

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32) \tag{17-3}$$

o, resolviendo para t_F,

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32 \tag{17-4}$$

EJEMPLO 17-2 El punto de fusión del plomo es de 330°C. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en la escala Fahrenheit?

Solución Al sustituir en la ecuación (17-4), se obtiene

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32 = \frac{9}{5}(330) + 32$$
$$= 594 + 32 = 626\ °F$$

Debe notarse que las ecuaciones (17-3) y (17-4) no permiten un análisis dimensional porque el origen de cada escala son puntos diferentes. Lo que realmente estas ecuaciones representan es la relación entre los *números* que son asociados a temperaturas específicas en dos escalas *diferentes*. Para ser estrictamente precisos, debe decirse que una temperatura de 0 °C *corresponde* a una temperatura de 32 °F o que una temperatura de 68 °F *corresponde* a una temperatura de 20 °C.

LA ESCALA DE TEMPERATURA ABSOLUTA

Como probablemente se le haya ocurrido al lector, las escalas Celsius y Fahrenheit tienen una limitación muy seria. Ni 0 °C ni 0 °F representan una temperatura real del 0. En consecuencia, para temperaturas mucho más bajas que la del punto de congelación resulta una temperatura negativa. Aún más grave es el hecho de que la fórmula que considera la temperatura como variable no funcionará para las escalas existentes. Por ejemplo, se ha estudiado la dilatación de un gas con un incremento de temperatura. Esta proporcionalidad puede establecerse como

$$V = kt$$

donde k es la constante de proporcionalidad y t es la temperatura. Ciertamente, el volumen de un gas no es cero a 0 °C o negativo a temperaturas negativas, conclusiones que pueden deducirse de las relaciones anteriores.

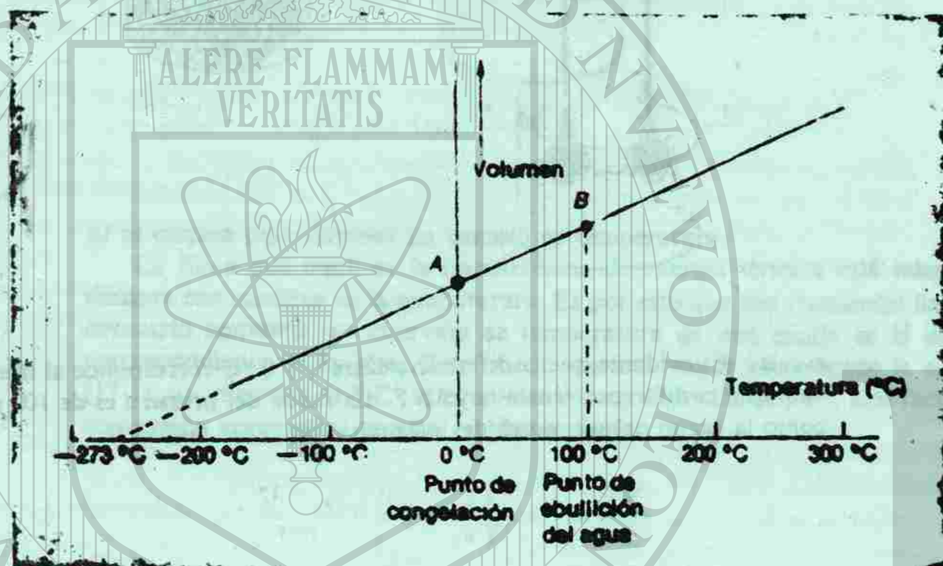


Fig. 17-8 La variación del volumen de un gas como función de la temperatura. El cero absoluto puede definirse al extrapolar a volumen cero.

El ejemplo anterior suministra un indicio para establecer una escala *absoluta*. Si puede determinarse la temperatura a la cual el volumen de un gas bajo presión constante llega a cero, puede establecerse una temperatura cero real. Supóngase que se utiliza un termómetro de gas a presión constante, como el que se muestra en la figura 17-7. El volumen del gas en el bulbo puede medirse cuidadosamente, primero en el punto de congelación y a continuación en el punto de ebullición del agua. Ambos puntos pueden graficarse como en la figura 17-8, con el volumen como ordenada y la temperatura como abscisa. Los puntos A y B corresponden al volumen del gas a las temperaturas de 0 y 100 °C, respectivamente. Una línea recta que pase por estos dos puntos y que se extienda tanto a la izquierda como a la derecha, provee una descripción matemática del cambio en volumen como una función de la temperatura. Adviértase que la línea puede extenderse indefinidamente hacia la derecha, indicando que no hay un límite superior para la temperatura. No obstante, la línea no puede extenderse indefinidamente hacia la izquierda ya que finalmente intersecará al eje de temperatura. En este punto teórico, el volumen del gas sería cero. Una prolongación de la línea indicaría un volumen negativo, lo que no tiene sentido. Por tanto, el punto en el que la línea interseca al eje de temperatura se llama el *cero absoluto* de temperatura. (En realidad cualquier gas se licua antes de alcanzar este punto.)

Si el experimento anterior se lleva a cabo para diferentes gases, las pendientes de las curvas variarán muy poco. Pero la intersección en el eje de la temperatura siempre será el mismo, cercano a —273 °C. Ingeniosos procedimientos teóricos y experimentales han llegado a establecer que la temperatura del cero absoluto es —273.15 °C. En este texto se supondrá que este valor es de —273 °C sin que se cometa un error significativo. Si se convierte a la escala Fahrenheit se demuestra que en esta escala el cero absoluto está en —460 °F.

Una escala de temperatura absoluta tiene como su punto cero el cero absoluto de temperatura. Una escala semejante fue propuesta por Lord Kelvin (1824-1907).

El intervalo de temperatura estándar en esta escala, el *kelvin*, ha sido adoptado por el sistema métrico internacional (SI) como la unidad base para la medición de temperatura. El intervalo en la *escala kelvin* representa el mismo cambio en temperatura que el grado Celsius. Por tanto, un intervalo de 5 K (léase "cinco kelvin") es exactamente el mismo que 5 C°.

La escala Kelvin y la Celsius están relacionadas entre sí mediante la siguiente expresión

$$\boxed{T_K = t_C + 273} \qquad (17\text{-}5)$$

por ejemplo, 0 °C corresponderán a 273 K, y 100 °C a 373 K. (Véase Fig. 17-9.) De aquí en adelante se reservará el símbolo T para la temperatura absoluta y el símbolo t para las otras temperaturas.

Una segunda escala absoluta muy ampliamente empleada es la *escala Rankin*, que tiene su punto cero en —460 °F. La magnitud de los grados en esta escala es idéntica a la de los grados Fahrenheit. La relación entre la temperatura en grados Rankin (°R) y la temperatura correspondiente en grados Fahrenheit es

$$\boxed{T_R = t_F + 460} \qquad (17\text{-}6)$$

Por ejemplo, 0 °F corresponden a 460 °R, y 212 °C corresponden a 672 °R.

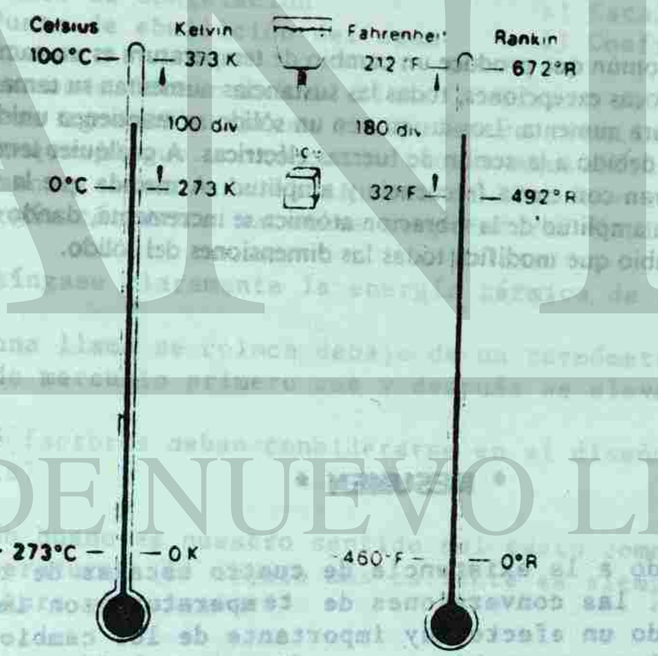


Fig. 17-9 Una comparación de las cuatro escalas de temperatura más comúnmente usadas.

Recuérdese que las ecuaciones (17-5) y (17-6) se aplican para temperaturas específicas. Si se está interesado en un cambio de temperatura o en una diferencia de temperatura, el cambio absoluto o diferencia es el mismo en grados Kelvin y en grados Celsius. Es útil recordar que:

$$\boxed{1\ \text{K} = 1\ \text{C}°} \qquad \boxed{1\ \text{R} = 1\ \text{F}°} \qquad (17\text{-}7)$$

EJEMPLO 17-3 Un termómetro de mercurio no puede utilizarse a temperaturas inferiores a —40 °C, esto se debe a que a temperaturas inferiores el mercurio se congela. *a)* ¿Cuál es el punto de congelamiento del mercurio en escala Kelvin?. *b)* ¿Cuál es la diferencia entre esta temperatura y el punto de congelamiento del agua? Exprésese la respuesta en grados Kelvin.

Solución a) La sustitución directa de $-40\ °C$ en la ecuación (17-5) da

$$T_K = -40\ C + 273 = 233\ K$$

Solución b) La diferencia en el punto de congelamiento es

$$\Delta t = 0\ C - (-40\ C) = 40\ C$$

Puesto que el tamaño del grado Kelvin es idéntico al del grado Celsius, la diferencia es también de 40 kelvins.

Ahora bien, el lector puede preguntarse por qué aún se conservan las escalas Celsius y Fahrenheit. La física de los fenómenos térmicos está siempre estrechamente relacionada con cambios en temperatura o intervalos de la misma. De hecho, es necesario tener una diferencia de temperaturas a fin de obtener una transferencia de calor. Si éste no es el caso, el sistema estará en equilibrio térmico. Puesto que las escalas Kelvin y Rankin se basan en los mismos intervalos de temperatura que las escalas Celsius y Fahrenheit, no se encuentra ninguna diferencia más que la escala que se emplee para intervalos de temperatura; por ejemplo, 20 °C corresponden al mismo intervalo de temperatura que 20 K, y 40 °F corresponde al mismo intervalo de temperatura que 40R°. Por otro lado, si una relación física requiere de una temperatura específica más que de un intervalo de temperatura, entonces debe emplearse la escala absoluta.

DILATACIÓN LINEAL

El efecto más común que produce un cambio de temperatura es un cambio en el tamaño. Con pocas excepciones, todas las sustancias aumentan su tamaño cuando la temperatura aumenta. Los átomos en un sólido se mantienen unidos en un arreglo regular debido a la acción de fuerzas eléctricas. A cualquier temperatura los átomos vibran con cierta frecuencia y amplitud. A medida que la temperatura aumenta la amplitud de la vibración atómica se incrementa, dando como resultado un cambio que modifica todas las dimensiones del sólido.

* RESUMEN *

Se ha visto que, debido a la existencia de cuatro escalas de temperatura utilizadas comúnmente, las conversiones de temperatura son importantes. También se ha estudiado un efecto muy importante de los cambios de temperatura en los materiales, un cambio en sus dimensiones físicas. A continuación se resumen los conceptos principales:

- Hay cuatro escalas de temperatura con las cuales se debe estar completamente familiarizado. Estas escalas se comparan en la figura 17-5, y se dan valores para el punto de ebullición, el punto de congelamiento y el cero absoluto en cada escala. Es muy importante saber distinguir entre un intervalo de temperatura Δt y una temperatura específica t. Para intervalos de temperatura:

$$\frac{5C°}{9F°} = 1 = \frac{9F°}{5C°} \qquad 1K° = 1C° \qquad 1R° = 1F°$$ **Intervalos de temperatura**

- Para temperaturas específicas se debe corregir la diferencia de intervalo, pero también por el hecho de que hay diversos números asignados a las mismas temperaturas:

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32) \qquad t_F = \frac{9}{5}t_C + 32$$ **Temperaturas específicas**

$$T_K = t_C + 273 \qquad T_R = t_F + 460$$ **Temperaturas absolutas**

* PREGUNTAS *

1. Defínase los siguientes términos:
   a) Energía térmica
   b) Temperatura
   c) Equilibrio térmico
   d) Termómetro
   e) Punto de Congelación
   f) Punto de ebullición del agua
   g) Escala Celsius
   h) Escala Fahrenheit
   i) Cero absoluto
   j) Escala Kelvin
   k) Escala Rankine
   l) Coeficiente de dilatación lineal
2. Dos trozos de mineral de hierro caliente se colocan en un recipiente con agua. El sistema se encuentra térmicamente aislado y se permite que llegue a una condición de equilibrio térmico. ¿Es necesariamente cierto que el mineral de hierro y el agua tienen la misma energía térmica y la misma temperatura? Explíquese.
3. Distíngase claramente la energía térmica de la temperatura.
4. Si una llama se coloca debajo de un termómetro de mercurio, la columna de mercurio primero cae y después se eleva. Explíquese.
5. ¿Qué factores deben considerarse en el diseño de un termómetro sensible?
6. ¿Cuán bueno es nuestro sentido del tacto como un medio de juzgar la temperatura? ¿El objeto más caliente es siempre el que tiene la temperatura más alta?
7. Dado un termómetro sin marcas, ¿cómo se procedería a graduarlo en grados Celsius?
8. Una regla de 6 in se dila a 0.0014 in cuando la temperatura se incrementa 1°C. ¿Cuánto se dilatará una regla de 6 cm en el mismo intervalo de temperatura si se fabrica con el mismo material?
9. Una barra de latón une los extremos opuestos de un anillo del mismo metal. Si el sistema se caliente uniformemente, ¿permanecerá circular el anillo?

10. Una tuerca de latón se usa con un tornillo de acero. ¿Cuándo se afecta el ajuste, cuándo el perno se caliente por separado? ¿Si sólo se caliente la tuerca? ¿Si ambos se calientan por igual?

11. Una tapa de aluminio se atornilla fuertemente en un frasco de pepinos a temperatura ambiente. Después de que el frasco se ha guardado en el refrigerador un día o dos, la tapa no puede quitarse con facilidad. Explíquese. Sugiérase una forma de quitar la tapa con muy poco esfuerzo. ¿Cómo puede resolver el fabricante este tipo de problema?

12. Descríbase la dilatación del agua próxima a los 4°C. ¿Por qué se congela primero la superficie de un lago? ¿Qué temperatura es más probable que exista en el fondo del lago si está congelada la superficie?

13. Sígase un razonamiento análogo al de la dilatación superficial para deducir las ecuaciones (17-15) a (17-16). En el texto se estableció que γ es aproximadamente el doble de a. ¿Por qué no es exactamente el doble de a? ¿Es mayor el error en la ecuación (17-13) o en la ecuación (17-15)?

*** PROBLEMAS ***

1. La temperatura normal del cuerpo es 98.6°F. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en la escla Celsius?

   Respuesta 37°C

2. El punto de ebullición del azufre es 444.5°C. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en la escala Fahrenheit?

3. El punto de ebullición del oxígeno es -297.35°F. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en la escala Celsius, en la Rankin y en la Kelvin?

   Respuesta -183°C, 163°R, 90°K

4. El oro se funde a 1336°K. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en grados Rankin, Celsius y Fahrenheit?

5. Una pared con ladrillos térmicos tiene una temperatura interior de 313°F y una temperatura exterior de 73°F. Exprésese la diferencia en las temperaturas de la superficie en grados Celsius y Kelvin.

   Respuesta 133°C, 133°K

6. Demuéstrese que las escalas Celsius y Fahrenheit tienen la misma lectura a -40°.

7. Una aleación de cobre se retira de un horno a 200°C y se enfría a una temperatura de 20°C. Exprésese el cambio de temperatura en grados Fahrenheit. ¿Cuál es el cambio en grados Kelvin?

   Respuesta 324°F, 180°K.

8. La acetona hierve a 56.5°C. El nitrógeno líquido hierve a -196°C. Exprésese la diferencia entre esas temperaturas en grados Rankine

9. Una pieza de tubo de cobre tiene una longitud de 6 m a 20°C. ¿Cuánto aumenta su longitud cuando se calienta a una temperatura de 80°C?

   Respuesta 6.12 mm.

10. Una barra de plata tiene una longitud de 1 ft a 70°F. ¿Cuánto aumentará su longitud cuando se coloca en agua hirviendo?

11. El diámetro de un agujero en una placa de acero es de 9 cm cuando la temperatura es de 20°C. ¿Cuál será el diámetro del agujero a 200°C?

    Respuesta 9.019 cm.

12. Una barra de latón tiene una longitud de 12 ft a 70°F. Si la longitud de la barra después de calentarla es de 12.01 ft. ¿Cuál es su temperatura?

Cantidad de calor

La energía térmica es aquella que está asociada al azar con el movimiento molecular, por lo que no es posible medir la posición y velocidad de cada molécula en una sustancia a fin de determinar su energía térmica. Sin embargo, es posible medir *cambios* de energía térmica al relacionarlos con un cambio en la temperatura.

Por ejemplo, cuando dos sistemas a diferentes temperaturas se ponen en contacto, alcanzarán finalmente una temperatura intermedia común. A partir de esta observación, es correcto decir que el sistema con la temperatura mayor ha cedido energía térmica al sistema a temperatura menor. La energía térmica perdida o ganada por los objetos se llama *calor*. Este capítulo analiza la medición cuantitativa del calor.

SIGNIFICADO DE CALOR

Originalmente se creía que dos sistemas alcanzaban el equilibrio térmico mediante la transferencia de una sustancia llamada *calórico*. Se afirmaba que todos los cuerpos contenían una cantidad de calórico proporcional a su temperatura. Por lo tanto, cuando dos objetos se ponían en contacto, el que tenía una temperatura mayor transfería calórico al objeto de menor temperatura hasta que ambos alcanzaban la misma temperatura. La idea de que una sustancia se transfiere, lleva consigo la certeza de que hay un límite de la cantidad de energía térmica que puede obtenerse de un cuerpo. Este punto fue el que finalmente condujo a la caída de la teoría del calórico.

El conde de Rumford, de Baviera, fue el primero que puso en duda la teoría del calórico. Hizo su descubrimiento en 1798 mientras supervisaba la perforación de un cañón, la cual se mantenía llena de agua para evitar que se sobrecalentara. A medida que el agua se evaporaba, se reponía. De acuerdo con la teoría existente, el calórico se proporcionaba con agua hirviendo. La producción aparente de calórico se explicaba al suponer que cuando la materia se divide finamente, pierde cierta capacidad para retener calórico. Rumford ideó un experimento para demostrar que aun cuando una herramienta de taladrar no cortaba totalmente el metal del cañón, se producía el suficiente calórico para que el agua hirviera. De hecho, se observó que en tanto el trabajo mecánico se desarrollaba, la herramienta era una fuente de calórico inagotable.

Rumford desechó la teoría del calórico con base en sus experimentos y sugirió que la explicación debía estar relacionada con el movimiento. Por lo tanto, la idea del trabajo mecánico es responsable de que se introdujera el concepto de calor. La equivalencia de calor y trabajo como dos formas de energía la estableció más tarde Sir James Prescott Joule.

CANTIDAD DE CALOR

Debe descartarse que el calor sea una sustancia; no es algo que un objeto *tenga* sino más bien es algo que *da* o *absorbe*. El calor es simplemente otra forma de energía que puede medirse sólo en función del efecto que produce. Se define una cantidad de calor como la energía térmica necesaria para producir algún cambio estándar. Tres unidades son la *caloría*, la *kilocaloría*, y la *unidad térmica británica* (British thermal unit).

> Una **caloría** (cal) es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua.

> Una **kilocaloría** (kcal) es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Celsius la temperatura de un kilogramo de agua. (1 kcal = 1000 cal.)

> Una **unidad térmica británica** (Btu) es la cantidad de calor necesaria para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de 1 lb de agua.

Antes de utilizar las definiciones anteriores es necesario estudiar brevemente las relaciones entre las diferentes unidades consideradas. Por ejemplo, la libra unida (lb_m), que aparece en la definición de un Btu, debe considerarse como la *masa de la libra estándar*. Esto representa una divergencia de las unidades USCS, en las que la unidad libra se reservaba para el peso. Por lo tanto, cuando se refiere a 1 lb_m de agua, se está refiriendo a una *masa* de agua equivalente a aproximadamente 1/32 de slug.

Es necesario hacer esta distinción ya que la libra de agua debe representar una cantidad constante de materia, independiente de la localización. Por definición, la libra masa está relacionada con el gramo y el kilogramo de la siguiente manera:

$$1\ lb_m = 454\ g = 0.454\ kg$$

La diferencia entre las tres unidades de calor resulta de la diferencia de masas y de la diferencia entre las escalas de temperatura. Se deja como ejercicio para el lector que demuestre lo siguiente:

$$\boxed{1\ \text{Btu} = 252\ \text{cal} = 0.252\ \text{kcal}} \qquad (18\text{-}1)$$

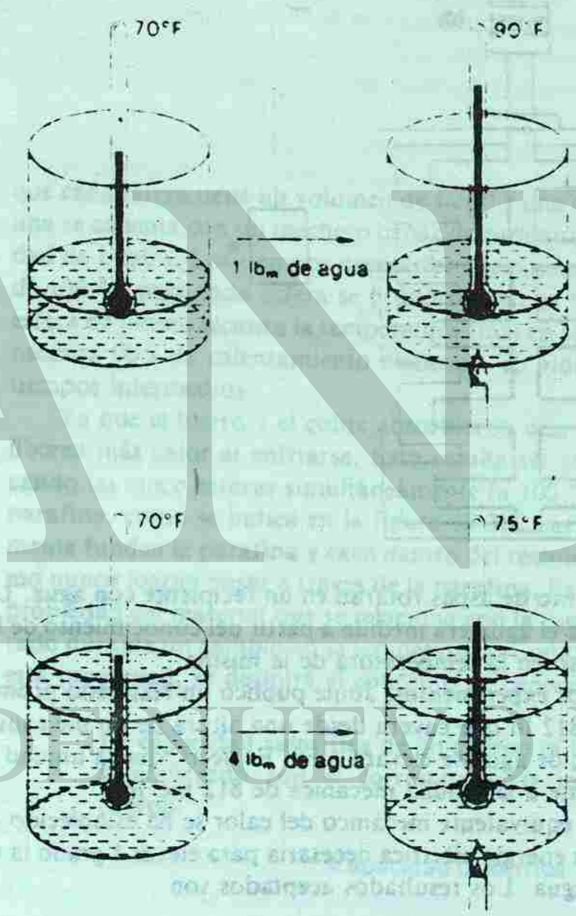


Fig. 18-1 La misma cantidad de calor se aplica a diferentes masas de agua. La masa mayor experimenta una menor elevación de temperatura.

Ya que se han definido las unidades para medir cuantitativamente el calor, debe distinguirse claramente entre las cantidades de calor y de temperatura. Por ejemplo: supóngase que se vierte 1 lb_m de agua en un vaso y 4 lb_m de agua en otro, como se muestra en la figura 18-1. La temperatura inicial del agua en cada uno de los recipientes tiene un valor de 70 °F. Se coloca una llama debajo de cada vaso durante el mismo intervalo de tiempo, suministrando 20 Btu de energía térmica al agua de cada recipiente.

La temperatura del recipiente con 1 lb_m aumenta 20 F°, pero la temperatura del recipiente que contiene 4 lb_m sólo aumenta 5 F°. En ambos casos se suministró la misma cantidad de calor al agua.

ENERGÍA MECÁNICA Y CALOR

El experimento de Rumford demostró que en tanto el trabajo mecánico se suministrara, era posible obtener una fuente ilimitada de energía térmica, es decir, que no hay un límite a la producción de energía térmica producida al frotar dos trozos de madera. No obstante, la energía mecánica se transforma en energía térmica, y debe haber una relación entre las unidades en que se mide la energía térmica y la energía mecánica.

La primera relación cuantitativa entre las unidades de energía térmica y las unidades de energía mecánica fue establecida por Joule en 1843. Aunque Joule ideó muchos experimentos diferentes para demostrar la equivalencia entre las unidades de calor y las de energía, el aparato que con más frecuencia se recuerda es el de la figura 18-2. La energía mecánica se obtenía al dejar caer pesos que

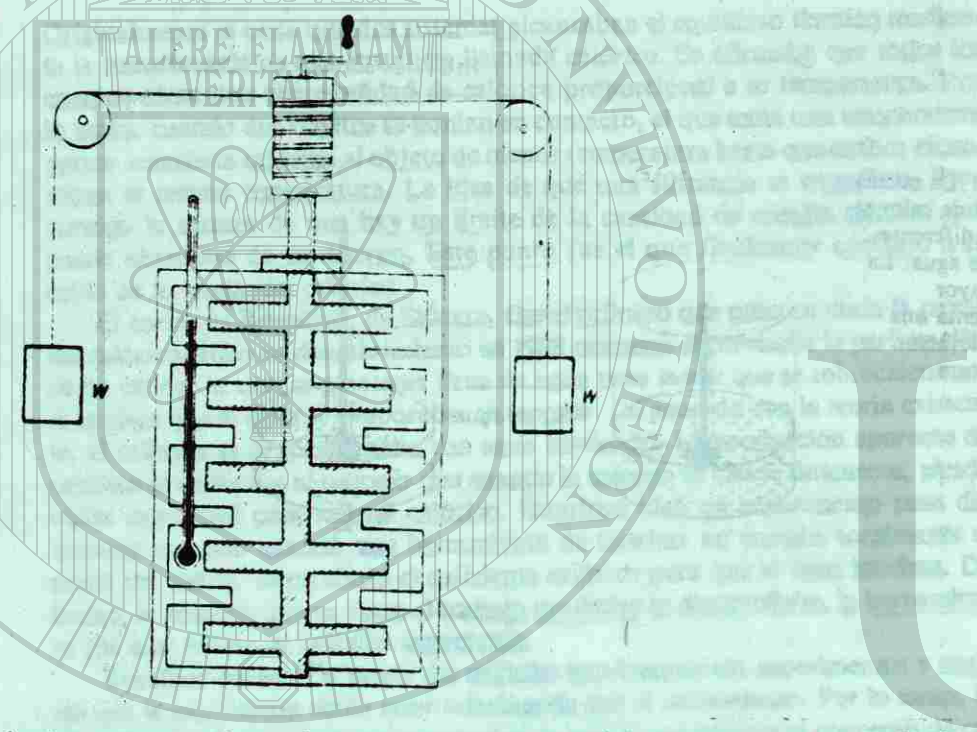


Fig. 18-2 Experimento de Joule para determinar el equivalente mecánico del calor. Los pesos que caen realizan trabajo al agitar el agua y elevar su temperatura.

hacían que un conjunto de aspas rotaran en un recipiente con agua. La cantidad de calor que absorbía el agua era medida a partir del conocimiento de la masa del agua y del incremento en la temperatura de la misma.

De éste y de otros experimentos, Joule publicó un resultado promedio. Estimó que un peso de 812 lb que cayera desde una altura de un pie causaba que la temperatura de 1 lb_m de agua se elevara 1 F°. Es decir, que la unidad térmica de un Btu era equivalente a la unidad mecánica de 812 pie/lb.

Actualmente, el equivalente mecánico del calor se ha establecido con exactitud en términos de la energía eléctrica necesaria para elevar 1 grado la temperatura de una masa de agua. Los resultados aceptados son

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} \qquad (18\text{-}2)$$

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J} \qquad (18\text{-}3)$$

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J} \qquad (18\text{-}4)$$

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

Se ha definido una cantidad de calor como la energía térmica necesaria para elevar la temperatura de una masa dada. No obstante, la cantidad de energía térmica necesaria para elevar la temperatura de una sustancia varía para diferentes materiales. Por ejemplo, supóngase que se aplica calor a cinco esferas, todas del mismo tamaño pero de diferentes materiales, como se muestra en la figura 18-3a. Si se quiere elevar la temperatura de cada esfera a 100 °C, se encontrará que algunas deben calentarse más tiempo que otras. Para ejemplificar este hecho, supóngase

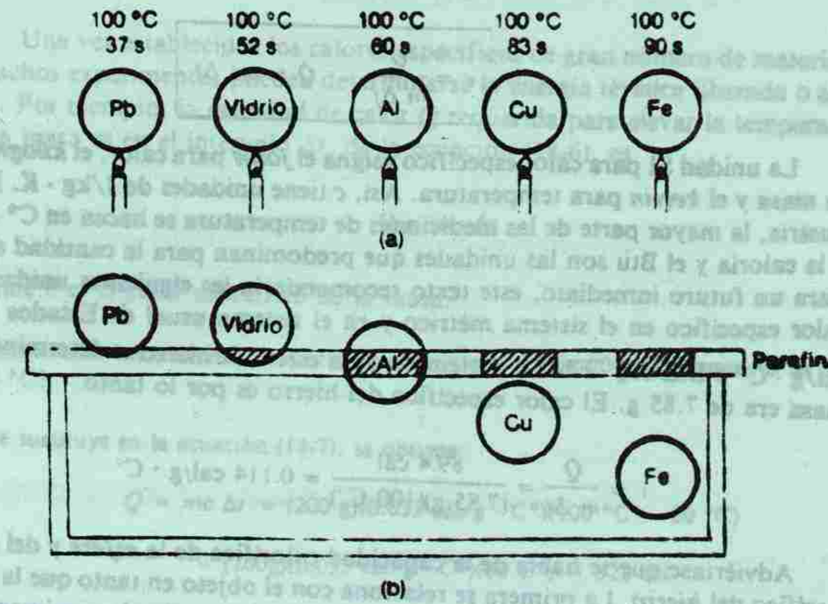


Fig. 18-3 Comparación entre las capacidades caloríficas para cinco esferas de diferentes materiales.

que cada esfera tiene un volumen de 1 cm³ y una temperatura inicial de 0 °C; cada una se calienta con un mechero capaz de suministrar energía térmica a una velocidad de 1 cal/s. Los tiempos necesarios aproximados para lograr una temperatura de 100 °C para cada esfera se proporcionan en la figura 18-3. Adviértase que la esfera de plomo alcanza la temperatura final en sólo 37 s mientras que la de hierro necesita 90 s de calentamiento continuo. El vidrio, aluminio y cobre requieren tiempos intermedios.

Ya que el hierro y el cobre absorbieron más calor, puede esperarse que ellos liberen más calor al enfriarse. Esto resulta ser cierto y puede demostrarse colocando las cinco esferas simultáneamente (a 100 °C) sobre una banda delgada de parafina, como se indica en la figura 18-3b. Las esferas de hierro y cobre finalmente funden la parafina y caen dentro del recipiente. Las esferas de vidrio y plomo nunca logran pasar a través de la parafina. Es evidente que debe haber alguna propiedad del material que se relaciona con la cantidad de calor absorbido o liberado durante un cambio en la temperatura. Como un primer paso para establecer esta propiedad, se definirá el concepto de *capacidad calorífica*.

> La **capacidad calorífica** de un cuerpo es la razón de la cantidad de calor suministrado con el correspondiente incremento de temperatura del cuerpo.

$$\text{Capacidad calorífica} = \frac{Q}{\Delta t} \qquad (18\text{-}5)$$

Las unidades de capacidad calorífica son calorías por grado Celsius, (cal/C°), kilocalorías por grado Celsius (kcal/C°), o Btu por grado Fahrenheit (Btu/F°). Para el ejemplo anterior, fueron necesarias 89.4 cal para elevar a 100 C° la temperatura de la esfera de hierro. Por lo tanto, la capacidad calorífica de la esfera de hierro es 0.894 cal/C°.

La masa del objeto no se consideró en la definición de capacidad calorífica, porque esto es una propiedad del objeto. Para lograr que sea una propiedad del material se define la *capacidad calorífica por unidad de masa*. A esta propiedad se le da el nombre de *capacidad calorífica específica*, y se indica con la letra *c*.

> La **capacidad calorífica específica** o calor específico de un material es la cantidad de calor necesario para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa.

Fig. 18-3 Comparación entre las capacidades caloríficas para esferas de diferentes materiales.

$$\boxed{c = \frac{Q}{m\,\Delta t} \qquad Q = mc\,\Delta t} \tag{18-6}$$

La unidad SI para calor específico asigna el *joule* para calor, el *kilogramo* para masa y el *kelvin* para temperatura. Así, c tiene unidades de $J/kg \cdot K$. En la industria, la mayor parte de las mediciones de temperatura se hacen en C° o en F°, y la caloría y el Btu son las unidades que predominan para la cantidad de calor. Para un futuro inmediato, este texto recomendaría las siguientes unidades para calor específico en el sistema métrico y en el sistema usual de Estados Unidos: $cal/g \cdot C°$ y $Btu/lb_m \cdot F°$. En el ejemplo de la esfera de hierro se determinó que su masa era de 7.85 g. El calor específico del hierro es por lo tanto

$$c = \frac{Q}{m\,\Delta t} = \frac{89.4\ \text{cal}}{(7.85\ \text{g})(100\ \text{C°})} = 0.114\ \text{cal/g} \cdot \text{C°}$$

Adviértase que se habla de la capacidad calorífica de la *esfera* y del calor específico del *hierro*. La primera se relaciona con el objeto en tanto que la segunda se relaciona con el material del que está hecho el mismo. En el experimento de las esferas, sólo se observa la cantidad de calor necesario para elevar su temperatura a 100 C°.

No se consideró la densidad de los materiales. Si los tamaños de las esferas se ajustaran de tal modo que cada una de ellas tuviera la misma masa, se observarían resultados diferentes. Puesto que el calor específico del aluminio es el más alto, será necesario más calor para la esfera de aluminio que para las otras esferas. Análogamente, la esfera de aluminio liberará más calor al enfriarse.

La caloría se definió como el calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de agua. Por lo tanto, por definición, el calor específico del agua es igual a 1 cal/gC° (o 1 kcal/kgC°). Un argumento similar aplicado a la definición de un Btu demostrará que el calor específico del agua es también igual a 1 $Btu/lb_m \cdot F°$. Una consecuencia importante de estas definiciones es que el calor específico de cualquier objeto es numéricamente el mismo en cualquiera de los sistemas de unidades. Esto puede demostrarse por conversión de unidades:

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot \text{F°}} \times \frac{9\ \text{F°}}{5\ \text{C°}} \times \frac{1\ \text{lb}_m}{454\ \text{g}} \times \frac{252\ \text{cal}}{1\ \text{Btu}} = 1\ \text{cal/g} \cdot \text{C°}$$

Los calores específicos de algunas sustancias comunes se proporcionan en la tabla 18-1.

Tabla 18-1 Capacidades caloríficas específicas

Sustancia	c, cal/g · C° o Btu/lb$_m$ · F°
Aluminio	0.22
Latón	0.094
Cobre	0.093
Alcohol etílico	0.60
Vidrio	0.20
Oro	0.03
Hielo	0.50
Hierro	0.113
Plomo	0.031
Mercurio	0.033
Plata	0.056
Vapor	0.480
Acero	0.114
Trementina	0.42
Zinc	0.092

Una vez establecidos los calores específicos de gran número de materiales, en muchos experimentos pueden determinarse la energía térmica liberada o absorbida. Por ejemplo, la cantidad de calor Q requerida para elevar la temperatura de una masa m en el intervalo Δt, de la ecuación (18-6), es

$$Q = mc\,\Delta t \tag{18-7}$$

donde c es el calor específico de la masa.

EJEMPLO 18-1 ¿Cuánto calor es necesario para elevar la temperatura de 200 g de mercurio de 20 °C a 100 °C?

Solución Si se sustituye en la ecuación (18-7), se obtiene

$$Q = mc\,\Delta t = (200\ \text{g})(0.033\ \text{cal/g} \cdot \text{C°})(100\ \text{°C} - 20\ \text{°C})$$

$$= (200\ \text{g})(0.033\ \text{cal/g} \cdot \text{C°})(80\ \text{C°}) = 528\ \text{cal}$$

MEDICIÓN DEL CALOR

Con frecuencia se ha subrayado la distinción entre energía térmica y temperatura. Se ha introducido el término *calor* como la energía térmica *absorbida* o *liberada* durante un cambio de temperatura. La relación cuantitativa entre calor y temperatura se describe mejor mediante el concepto de calor específico, como se indica en la ecuación (18-7). A continuación se incluirán las relaciones físicas entre todos estos términos.

El principio de equilibrio térmico dice que siempre y cuando varios objetos se coloquen juntos dentro de un recipiente aislado, alcanzarán finalmente la misma temperatura. Lo anterior es el resultado de una transferencia de energía térmica de los cuerpos calientes a los fríos. Si la energía se conserva, se dice que *el calor perdido por los cuerpos calientes debe ser igual al calor ganado por los cuerpos fríos*. Es decir,

$$\boxed{\text{Calor perdido} = \text{calor ganado}} \tag{18-8}$$

Esta ecuación expresa el resultado neto de transferencia de calor dentro de un sistema.

El calor perdido o ganado por un objeto no se relaciona en forma simple con las energías moleculares de los objetos. Siempre y cuando se suministre energía térmica a un objeto, éste puede absorber la energía de muchas formas diferentes. Es necesario el concepto de calor específico para medir la capacidad de diferentes materiales para utilizar la energía térmica a fin de incrementar sus temperaturas. La misma cantidad de energía térmica aplicada no da como resultado un mismo aumento de temperatura para todos los materiales. Por esta razón, se dice que la temperatura es una cantidad *fundamental*. Su medición es necesaria a fin de determinar la cantidad de calor perdido o ganado en un proceso dado.

Al aplicar la ecuación general para la conservación de energía térmica [Ec. (18-7)], la cantidad de calor ganado o perdido por cada objeto se calcula de la ecuación

$$Q = mc\,\Delta t \tag{18-7}$$

El término Δt representa el cambio absoluto en temperatura cuando se aplica a la ecuación de conservación. El procedimiento se demuestra mejor mediante un ejemplo.

EJEMPLO 18-2 Un trozo de cobre se calienta a 90 °C y luego se le coloca en 80 g de agua a 10 °C. La temperatura final de la mezcla es 18 °C. ¿Cuál es la masa del cobre?

Solución

Si se aplica la ecuación (18-8), se escribe

Calor perdido por el cobre = calor ganado por el agua

$$m_c c_c \Delta t_c = m_w c_w \Delta t_w$$

$$m_c c_c (t_c - t_e) = m_w c_w (t_e - t_w)$$

El cambio de temperatura del cobre se calcula restando la temperatura de equilibrio t_e de la temperatura inicial del cobre t_c. Por otro lado, el cambio de temperatura del agua se calcula restando la temperatura inicial del agua t_w de la temperatura de equilibrio. Esto no representa un error de signo, ya que la cantidad en el primer miembro representa una *pérdida* de calor y la cantidad del segundo miembro representa una *ganancia* de calor. De la tabla 18-1 se obtienen los calores específicos y sustituyendo las otras cantidades conocidas se tiene

$$m_c(0.093\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(90\ \text{°C} - 18\ \text{°C}) = (80\ \text{g})(1\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(18\ \text{°C} - 10\ \text{°C})$$

$$m_c(0.093\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(72\ \text{C°}) = (80\ \text{g})(1\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(8\ \text{C°})$$

$$m_c = 95.6\ \text{g}$$

En este ejemplo sencillo se han despreciado dos hechos importantes: 1) el agua debe tener un recipiente que la contenga, el cual también absorberá calor del cobre; 2) el sistema entero debe aislarse de las temperaturas externas. De otra manera, la temperatura de equilibrio siempre será la temperatura ambiente. Para salvar esas dificultades se emplea un dispositivo de laboratorio llamado calorímetro (Fig. 18-4), que consiste en un recipiente metálico delgado *K*, generalmente de aluminio, sostenido en su parte central mediante un soporte externo *A* y por otro soporte de hule no conductor *H*. La pérdida de calor se minimiza en tres formas: 1) el empaque de hule evita la pérdida por conducción; 2) el espacio de aire muerto entre las paredes del recipiente evita fugas de calor por corrientes de aire; y 3) un recipiente de metal muy bien pulido reduce las pérdidas de calor por radiación. Los tres métodos mencionados se estudiarán en el siguiente capítulo. La tapa de madera *L* tiene orificios en su parte superior para poder introducir un termómetro y un agitador de aluminio.

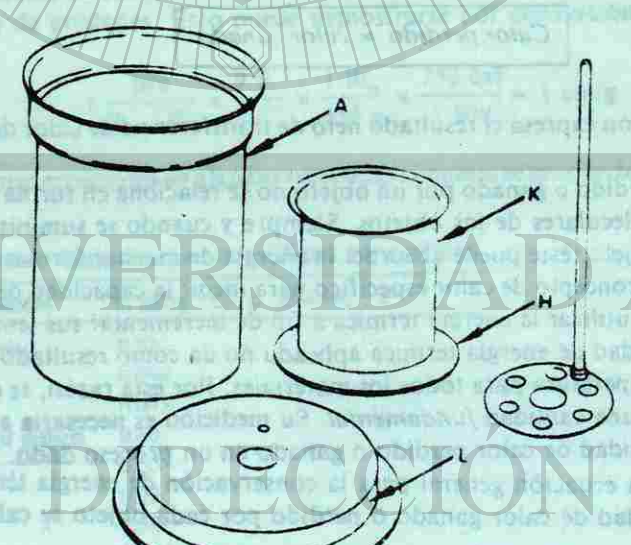


Fig. 18-4 El calorímetro de laboratorio. (*Central Scientific Co.*)

EJEMPLO 18-3

En un experimento de laboratorio se desea determinar el calor específico del hierro empleando un calorímetro. Se colocan 80 g de perdigón de acero seco en recipiente, que se calienta encima de agua hirviendo a una temperatura de 95 °C. La masa del recipiente interior de aluminio y del agitador es de 60 g. El calorímetro se llena parcialmente con 150 g de agua a 18 °C. En seguida se introduce el perdigón caliente en el recipiente y se sella el calorímetro, como se muestra en la figura 18-5. Después de que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico, la temperatura final es 22 °C.

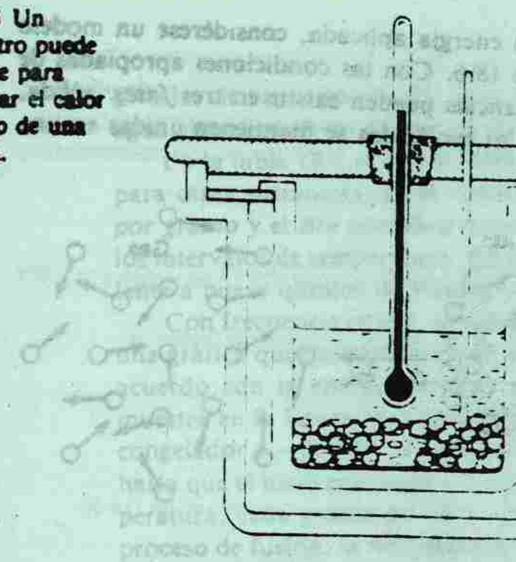


Fig. 18-5 Un calorímetro puede emplearse para determinar el calor específico de una sustancia.

Solución

La pérdida de calor de los perdigones de hierro debe igualar el calor ganado por el agua, más el calor ganado por el recipiente de aluminio y el agitador. Se puede suponer que la temperatura inicial del recipiente es la misma que la del agua y la del agitador (18 °C). Se calculará el calor ganado por el agua y por el aluminio separadamente.

$$Q_{\text{agua}} = mc\,\Delta t = (150\ \text{g})(1\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(22\ \text{°C} - 18\ \text{°C})$$

$$= (150\ \text{g})(1\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(4\ \text{C°}) = 600\ \text{cal}$$

$$Q_{\text{Al}} = mc\,\Delta t = (60\ \text{g})(0.22\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(22\ \text{°C} - 18\ \text{°C})$$

$$= (60\ \text{g})(0.22\ \text{cal/g}\cdot\text{C°})(4\ \text{C°}) = 52.8\ \text{cal}$$

Ahora el calor total ganado es la suma de estos valores.

$$\text{Calor ganado} = 600\ \text{cal} + 52.8\ \text{cal} = 652.8\ \text{cal}$$

Esta cantidad de calor debe igualar el calor perdido por los perdigones de hierro.

$$\text{Calor perdido} = Q_i = m c_i \Delta t = (80\ \text{g})c_i(95\ \text{°C} - 22\ \text{°C})$$

Al igualar la pérdida de calor con la ganancia de calor da:

$$(80\ \text{g})c_i(73\ \text{C°}) = 652.8\ \text{cal}$$

Al resolver para c_i, se obtiene

$$c_i = \frac{652.8\ \text{cal}}{(80\ \text{g})(73\ \text{C°})} = 0.11\ \text{cal/g}\cdot\text{C°}$$

En el ejemplo anterior, se despreció el calor ganado por el termómetro. En una situación de laboratorio, la porción del termómetro dentro del calorímetro absorberá aproximadamente la misma cantidad de calor que una cantidad adicional de 0.5 g de agua. Esta cantidad se llama *equivalente en agua* del termómetro, y debe sumarse a la masa de agua en un experimento preciso.

CAMBIO DE FASE

Cuando una sustancia absorbe una cantidad dada de calor, la velocidad de sus moléculas generalmente se incrementa y su temperatura se eleva. Dependiendo del calor específico de la sustancia, el aumento de temperatura es directamente proporcional a la cantidad de calor suministrado e inversamente proporcional a la masa de la sustancia. Sin embargo, ocurren ciertos fenómenos curiosos cuando un sólido se funde o un líquido hierve. En estos casos la temperatura permanece constante hasta que todo el sólido se funde o hasta que todo el líquido hierve.

Para entender lo que ocurre a la energía aplicada, considérese un modelo simple, como se muestra en la figura 18-6. Con las condiciones apropiadas de temperatura y presión, todas las sustancias pueden existir en tres *fases:* sólida, líquida o gaseosa. En la fase sólida, las moléculas se mantienen unidas en una

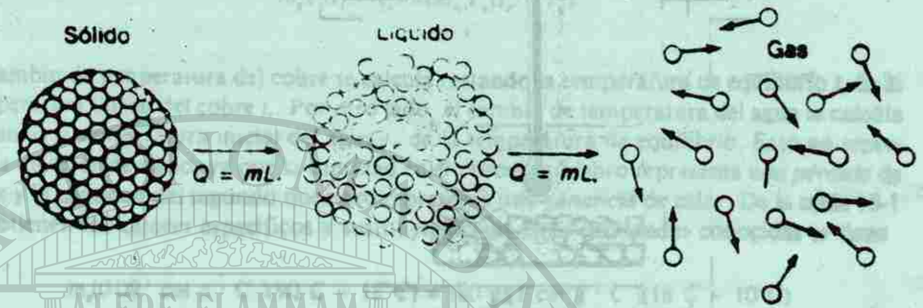


Fig. 18-6 Un modelo simplificado muestra las separaciones relativas moleculares en las fases sólida, líquida y gaseosa. Durante un cambio de fase la temperatura permanece constante.

rígida estructura cristalina, por lo que la sustancia tiene volumen y forma definidos. A medida que se suministra calor, las energías de las partículas en el sólido se incrementan y sus temperaturas se elevan. Finalmente, la energía cinética llega a ser tan grande que algunas de las partículas rebasan las fuerzas elásticas que las mantiene en posiciones fijas. Este aumento en la separación les da libertad de movimiento y se asocia con la fase líquida. En este punto, la energía que absorbe la sustancia se utiliza para separar mas las moléculas que en la fase sólida. La temperatura no aumenta durante dicho cambio de fase. El cambio de fase de sólido a líquido se llama *fusión*, y la temperatura a la cual este cambio ocurre se llama *punto de fusión*.

La cantidad de calor necesaria para fundir una unidad de masa de una sustancia en su punto de fusión se llama *calor latente de fusión*.

> **El calor latente de fusión** L_f de una sustancia es la cantidad de calor por unidad de masa requerida para cambiar la sustancia de la fase sólida a la fase líquida a la temperatura de fusión.

$$L_f = \frac{Q}{m} \qquad Q = mL_f \tag{18-9}$$

El calor latente de fusión L_f se expresa en Btu por libra, calorías por gramo, o kilocalorías por kilogramo. El término *latente* se origina en el hecho de que la temperatura permanece constante durante el proceso de fusión. El calor de fusión para el agua es 80 cal/g o 144 Btu/lb$_m$. Esto significa que 1 g de hielo absorbe 80 cal de energía térmica al formar 1 g de agua a 0 °C.

Después de que todo el sólido se funde, la energía cinética de las partículas del líquido resultante se incrementa de acuerdo con el calor específico, y se eleva otra vez la temperatura. Finalmente la temperatura llegará a un nivel en el cual la energía térmica se usa para cambiar la estructura molecular, formándose un gas o vapor. El cambio de fase de líquido a vapor se llama *vaporización*, y la temperatura asociada con este cambio se llama *punto de ebullición* de la sustancia.

La cantidad de calor necesaria para vaporizar la unidad de masa se llama *calor latente de vaporización*.

> **El calor latente de vaporización** L_v de una sustancia es la cantidad de calor por unidad de masa que es necesaria para cambiar la sustancia de líquido a vapor a la temperatura de ebullición.

$$L_v = \frac{Q}{m} \qquad Q = mL_v \tag{18-10}$$

El calor de vaporización del agua es de 540 cal/g o 970 Btu/lb$_m$. Es decir, 1 g de agua absorbe 540 cal de energía térmica al formar 1 g de vapor de agua a 100 °C.

En la tabla 18-2 se dan diferentes valores del calor de fusión y de vaporación para otras sustancias. Debe notarse que la diferencia numérica entre la *caloría por gramo* y el *Btu por libra masa* se origina únicamente por la diferencia entre los intervalos de temperatura. En consecuencia, la unidad de 1 Btu/lb$_m$ es equivalente a nueve quintos de 1 cal/g.

Con frecuencia es útil, al estudiar los cambios de fase de una sustancia, hacer una gráfica que muestre la forma en que la temperatura de una sustancia varía de acuerdo con la energía térmica que se le aplica. Una gráfica de este tipo se muestra en la figura 18-7 para el agua. Si cierta cantidad de hielo se toma de un congelador a −20 °C y se calienta, su temperatura se incrementará gradualmente hasta que el hielo comience a fundirse a 0 °C. Por cada grado que se eleve la temperatura, cada gramo de hielo absorberá 0.5 cal de energía térmica; durante el proceso de fusión, la temperatura permanece constante y cada gramo de hielo absorberá 80 cal de energía térmica al formarse 1 g de agua.

Una vez que el hielo se funde, la temperatura comienza a elevarse otra vez con una velocidad uniforme hasta que el agua empieza a hervir a 100 °C. Por cada grado que la temperatura aumenta, cada gramo absorberá 1 cal de energía tér-

Tabla 18-2 Calores de fusión y calores de vaporización para algunas sustancias

Sustancia	Punto de fusión, °C	Calor de fusión, Cal/g	Punto de ebullición, °C	Calor de vaporización, Cal/g
Alcohol etílico	−117.3	24.9	78.5	204
Aluminio	658	76.8	2057	
Amoniaco	−75	108	−33.3	327
Cobre	1080	42	2310	
Helio	−269.6	1.25	−268.9	
Plomo	327.3	5.86	1620	208
Mercurio	−39	2.8	358	71
Oxígeno	−218.8	3.3	−183	51
Plata	960.8	21	2193	558
Agua	0	80	100	540
Zinc	420	24	918	475

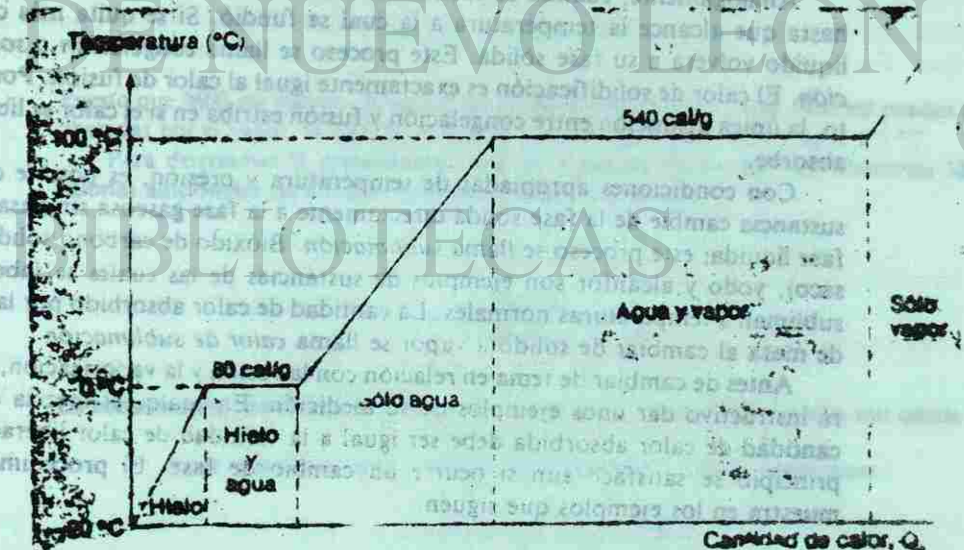


Fig. 18-7 Variación de la temperatura al variar la energía térmica del agua.

mica. Durante el proceso de vaporización, la temperatura permanece constante. Cada gramo de agua absorbe 540 cal de energía térmica al formar 1 g de vapor de agua a 100 °C. Si el vapor de agua resultante se almacena y se continúa el calentamiento hasta que toda el agua se evapore, de nuevo la temperatura comenzará a elevarse. El calor específico del vapor es 0.48 cal/g · C°.

EJEMPLO 18-4 ¿Qué cantidad de calor se requiere para cambiar 20 lb_m de hielo a 12 °F en vapor a 212 °F?

Solución El calor necesario para elevar la temperatura del hielo a su punto de fusión es

$$Q_1 = mc\,\Delta t = (20\ lb_m)(0.5\ Btu/lb_m \cdot F°)(32\ °F - 12\ °F)$$
$$= 200\ Btu$$

El calor que se requiere para fundir el hielo se obtiene mediante la ecuación (18-9).

$$Q_2 = mL_f = (20\ lb_m)(144\ Btu/lb_m) = 2880\ Btu$$

El calor necesario para elevar la temperatura del agua resultante a 212 °F es

$$Q_3 = mc\,\Delta t = (20\ lb_m)(1\ Btu/lb_m \cdot F°)(212\ °F - 32\ °F)$$
$$= 3600\ Btu$$

El calor que se requiere para vaporizar el agua es, de la ecuación (18-10)

$$Q_4 = mL_v = (20\ lb_m)(970\ Btu/lb_m) = 19\,400\ Btu$$

El calor total necesario es

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$
$$= (200 + 2880 + 3600 + 19\,400)\ Btu$$
$$= 26\,080\ Btu$$

Cuando se quita calor de un gas, su temperatura cae hasta que alcanza la temperatura a la cual hierve. A medida que el calor se quita, el vapor regresa a su fase líquida. Este proceso se denomina *condensación*, en el cual un vapor cede cierta cantidad de calor equivalente al requerido para vaporizarlo. Por lo tanto, el *calor de condensación* es equivalente al calor de vaporización. La diferencia estriba solamente en la dirección de la transferencia de calor.

Análogamente, cuando se sustrae calor de un líquido, su temperatura caerá hasta que alcance la temperatura a la cual se fundió. Si se quita más calor, el líquido volverá a su fase sólida. Este proceso se llama *congelación* o *solidificación*. El calor de solidificación es exactamente igual al calor de fusión. Por lo tanto, la única distinción entre congelación y fusión estriba en si el calor se libera o se absorbe.

Con condiciones apropiadas de temperatura y presión, es posible que una sustancia cambie de la fase sólida directamente a la fase gaseosa sin pasar por la fase líquida; este proceso se llama *sublimación*. Bióxido de carbono sólido (hielo seco), yodo y alcanfor son ejemplos de sustancias de las cuales se sabe que se subliman a temperaturas normales. La cantidad de calor absorbido por la unidad de masa al cambiar de sólido a vapor se llama *calor de sublimación*.

Antes de cambiar de tema en relación con la fusión y la vaporización, resultará instructivo dar unos ejemplos de su medición. En cualquier mezcla dada, la cantidad de calor absorbida debe ser igual a la cantidad de calor liberada. Este principio se satisface aun si ocurre un cambio de fase. El procedimiento se muestra en los ejemplos que siguen.

EJEMPLO 18-5 Después de que 12 g de hielo comprimido a −10 °C se colocan en un vaso de aluminio de 50 g de un calorímetro que contiene 100 g de agua a 50 °C, se sella el sistema y se permite que se restablezca el equilibrio térmico. ¿Cuál es la temperatura resultante?

Solución El calor que pierden el calorímetro y el agua debe ser igual al calor que gana el hielo, incluyendo cualquier cambio de fase que tenga lugar. Supóngase que todo el hielo se funde, quedando sólo agua a la temperatura de equilibrio t_e.

Pérdida de calor total = pérdida de calor por el calorímetro + calor perdido por el agua

$$= m_c c_c(50\ °C - t_e) + m_w c_w(50\ °C - t_e)$$
$$= (50)(0.22)(50\ °C - t_e) + (100)(1)(50\ °C - t_e)$$
$$= 550\ °C - 11t_e + 5000\ °C - 100t_e$$
$$= 5550\ °C - 111t_e$$

Calor ganado =
calor ganado por el hielo + calor para fundir el hielo + calor para llevar el agua a t_e

$$= m_i c_i\,\Delta t_i + m_i L_f + m_i c_w(t_e - 0\ °C)$$
$$= (12)(0.5)(10) + (12)(80) + (12)(1)t_e$$
$$= 1020 + 12t_e$$

Calor total perdido = calor total ganado

$$5550 - 111t_e = 1020 + 12t_e$$
$$123t_e = 4530$$
$$t_e = 36.8\ °C$$

EJEMPLO 18-6 Si 10 g de vapor a 100 °C se introducen en una mezcla de 200 g de agua y 120 g de hielo, encuéntrese la temperatura final y la composición de la mezcla.

Solución La pequeña cantidad de vapor en comparación con el hielo y el agua sugiere que, si hay el suficiente calor, puede liberarse por el vapor para fundir todo el hielo. Para verificar esta conjetura, se calculará el calor necesario para fundir completamente los 120 g de hielo a 0 °C.

$$Q_1 = m_i L_f = (120\ g)(80\ cal/g) = 9600\ cal$$

El calor máximo que puede esperarse que suministre el vapor es

$$Q_2 = m_s L_v + m_s c_w(100\ °C - 0\ °C)$$
$$= (10)(540) + (10)(1)(100) = 6400\ cal$$

Puesto que 9600 cal fueron necesarias para fundir todo el hielo y sólo 6400 cal pueden ser liberadas por el vapor, la mezcla final debe estar formada por hielo y agua a 0 °C.

Para determinar la composición final de la mezcla nótese que son necesarias 3200 calorías adicionales para fundir el hielo restante. Por tanto,

$$m_i L_f = 3200\ cal$$
$$m_i = \frac{3200\ cal}{80\ cal/g} = 40\ g$$

En consecuencia habrá 40 g de hielo en la mezcla final. La cantidad de agua que queda es

Agua restante = agua inicial + hielo fundido + vapor condensado

$$= 200\ g + 80\ g + 10\ g = 290\ g$$

La composición final consiste en una mezcla de 40 g de hielo en 290 g de agua a 0 °C.

Supóngase en el ejemplo anterior que todo el hielo fuera fundido, intentando resolver para t, como en el ejemplo 18-5. En este caso, se hubiera obtenido un valor para la temperatura de equilibrio, la cual se encontraría debajo del punto de congelación (0 °C). Es evidente que este tipo de respuesta sólo podría ser el resultado de una suposición falsa.

Un procedimiento opcional para encontrar el resultado en el ejemplo 18-6 sería resolver directamente para el número de gramos de hielo que deben haberse fundido a fin de equilibrar las 6400 cal de la energía térmica liberada por el vapor. Se deja como ejercicio demostrar que se obtienen los mismos resultados.

CALOR DE COMBUSTIÓN

Siempre que una sustancia se quema, libera una cantidad definida de calor. La cantidad de calor por unidad de masa o por unidad de volumen cuando la sustancia se quema completamente se llama *calor de combustión*. Las unidades que comúnmente se emplean son Btu por libra masa, Btu por pie cúbico, calorías por gramo, y kilocalorías por metro cúbico. Por ejemplo, el calor de combustión del carbón mineral es aproximadamente 13 000 Btu/lb_m. Esto significa que cada libra de carbón cuando se quema por completo debe liberar 13 000 Btu de energía térmica.

* RESUMEN *

En este capítulo se ha estudiado la cantidad de calor como una cantidad medible que se basa en un cambio estándar. La unidad térmica británica y la caloría son medidas del calor requerido para elevar un grado la temperatura de una unidad de masa de agua. Al aplicar estas unidades estándar a experimentos con una gran variedad de materiales, se ha aprendido a predecir las pérdidas o ganancias de calor de manera constructiva. Los conceptos esenciales presentados en este capítulo son los siguientes:

- **La unidad térmica británica** (Btu) es el calor requerido para cambiar la temperatura de una libra-masa de agua un grado Fahrenheit.
- **La caloría** es el calor requerido para elevar la temperatura de un gramo de agua un grado Celsius.
- Pueden ser útiles varios factores de conversión para resolver problemas que incluyan energía térmica:

$$1\ \text{Btu} = 252\ \text{cal} = 0.252\ \text{Kcal} \qquad 1\ \text{cal} = 4.186\ \text{Joule}$$

$$1\ \text{Btu} = 778\ \text{ft}\cdot\text{lb} \qquad 1\ \text{Kcal} = 4186\ \text{Joule}$$

- **La capacidad calorífica específica** se emplea para determinar la cantidad de calor Q absorbida o cedida por una masa unitaria m conforme la temperatura cambia en un nivel intervalo Δt.

$$c = \frac{Q}{m\,\Delta t} \qquad Q = mc\Delta t \qquad \text{Capacidad calorífica específica}$$

- **La conservación de la energía térmica** requiere que en cualquier intercambio de energía térmica el calor perdido iguales al calor ganado.

Calor perdido = calor ganado $\quad \sum(mc\Delta t)\text{perdido} = \sum(mc\Delta t)\text{ganado}$

Como un ejemplo, supóngase que un cuerpo 1 transfiere calor a los cuerpos 2 y 3, conforme el sistema alcanza una temperatura de equilibrio t_e:

$$m_1c_1(t_1-t_e) = m_2c_2(t_e-t_2) + m_3c_3(t_e-t_3)$$

- **El calor latente de fusión** L_f y el calor latente de evaporación L_v son pérdidas o ganancias de calor por unidad de masa m durante un cambio de fase. No hay cambio en la temperatura.

$$L_f = \frac{Q}{m} \qquad Q = mL_f \qquad \text{Calor latente de fusión}$$

* PREGUNTAS *

1. Defínanse los siguientes términos:

a) Calor
b) Temperatura
c) Caloría
d) Unidad térmica británica
e) Equivalente mecánico del calor
f) Capacidad calorífica
g) Capacidad calorífica específica
h) Conservación de la energía térmica
i) Calorímetro
j) Equivalente del agua
k) Fusión
l) Punto de fusión
m) Calor de fusión
n) Vaporización
o) Punto de ebullición
p) Calor de vaporización
q) Condensación
r) Congelación
s) Sublimación
t) Calor de combustión

2. Cubos de cinco metales diferentes -aluminio, cobre, zinc, hierro y plomo- se construyen con las mismas masas y áreas de sección transversal. Cada uno de los cubos se calienta a una temperatura de 100°C y se colocan sobre un cubo de hielo. ¿Cuál fundirá al hielo a mayor profundidad? Hágase una lista de los cuatro metales restantes en orden de profundidades de penetración decrecientes.

3. En un día de invierno se observa que la nieve se funde en la orilla de la acera de concreto antes que en el arroyo de la calle. ¿Cuál tiene la mayor capacidad calorífica?

4. Si dos objetos tienen la misma capacidad calorífica, ¿es necesario que estén construidos del mismo material? ¿Qué pasa si tienen las mismas capacidades caloríficas especiales?

5. El equivalente mecánico del calor establece que éste y el trabajo pueden expresarse con las mismas unidades. ¿Cómo pueden distinguirse los términos trabajo y calor?

6. Analícense los cambios de fase de sólido a líquido y a vapor en términos de la teoría molecular de la materia.

7. En una mezcla de hielo y agua, la temperatura de ambos es 0°C. Entonces, ¿por qué el hielo se siente más frío cuando se toca?

8. ¿Por qué el vapor a 100°C produce una quemadura más grave que el agua a 100°C?

9. La temperatura de 1 g de hierro se eleva en 1°C. ¿Cuánto calor adicional será necesario para elevar la temperatura de 1 lb_m de hierro 1°F?

* PROBLEMAS *

1. ¿Qué cantidad de calorías se requiere para elevar la temperatura de 200 g de plomo desde 20° a 100°C? ¿Desde 40° a 90°F?

Respuesta 496 cal, 172 cal.

2. ¿Qué cantidad de calor es liberado cuando 40 lb_m de cobre se enfrían de 78° a 32°F?

3. Una segadora trabaja con una potencia de 7 hp. ¿Qué cantidad equivalente de energía térmica proporcionará la máquina en 1h?

Respuesta 1.78×10^4 Btu.

4. La potencia de salida mecánica de un motor eléctrico es 2 kW. Esta representa el 80% de la energía eléctrica de entrada por segundo; el resto se pierde en forma de calor. Exprésese esta pérdida en kilocalorías por segundo.

5. Una cascada tiene una altura de 500 ft. Si toda la energía potencial que se pierde en la caída se convierte en calor, ¿a qué temperatura se elevará el agua?

Respuesta 0.643°F.

6. ¿Cuánto calor desarrollarán los frenos de un automóvil [illegible] a fin de detenerlo completamente si va a la velocidad de [illegible]

7. Se sirve café caliente en una taza de cerámica de 0.[illegible] Kg con un calor específico de 0.21 cal/g·°C. ¿Qué cantidad de calor absorbe la taza si su temperatura se incremente de 78 a 178°F?

Respuesta 5.83 Kcal

8. Cuando se aplican 450 cal de calor a una esfera de latón, su temperatura se incrementa de 20 a 70°C. ¿Cuál es la masa de la esfera?

9. Un casquillo de cobre de 4 lb debe ser calentado de 70 a 250°F, de tal manera que se expanda lo suficiente para deslizarse por un eje. ¿Cuánto calor se necesita?

Respuesta 67.0 Btu.

10. En un tratamiento térmico, una pieza caliente de cobre es enfriada rápidamente en agua (templada). Si la temperatura de la pieza cae de 400 a 30°C y la pieza pierde 80 Kcal de calor, ¿cuál es la masa de la pieza de cobre?

11. Una fundición tiene un horno eléctrico capaz de fundir 540 Kg de cobre. Si la temperatura del cobre era inicialmente de 20°C, ¿cuánto calor se requerirá?

Respuesta 75,900 Kcal.

12. ¿Cuánto calor se necesita para fundir 20 g de plata a su temperatura de fusión?

13. Un elemento calefactor proporciona calor a razón de 20 Kcal por minuto. ¿Cuánto tiempo se requiere para fundir completamente un bloque de 3 Kg de aluminio?

Respuesta 11.5 min.

14. ¿Cuánto calor absorve un congelador eléctrico al bajar la temperatura de 1900 g de agua, de 80 a 10°C?

15. Un cilindro de plomo de 450 g se calienta a 100°C y se deja caer en un calorímetro de cobre de 50 g de masa. El calorímetro contiene inicialmente 100 g de agua a 10°C. Encuéntrese el calor específico del plomo si la temperatura de equilibrio de la mezcla es 21.1°C.

Respuesta 0.033 cal/g·°C.

16. ¿Cuánto hierro (a 212°F) debe mezclarse con 10 lb_m de agua a 68°F de tal modo que la temperatura de equilibrio sea 100°F?

17. Un obrero necesita conocer la temperatura interna de un horno. Saca una barra de hierro de 2 lb_m del horno y la coloca en un recipiente de aluminio de 1 lb_m parcialmente lleno con 2 lb_m de agua. Si la temperatura del agua se eleva de 21 a 50°C, ¿cuál es la temperatura del horno?

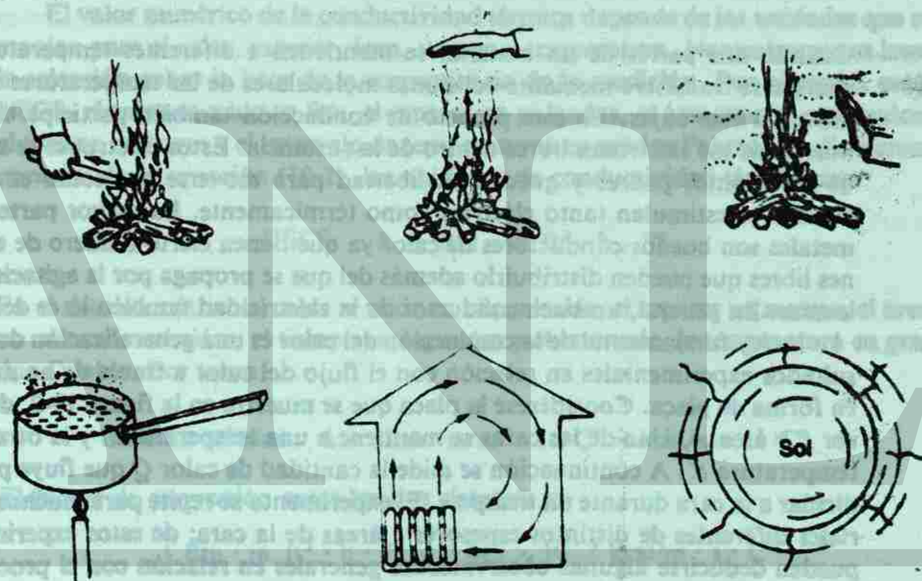
Respuesta 292°C.

Transferencia de calor

Se ha definido al calor como una forma de energía en tránsito. Siempre que exista una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos o entre dos porciones de un mismo cuerpo, se dice que el calor *fluye* en una dirección de mayor a menor temperatura. Hay tres métodos fundamentales mediante los cuales ocurre este intercambio de calor: *conducción, convección* y *radiación*. Ejemplos de los tres métodos se muestran en la figura 19-1.

[M]ÉTODOS DE [TR]ANSFE-[R]ENCIA DE [C]ALOR

La mayor parte de lo que se ha estudiado incluye transferencia o transmisión de calor por conducción, es decir, mediante colisiones moleculares entre moléculas vecinas. Por ejemplo, si se sostiene un extremo de una barra de hierro sobre el fuego, finalmente el calor alcanzará a transmitirse a la mano por medio del proceso de conducción. La actividad molecular incrementada en el extremo caliente se



[F]ig. 19-1 Los [p]rincipales métodos [d]e transferencia de [c]alor: *a)* conducción, [*b*)] convección y [*c*)] radiación.

transmite de una molécula a la otra hasta que alcanza la mano. El proceso continuará en tanto exista una diferencia de temperaturas a lo largo de la barra.

> **Conducción** es el proceso en el que la energía térmica se transfiere por colisiones moleculares adyacentes a través del medio material. El medio en sí no se mueve.

Probablemente la aplicación más común del principio de conducción es cocinar. Por otro lado, si se coloca la mano encima del fuego, como se muestra en la figura 19-1*b* la transferencia de calor se puede sentir en el aire caliente que sube. Este proceso se llama convección, y difiere del proceso de conducción en el cual el material se mueve. El calor se transfiere al moverse las masas en lugar de pasar a lo largo del medio material mediante las moléculas vecinas.

> **Convección** es el proceso en el cual el calor se transfiere mediante el movimiento real de un fluido.

Las corrientes de convección son la base del sistema de calefacción y enfriamiento de la mayor parte de las casas.

Cuando se sostiene la mano cerca del fuego, la fuente primaria de calor es la *radiación térmica*. La radiación implica la emisión o absorción de ondas electromagnéticas que se originan a nivel atómico. Estas ondas se propagan con la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) y no hay necesidad de un medio material para que se propaguen.

Radiación es el proceso por el cual el calor se transfiere en forma de ondas electromagnéticas.

La fuente de energía radiante más obvia es el Sol. Ni el proceso de conducción ni el de convección tienen lugar en la transferencia de energía térmica a través del espacio hacia la Tierra.

La enorme energía térmica que se recibe en la Tierra se transfiere por radiación electromagnética. En donde se tiene un medio material, empero, la transferencia de calor debida a la radiación en general es muy pequeña si se compara con la transferencia por conducción y convección.

Desafortunadamente hay muchos factores que afectan la transferencia de energía térmica por los tres métodos. El cálculo de la cantidad de energía térmica que se transfiere en determinado proceso es muy complicado. Las relaciones que se estudian en las secciones siguientes se basan en observaciones empíricas y dependen de condiciones ideales. El grado con el cual estas condiciones se satisfagan, en general, determina la exactitud de las predicciones.

CONDUCCIÓN

Cuando dos partes de un material se mantienen a diferentes temperaturas, la energía se transfiere mediante colisiones moleculares de las temperaturas más altas a las más bajas. En este proceso de conducción también participa el movimiento de los electrones libres dentro de la sustancia. Estos electrones se separan de sus átomos padres y quedan en libertad para moverse de átomo en átomo cuando se estimulan tanto eléctrica como térmicamente. La mayor parte de los metales son buenos conductores de calor ya que tienen cierto número de electrones libres que pueden distribuirlo además del que se propaga por la agitación molecular. En general, un buen conductor de la electricidad también lo es del calor.

La ley fundamental de la conducción del calor es una generalización de los resultados experimentales en relación con el flujo del calor a través de un material en forma de placa. Considérese la placa que se muestra en la figura 19-2, de espesor L y área A. Una de las caras se mantiene a una temperatura t y la otra a una temperatura t'. A continuación se mide la cantidad de calor Q que fluye perpendicular a la cara durante un tiempo τ. El experimento se repite para muchos materiales diferentes de distintos espesores y áreas de la cara; de estos experimentos pueden deducirse algunas observaciones generales en relación con el proceso de conducción de calor:

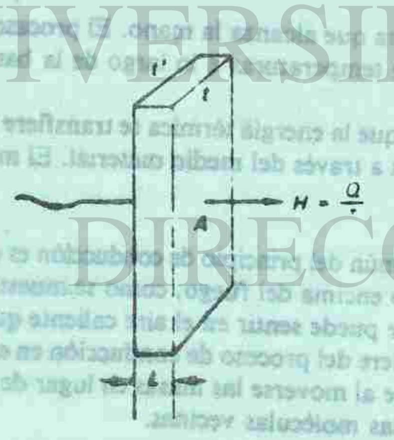


Fig. 19-2 Medición de la conductividad térmica.

1. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas ($\Delta t = t' - t$) entre las dos caras.
2. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es directamente proporcional al área A de la placa.
3. La cantidad de calor que se transfiere por unidad de tiempo es inversamente proporcional al espesor L de la placa.

Estos resultados anteriores pueden expresarse en forma de ecuación al introducir una constante de proporcionalidad k, que se escribe

$$\boxed{H = \frac{Q}{\tau} = kA\,\frac{\Delta t}{L}} \qquad (19\text{-}1)$$

en donde H representa la velocidad con la cual se transfiere el calor. Aunque esta ecuación se estableció para un material en forma de placa, también se cumple para una barra de sección transversal A y longitud L.

La constante de proporcionalidad k es una propiedad del material que se llama *conductividad térmica*. De la ecuación, puede observarse que las sustancias con alta conductividad térmica son buenos conductores del calor, en tanto que las sustancias de baja conductivdad son malos conductores o *aisladores*.

La conductividad térmica de una sustancia es una medida de su capacidad para conducir calor y se define mediante la relación

$$k = \frac{QL}{A\tau\,\Delta t} \qquad (19\text{-}2)$$

El valor numérico de la conductividad térmica depende de las unidades que se escojan para el calor, espesor, área, tiempo y temperatura. Normalmente se hace la selección sobre la base de la conveniencia de la medición. Por ejemplo, en el USCS, el calor se mide en Btu, el espesor en pulgadas, el área en pies cuadrados, el tiempo en horas y el intervalo de temperaturas en grados Fahrenheit. En consecuencia, de la ecuación (19-2), las unidades de conductividad térmica son

$$\text{USCS:}\quad k = \text{Btu}\cdot\text{in/ft}^2\cdot\text{h}\cdot\text{F°}$$

En el sistema métrico el calor se mide en kilocalorías, el espesor en metros, el área en metros cuadrados, el tiempo en segundos y el intervalo de temperatura en grados Celsius. Por tanto,

$$\text{Sistema métrico:}\quad k = \text{kcal}\cdot\text{m/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{C°} = \text{kcal/m}\cdot\text{s}\cdot\text{C°}$$

El factor de conversión entre los dos sistemas es

$$1\ \text{Btu}\cdot\text{in. ft}^2\cdot\text{h}\cdot\text{F} = 3.445\times10^{-5}\ \text{kcal/m}\cdot\text{s}\cdot\text{C°}$$

Tabla 19-1 Conductividades térmicas

	k	
Sustancia	Btu · in. ft² · h · F	kcal m · s · C
Aluminio	1451	5.0×10^{-2}
Latón	750	2.6×10^{-2}
Cobre	2660	9.2×10^{-2}
Plata	2870	9.9×10^{-2}
Acero	320	1.1×10^{-2}
Asbesto	4.0	1.4×10^{-4}
Ladrillo	5.0	1.7×10^{-4}
Concreto	12.0	4.1×10^{-4}
Corcho	0.3	1.0×10^{-5}
Vidrio	7.3	2.5×10^{-4}
Aire	0.16	5.3×10^{-6}
Agua	4.15	1.4×10^{-4}

En la tabla 19-1 se da una lista de las conductividades térmicas para diversos materiales.

EJEMPLO 19-1 La pared exterior de un horno de ladrillos tiene un espesor de 3 in. La superficie interior está a una temperatura de 300 °F y la exterior está a 85 °F. ¿Cuánto calor se pierde a través de un área de 1 ft², en una hora?

Solución De la ecuación (19-1), al resolverse para Q, se obtiene

$$Q = kA\tau\frac{\Delta t}{L}$$

$$= (5\ \text{Btu}\cdot\text{in}/\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot{}^\circ\text{F})(1\ \text{ft}^2)(1\ \text{h})\frac{300\,^\circ\text{F} - 85\,^\circ\text{F}}{3\ \text{in}}$$

$$= 358\ \text{Btu}$$

Siempre es conveniente conservar las unidades de cada cantidad a lo largo de la resolución del problema. Esta práctica evitará muchos errores innecesarios. Por ejemplo, en algunas ocasiones es fácil olvidar que en las unidades del USCS el espesor debe expresarse en pulgadas y el área en pies cuadrados. Si las unidades de la conductividad térmica se dan con su valor numérico en la ecuación, estos errores no ocurrirán.

Cuando dos materiales de diferentes conductividades térmicas y secciones transversales semejantes se ponen en contacto, la velocidad de conducción del calor a través de cada material debe ser constante. Si no hay ni fuentes ni sumideros de energía térmica dentro de los materiales, y los puntos extremos se mantienen a una temperatura constante, se logrará al final un flujo estacionario. El calor no puede "crearse" ni "destruirse" en cualquier punto.

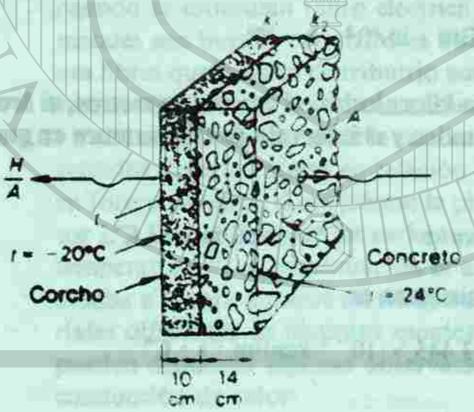


Fig. 19-3 Conducción de calor a través de una pared compuesta.

EJEMPLO 19-2 La pared de una planta congeladora se compone de 10 cm de espesor de corcho y de 14 cm de espesor de concreto sólido (Fig. 19-3). *a)* Si la temperatura de la pared interna del panel de corcho es −20 °C y de 24 °C la externa, encuéntrese la temperatura de la entrecara corcho-concreto. *b)* Calcúlese el flujo de calor en calorías por centímetro cuadrado por segundo.

Solución a) Para un flujo estacionario, la velocidad del flujo de calor a través del corcho es igual a la velocidad del flujo de calor a través del concreto. Se usará el subíndice 1 para referirse al corcho y el subíndice 2 para el concreto. Por tanto, si t_1 es la temperatura en la entrecara, se tiene

$$\frac{H}{A}\ (\text{corcho}) = \frac{H}{A}\ (\text{concreto})$$

$$\frac{[illegible]}{0.10\ \text{m}} = \frac{[illegible]}{0.14\ \text{m}}$$

si ahora se multiplica por 1.4×10^4 se obtiene

$$1.4(t_1 + 20) = 41(24 - t_1)$$

$$1.4t_1 + 28 = 984 - 41t_1$$

$$t_1 = 22.5\ \text{C}$$

Solución b) El flujo de calor por unidad de área por unidad de tiempo puede obtenerse de

$$\frac{H_1}{A} = \frac{k_1(t_1 + 20\,\text{C})}{0.10\ \text{m}}$$

$$= \frac{(1 \times 10^{-5}\ \text{kcal}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{C}^\circ)(22.5 + 20)\ \text{C}^\circ}{0.10\ \text{m}}$$

$$= 4.25 \times 10^{-3}\ \text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$$

La misma velocidad a través del concreto podría ser calculada. Obsérvese que la diferencia de temperatura entre los puntos extremos del corcho es 42.5 °C mientras que la diferencia entre las temperaturas en el concreto es únicamente 1.5 C°. Esta marcada diferencia entre los intervalos de temperatura tiene su origen en las diferentes conductividades térmicas de las paredes.

* RESUMEN *

El calor es la transferencia de energía térmica de un lugar a otro. Se ha visto que la rapidez de transferencia por conducción, convección y radiación puede ser predicha a partir de fórmulas experimentales. Los efectos del material, la superficie de las áreas y las diferencias de temperatura deben ser comprendidos para gran número de aplicaciones industriales de la transferencia de calor. Los conceptos más importantes presentados en este capítulo son:

- En la transferencia de calor por conducción, la cantidad de calor Q transferida por unidad de tiempo t a través de una pared o rodillo de longitud L es dada por

$$H = \frac{Q}{t} = kA\frac{\Delta t}{L} \qquad \text{Conducción}$$

Unidades métricas: Kcal/s
Unidades USCS: Btu/h

donde A es el área y Δt es la diferencia en temperaturas de superficie. De esta relación, la conductividad térmica es:

$$k = \frac{QL}{At\,\Delta t}$$

Unidades métricas: Kcal/m·s·°C
Unidades USCS: Btu·in/ft²·h·°F

* PREGUNTAS *

1. Defínanse los siguientes términos:

a) Conducción.
b) Conductividad térmica.
c) Convección natural.
d) Convección forzada.
e) Coeficiente de convección.
f) Radiación térmica.
g) Cuerpo negro.
h) Absorbancia.
i) Ley de Stefan-Boltzmann
j) Constante de Stefan.
k) Ley de Prevost.

2. Analícese el frasco al vacío y explíquese cómo éste minimiza la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

3. ¿Qué determina la dirección de la transferencia de calor?

4. Un recipiente con agua se coloca sobre un quemador de gas en una estufa de cocina hasta que el agua hierve vigorosamente. Analícese la transferencia de calor que se produce. ¿Cómo se explicaría el hecho de que las burbujas que se forman en el agua suben a la superficie en forma de una pirámide en lugar de elevarse directamente hacia aquélla?

5. Al colocar una llama debajo de una copa de papel llena con agua es posible hervir el agua sin que se queme el fondo de la copa. Explíquese.

6. Cuando un pedazo de papel envuelve un trozo de madera y el sistema se calienta con una llama, el papel comienza a quemarse. Pero si el papel envuelve fuertemente a una barra de cobre y se calienta de las misma manera, no se quema. ¿Por qué?

7. En un día muy frío un pedazo de hierro se siente más frío al tocarlo que un pedazo de madera. Explíquese.

8. Distíngase entre conductividad térmica y calor específico en relación con la transferencia de calor.

9. Si se desea diseñar una casa para obtener una máxima comodidad tanto en el verano como en el invierno, ¿se preferiría un techo claro o uno oscuro? Explíquese.

10. Cuando un líquido se calienta en un recipiente de vidrio refractario, una gasa dealambre se coloca generalmente entre la llama y el fondo del recipiente. ¿Por qué es una práctica inteligente?

*** PROBLEMAS ***

1. El fondo de una cacerola de metal tiene una área de 86 cm^2. La cacerola está llena de agua que hierve (100°C) y está colocada encima de un tablero de corcho de 3 mm de espesor. La cubierta de la mesa de fórmica, bajo el tablero de corcho, mantiene una temperatura constante de 20°C. ¿Cuánto calor se conduce a través del corcho en 2 min?

   Respuesta 0.165 Kcal.

2. Una placa de acero tiene una sección transversal de 600 cm^2. Un lado está a 170°C y el otro a 120°C. Si el acero tiene un espesor de 20 mm, ¿cuál es la rapidez de transferencia de calor en kilocalorías por segundo?

3. El vidrio de una ventana tiene 1/8 in de espesor, 3 ft de longitud y 2 ft de altura. ¿Cuánto calor conduce el vidrio en 1 día, si las temperaturas de las superficies son 48 y 45°F?

   Respuesta 2.52×10^4 Btu.

4. ¿Cuánto calor se perderá en 12 h por conducción a través de 1 ladrillo de 3 in, si una de sus caras está a 300°F y la otra a 78°F? El área de la pared es 10 ft^2.

5. Un extremo de una barra de hierro de 30 cm de longitud y 4 cm^2 de sección transversal se coloca en un baño de hielo y agua. El otro extremo se coloca en un baño de vapor. ¿Cuántos minutos serán necesarios para transferir 1.0 Kcal de energía térmica? ¿En qué dirección fluye el calor?

   Respuesta 11.4 min, hacia el baño de hielo.

6. Una pared sólida de concreto tiene 80 ft de altura, 100 ft de ancho y 6 in de espesor. La temperatura de uno de sus lados es 30°F y la del otro en 100°F. ¿Cuántos minutos transcurrirán para que 400,000 Btu se calor se transfieran por conducción?

7. El fondo de un recipiente de aluminio tiene un espesor de 3 mm y un área de 120 cm^2. ¿Cuántas calorías por minuto pasan a través (conducción) del fondo del recipiente si la temperatura de la superficie exterior es 114°C y la del inferior 117°C?

   Respuesta 36 Kcal.

8. ¿Qué espesor de cobre se requiere para tener el mismo valor de aislamiento que 2 in de corcho? ¿Qué espesores de aluminio y latón se requerirán?

9. El vidrio de una ventana de un edificio de oficinas mide 2 X 6 m y tiene un espesor de 1.2 cm. Cuando la superficie exterior está a una temperatura de 23°C y la superficie interior a 25°C, ¿cuánto calor se transfiere por el vidrio en 1 h?

   Respuesta 1.8×10^3 Kcal.

10. Una hielera de madera con un espesor de 4 cm tiene un área total eficaz de 2 m^2. ¿Cuántos gramos de hielo se fundirán en 1 min si la temperatura del interior es 4°C y la temperatura del exterior es 26°C? ($k = 2.5 \times 10^{-3}$ Kcal/m·s·°C).

Termodinámica

La termodinámica trata acerca de la transformación de energía térmica en energía mecánica y el proceso inverso, la conversión de trabajo en calor. Puesto que casi toda la energía disponible de la materia prima se libera en forma de calor, resulta fácil advertir por qué la termodinámica juega un papel tan importante en la ciencia y la tecnología.

En este capítulo se estudiarán dos leyes básicas que deben obedecerse cuando se utiliza energía térmica para realizar trabajo. La primera ley es simplemente volver a postular el principio de la conservación de la energía. La segunda ley impone restricciones sobre el uso eficiente de la energía disponible.

CALOR Y TRABAJO

Se ha establecido con claridad la equivalencia del calor y el trabajo como dos formas de energía. La teoría del calórico fue desechada por Rumford al demostrar que es posible obtener calor indefinidamente de un sistema en tanto se suministre

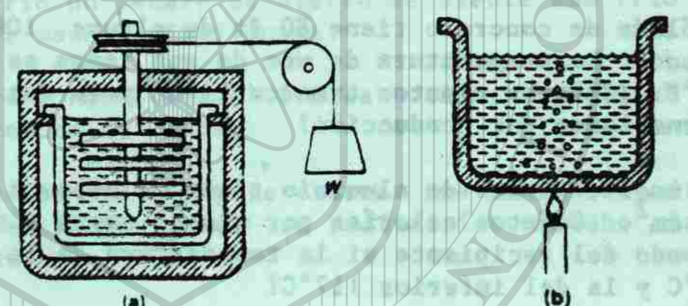


Figura 21-1 Incremento de la energía interna de un sistema por medio de *a)* trabajo mecánico efectuado sobre el sistema; *b)* suministrando calor al sistema.

trabajo externo. Joule cerró el caso al demostrar experimentalmente el equivalente mecánico del calor.

El trabajo, al igual que el calor, implica una transferencia de energía; empero, hay una distinción muy importante entre ambos términos. En mecánica se define el trabajo como una cantidad escalar, igual en magnitud al producto de la fuerza por el desplazamiento. La temperatura no juega ningún papel en esta definición. El calor, por otro lado, es la energía que fluye desde un cuerpo hasta otro debido a una diferencia en temperatura. Esta última es una condición necesaria para que se lleve a cabo la transferencia de calor, de la misma forma que el desplazamiento es la condición necesaria para que se realice trabajo.

El punto principal en este estudio es reconocer que tanto el calor como el trabajo representan cambios, los cuales ocurren en un proceso dado y generalmente acompañados de un cambio en la energía interna. Considérense las dos situaciones que se muestran en la figura 21-1. En la figura 21-1*a* la energía interna del agua aumenta al efectuar un trabajo mecánico. En la figura 21-1*b* la energía interna del agua aumenta debido a un flujo de calor.

PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La *primera ley de la termodinámica* es simplemente repostular el principio de la *conservación de la energía*:

> *La energía no puede crearse ni destruirse, sólo transformarse de una forma a otra.*

Al aplicar esta ley a un proceso termodinámico, de la ecuación (21-1) se nota que

$$\boxed{\Delta Q = \Delta W + \Delta U} \qquad (21\text{-}2)$$

Esta ecuación representa el postulado matemático de la *primera ley de la termodinámica* que puede enunciarse como sigue:

> *En cualquier proceso termodinámico, el calor neto absorbido por un sistema es igual a la suma del equivalente térmico del trabajo realizado por él y el cambio en su energía interna.*

EJEMPLO 21-1 En cierto proceso, un sistema absorbe 400 cal de calor y al mismo tiempo efectúa un trabajo de 80 J sobre sus alrededores. ¿Cuál es el aumento de la energía interna del sistema?

Solución Aplicando la primera ley se obtiene

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

$$= 400 \text{ cal} - 80 \text{ J}\,\frac{1 \text{ cal}}{4.186 \text{ J}}$$

$$= 400 \text{ cal} - 19.1 \text{ cal} = 380.9 \text{ cal}$$

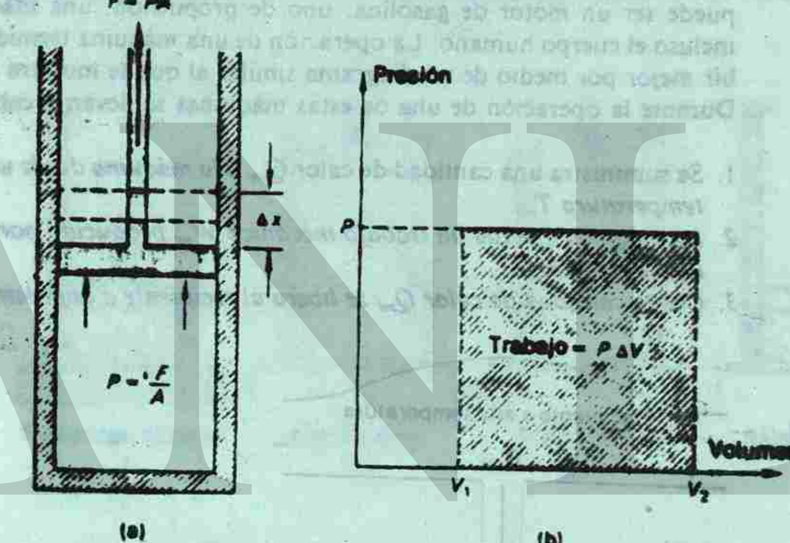


Figura 21-3 *a)* Cálculo del trabajo realizado por un gas al expandirse a presión constante. *b)* El trabajo es igual al área bajo la curva de un diagrama *P-V*.

Por tanto, las 400 cal de energía térmica de entrada se emplean para realizar 19.1 cal de trabajo, en tanto que la energía interna del sistema se incrementa en 380.9 cal. La energía se conserva.

SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Cuando se frotan las manos vigorosamente, el trabajo de rozamiento que se realiza tendrá como consecuencia un incremento en la energía interna, ocasionando que la temperatura se eleve. El aire circundante forma un gran reservorio a una temperatura menor, y la energía térmica se transfiere al aire sin que la temperatura cambie apreciablemente. Cuando se deja de frotar las manos se regresa al estado anterior. De acuerdo con la primera ley, la energía mecánica se ha transformado en calor con una eficiencia del 100%.

$$\Delta W = \Delta Q$$

Tal transformación puede continuarse indefinidamente en tanto se suministre trabajo.

Considérese el proceso inverso. ¿Será posible transformar energía térmica en trabajo mecánico con una eficiencia del 100%? En el ejemplo anterior, ¿es posible todo el calor transferido al aire y regresarlo a las manos, ocasionando que ellas se froten indefinidamente en forma espontánea? En un día frío de invierno este proceso sería beneficioso para los cazadores que tengan las manos frías. Desafortunadamente, tal proceso no puede ocurrir aun cuando no se viola la primera ley. Tampoco es posible recuperar el calor perdido al frenar un automóvil a fin de que las ruedas comiencen a rodar nuevamente.

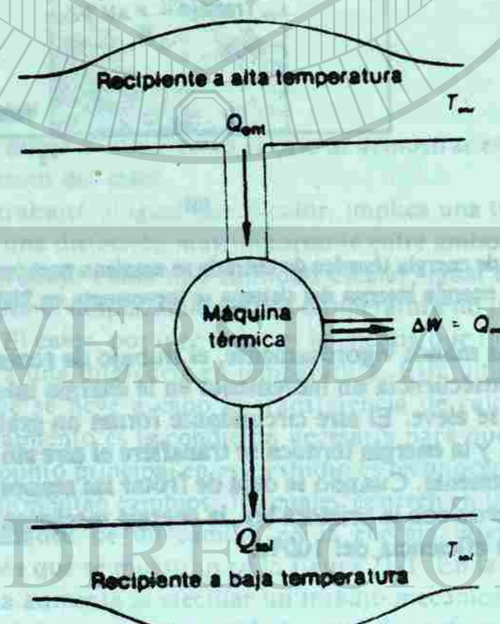
Se verá que la conversión de energía térmica en trabajo mecánico es un proceso con pérdidas. La primera ley de la termodinámica dice que no puede ganarse en un experimento tal. En otras palabras, es imposible obtener más trabajo de un sistema que el calor que se pone en el mismo. Empero, esto no excluye la posibilidad de continuar frenando. Debido a lo anterior, es evidente que se necesita otra regla que establezca que no es posible la conversión del 100% de energía térmica en trabajo útil. Esta regla es la base de la *segunda ley de la termodinámica*.

> **Segunda ley de la termodinámica:** *Es imposible construir una máquina que, si opera continuamente, no produzca otro efecto que la extracción de calor de una fuente y la realización de una cantidad equivalente de trabajo.*

Para darle más profundidad y aplicación a este principio, supóngase que se estudia la operación y eficiencia de las máquinas térmicas. Un sistema particular puede ser un motor de gasolina, uno de propulsión, una máquina de vapor e incluso el cuerpo humano. La operación de una máquina térmica se puede describir mejor por medio de un diagrama similar al que se muestra en la figura 21-9. Durante la operación de una de estas máquinas se llevan a cabo tres procesos:

1. Se suministra una cantidad de calor Q_{ent} *a la máquina desde un recipiente a alta temperatura* T_{ent}.
2. *La máquina efectúa un trabajo mecánico* W_{sal} *producido por una parte del calor de entrada.*
3. *Cierta cantidad de calor* Q_{sal} *se libera al recipiente a baja temperatura* T_{sal}.

Figura 21-9 Diagrama esquemático de una máquina térmica.



Considerando que el sistema vuelve periódicamente a su estado inicial, el cambio neto de energía interna es cero. Por tanto, la primera ley nos dice que

Trabajo de salida = calor de entrada - calor de salida

$$\boxed{W_{sal} = Q_{ent} - Q_{sal}}$$

La eficiencia de una máquina térmica se define como la razón del trabajo de salida al calor de entrada, y es comúnmente expresada como un porcentaje.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{trabajo de salida}}{\text{calor de entrada}}$$

$$\boxed{E = \frac{Q_{ent} - Q_{sal}}{Q_{ent}}} \qquad (21\text{-}8)$$

Por ejemplo, una máquina con una eficiencia de 25% ($E = 0.25$) debería absorber 1000 Btu, realizar 250 Btu de trabajo y desechar 750 Btu como pérdida de calor. Una máquina 100% eficiente es aquella en la cual todo el calor aplicado es transformado en trabajo útil. En este caso no hay pérdidas de calor hacia el medio ambiente ($Q_{sal} = 0$). Aunque dicho proceso conservará energía, viola la segunda ley de la termodinámica. La máquina más eficiente es aquella que libera la menor cantidad de calor posible al medio ambiente.

LA EFICIENCIA DE UNA MÁQUINA IDEAL

La eficiencia de una máquina real es difícil de predecir a partir de la ecuación (21-8), porque es difícil calcular las cantidades Q_{ent} y Q_{sal}. Las pérdidas por fricción y calor a través de las paredes del cilindro y alrededor del pistón, la combustión incompleta del combustible y aun las propiedades físicas de los distintos combus-

Figura 21-10 Ciclo de Carnot: *a)* expansión isotérmica, *b)* expansión adiabática, *c)* compresión isotérmica, y *d)* compresión adiabática.

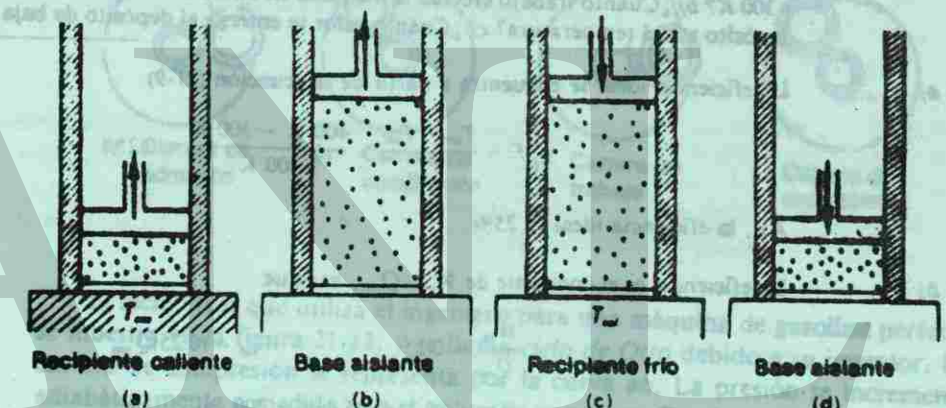
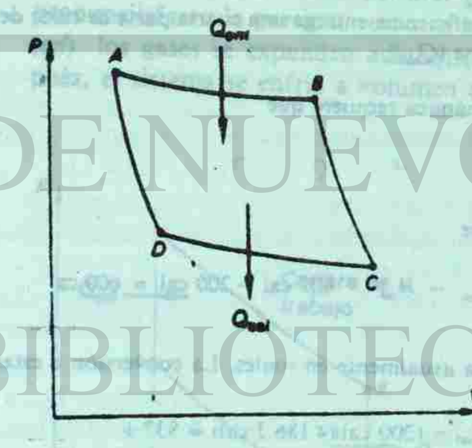


Figura 21-11 Diagrama *P-V* de un ciclo de Carnot ideal.



tibles impiden que se mida la eficiencia de dichas máquinas. No obstante, se puede imaginar una *máquina ideal* que no tenga obstáculos en lo que se refiere a dificultades prácticas. La eficiencia de dicha máquina dependerá sólo de las cantidades de calor absorbido y liberado entre dos fuentes de calor bien definidas, y no de las propiedades térmicas del combustible utilizado; en otras palabras, independientemente de los cambios internos de presión, volumen, longitud u otros factores, toda máquina ideal tiene la misma eficiencia cuando opera entre dos temperaturas iguales (T_{ent} y T_{sal}).

Una **máquina ideal** *es la que tiene la máxima eficiencia posible para los límites de temperatura dentro de los que opera.*

Si se puede definir la eficiencia de una máquina en términos de entrada y salida de temperaturas, en lugar de entrada y salida de calor, se obtendrá una fórmula más útil. Para una máquina ideal es posible demostrar que la razón Q_{ent}/Q_{sal} es la misma que la razón T_{ent}/T_{sal}. Esta prueba no está dentro de los objetivos de este texto. La eficiencia de una máquina ideal, por lo tanto, se puede expresar como una función de las temperaturas absolutas de los depósitos de entrada y salida. La ecuación (21-8) para una máquina ideal se convierte en

$$E = \frac{T_{ent} - T_{sal}}{T_{ent}} \qquad (21\text{-}9)$$

Se puede demostrar que ninguna máquina que opere entre dos temperaturas iguales puede ser más eficiente de lo que se indicaría en la ecuación (21-9). Por lo tanto, esta eficiencia ideal representa un límite superior a la eficiencia de cualquier máquina práctica. Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre dos depósitos, mayor será la eficiencia de cualquier máquina.

EJEMPLO 21-2

a) ¿Cuál es la diferencia de una máquina ideal que opera entre dos depósitos de calor a 400 y 300 *K*? *b)* ¿Cuánto trabajo efectúa la máquina en un ciclo completo si absorbe 800 cal del depósito a alta temperatura? *c)* ¿Cuánto calor se entrega al depósito de baja temperatura?

Solución a) La eficiencia ideal se encuentra a partir de la ecuación (21-9).

$$E = \frac{T_{ent} - T_{sal}}{T_{ent}} = \frac{400\ \text{K} - 300\ \text{K}}{300\ \text{K}} = 0.25$$

Así, la eficiencia ideal es 25%.

Solución b) La eficiencia es el cociente de W_{sal}/Q_{ent}, así que

$$\frac{W_{sal}}{Q_{ent}} = 0.25 \qquad \text{o} \qquad W_{sal} = (0.25)Q_{ent}$$

$$W_{sal} = (0.25)(800\ \text{cal}) = 200\ \text{cal}$$

Una máquina con un 25% de eficiencia entrega una cuarta parte de calor de entrada al trabajo útil; el resto debe perderse (Q_{sal}).

Solución c) La primera ley de la termodinámica requiere que

[illegible]

Al resolver para Q_{sal} se obtiene

$$W_{sal} = Q_{ent} - W_{sal} = 800\ \text{cal} - 200\ \text{cal} = 600\ \text{cal}$$

El trabajo de salida se expresa usualmente en joules. La conversión a estas unidades da

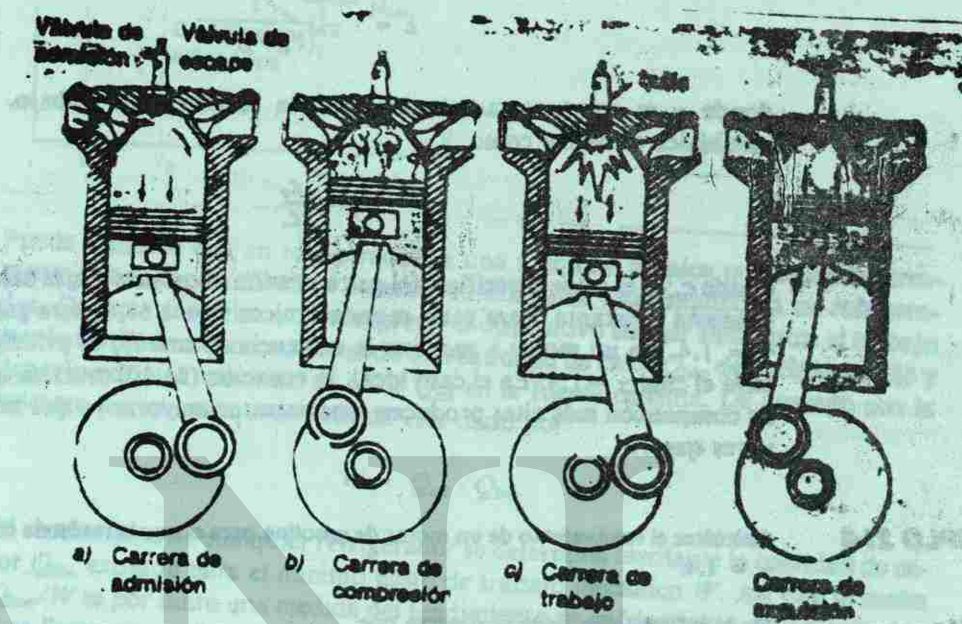
$$W_{sal} = (200\ \text{cal})(4.186\ \text{J/cal}) = 837\ \text{J}$$

MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN INTERNA

Una máquina de combustión interna genera el calor de entrada dentro de la misma. La más común de este tipo es el [illegible] gasolina [illegible] el cual una mezcla de gasolina y aire se inflama mediante una bujía en cada cilindro. La energía térmica liberada se convierte en trabajo útil por la presión que ejercen sobre el émbolo los gases en expansión. En la figura 21-12 se muestra el proceso

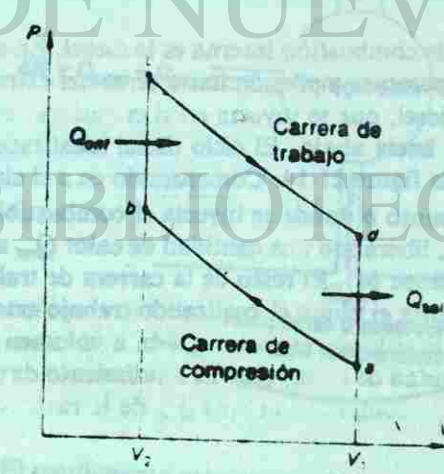
de cuatro tiempos. Durante la *carrera de admisión* (Fig. 21-12*a*) entra una mezcla de aire y vapor de gasolina al cilindro a través de la válvula de admisión. Ambas válvulas se cierran durante *la carrera de compresión* (Fig. 21-12*b*) y el pistón se mueve hacia arriba, causando una elevación de la presión. Justo antes de que el pistón llegue al extremo superior, se efectúa el encendido de la mezcla, ocasionando un cambio abrupto tanto en la temperatura como en la presión. En la *carrera de trabajo* (Fig. 21-12*c*) la fuerza de los gases en expansión impulsan al pistón hacia abajo, efectuando trabajo externo. En la carrera de expulsión (Fig. 21-12*d*), se expulsan los gases quemados fuera del cilindro a través de la válvula de escape. A continuación se repite todo el ciclo nuevamente, en tanto se suministre combustible al cilindro.

Figura 21-12 Máquina de gasolina de cuatro tiempos: *a)* admisión, *b)* compresión, *c)* trabajo, *d)* expulsión.



El ciclo ideal que utiliza el ingeniero para una máquina de gasolina perfecta se muestra en la figura 21-13, y se llama *ciclo de Otto* debido a su inventor. La carrera de compresión se representa por la curva *ab*. La presión se incrementa adiabáticamente a medida que el volumen se reduce. En el punto *b* se enciende, suministrando una cantidad de calor Q_{ent} al sistema. Esto ocasiona una elevación pronunciada en la presión, como lo indica la línea *bc*. En la carrera de trabajo (*cd*) los gases se expanden adiabáticamente efectuando trabajo externo. Después, el sistema se enfría a volumen constante hasta el punto *a*, liberando una

Figura 21-13 El ciclo de Otto para un motor de gasolina de cuatro tiempos.



cantidad de calor Q_{sal}. En la siguiente carrera los gases son expulsados cuando el émbolo se desplaza hacia arriba suministrándose más combustible en la siguiente carrera cuando el émbolo se mueve hacia abajo. Luego todo el ciclo se repite nuevamente. La razón de volúmenes V_1/V_2, como se indica en el diagrama *P-V*, se llama razón de *compresión* y es aproximadamente igual a 8 para la mayor parte de los motores de automóvil.

Puede demostrarse que el rendimiento de un ciclo de Otto ideal es

$$E = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma - 1}} \qquad (21\text{-}10)$$

donde γ es constante adiabática para la sustancia de trabajo. La constante adiabática se define como

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

donde c_p es el calor específico del gas a presión constante y c_v el calor específico a volumen constante. Para gases monoatómicos $\gamma = 1.67$, y para gases diatómicos $\gamma = 1.4$. En un motor a gasolina la sustancia de trabajo es principalmente aire, para el cual $\gamma = 1.4$. En el caso ideal, la ecuación (21-10) muestra que las razones de compresión más altas producen rendimientos mayores ya que siempre son mayores que 1.

EJEMPLO 21-3 Calcúlese el rendimiento de un motor de gasolina para el que la razón de compresión es 8 y $\gamma = 1.4$.

Solución De la información dada se observa que

$$\frac{V_1}{V_2} = 8 \qquad \text{y} \qquad \gamma - 1 = 1.4 - 1 = 0.4$$

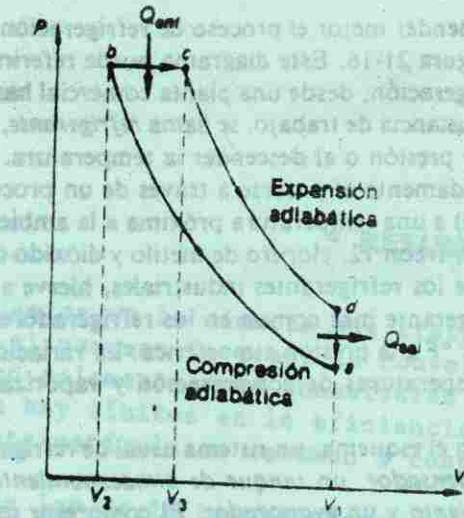
Por lo tanto, de la ecuación (21-3)

$$E = 1 - \frac{1}{8^{0.4}} = 1 - \frac{1}{2.3} = 57\%$$

En el ejemplo anterior, el 57% representa el rendimiento máximo posible de un motor de gasolina para el parámetro dado. Realmente el rendimiento de una máquina de este tipo es normalmente alrededor del 30% debido a pérdidas de calor no controladas.

Un segundo tipo de máquina de combustión interna es la diesel. En esta máquina el aire se comprime a alta temperatura y presión hasta cerca del extremo superior del cilindro. El combustible diesel, que se inyecta en el cilindro en [illegible], se enciende y empuja al émbolo hacia abajo. El ciclo diesel idealizado se muestra mediante el diagrama *P-V* en la figura 21-14. Comenzando en *a* el aire se comprime adiabáticamente hasta el punto *b* donde se inyecta el combustible diesel, que se enciende por el aire caliente, liberando una cantidad de calor Q_{ent} a una presión aproximadamente constante (línea *bc*). El resto de la carrera de trabajo consiste en una expansión adiabática hasta el punto *d*, realizando trabajo externo. Durante las carreras de admisión y expulsión, el gas se enfría a volumen constante al punto *a*, perdiéndose una cantidad de calor, Q_{sal}. El rendimiento de una máquina diesel es función de la razón de compresión (V_1/V_2) y de la razón de expansión (V_1/V_3).

Figura 21-14 Ciclo diesel ideal.



REFRIGERACIÓN

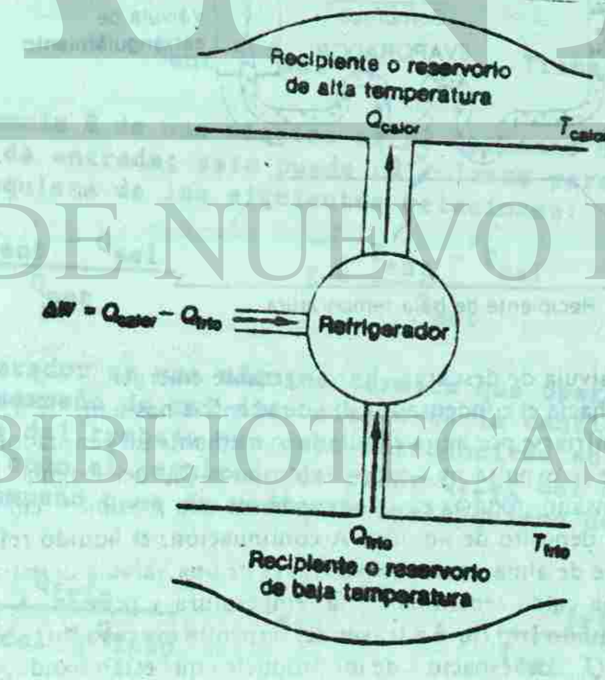
Puede pensarse que un refrigerador es una máquina térmica que opera inversamente. En la figura 21-15 se muestra un diagrama esquemático de un refrigerador. Durante cada ciclo, un compresor o dispositivo similar suministra el trabajo mecánico W al sistema, extrayendo una cantidad de calor $Q_{frío}$ del recipiente frío y depositando una cantidad de calor Q_{cal} en la fuente caliente. De acuerdo con la primera ley, el trabajo de entrada está dado por

$$W = Q_{cal} - Q_{frío}$$

El rendimiento de cualquier refrigerador se determina mediante la cantidad de calor $Q_{frío}$ extraída para el mínimo gasto de trabajo mecánico W. Así que la razón $Q_{frío}/W$ es por tanto una medida del rendimiento de enfriamiento del refrigerador y se llama su *coeficiente de funcionamiento* η. Simbólicamente,

$$\eta = \frac{Q_{frío}}{W} = \frac{Q_{frío}}{Q_{cal} - Q_{frío}}$$

Figura 21-15 Diagrama esquemático de un refrigerador.



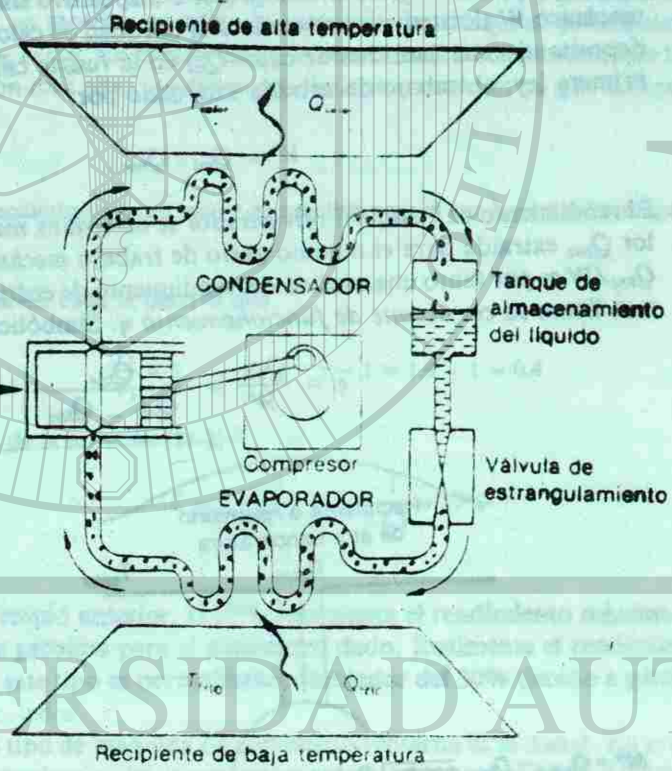
El rendimiento máximo puede expresarse en términos de temperaturas absolutas:

$$\eta = \frac{T_{frío}}{T_{cal} - T_{frío}} \qquad (21\text{-}12)$$

A fin de comprendender mejor el proceso de refrigeración, considérese el esquema general de la figura 21-16. Este diagrama puede referirse a cierto número de dispositivos de refrigeración, desde una planta comercial hasta un refrigerador de uso doméstico. La sustancia de trabajo, se llama *refrigerante*, es un gas que se licúa al incrementarse la presión o al descender la temperatura. En la fase líquida puede vaporizarse rápidamente al pasarse a través de un proceso de estrangulamiento (véase Sec. 21-6) a una temperatura próxima a la ambiente. Refrigerantes comunes son amoniaco, freón 12, cloruro de metilo y dióxido de azufre. El amoniaco, el más común de los refrigerantes industriales, hierve a −28 °F a la presión de 1 atm. El refrigerante más común en los refrigeradores domésticos es el freón 12 y hierve a −22 °F a la presión atmosférica. La variación de presión afecta radicalmente las temperaturas de condensación y vaporización de todos los refrigerantes.

Como se muestra en el esquema, un sistema usual de refrigeración consiste en un *compresor*, un *condensador*, un *tanque de almacenamiento de líquido*, una *válvula de estrangulamiento* y un *evaporador*. El compresor proporciona el trabajo de entrada necesario para mover al refrigerante a través del sistema. Cuando el émbolo se mueve hacia la derecha, succiona el refrigerante a través de la válvula de admisión a una presión un poco arriba de la atmosférica y cercana a la temperatura ambiente. Durante la carrera de trabajo, la válvula de admisión se cierra

Figura 21-16 Componentes básicos de un sistema de refrigeración.



y se abre la válvula de descarga. El refrigerante emergente, a alta temperatura y presión, pasa hacia el condensador donde se enfría hasta que se licúa. El condensador puede enfriarse por agua circulante o mediante un ventilador eléctrico. Durante esta fase se expulsa una cantidad de calor Q_{cal} del sistema. El refrigerante líquido condensado, todavía en condiciones de alta presión y temperatura, se almacena en un depósito de líquido. A continuación, el líquido refrigerante pasa desde el tanque de almacenamiento a través de una válvula de estrangulamiento, originando una caída repentina en la temperatura y presión. A medida que el refrigerante líquido frío fluye a través del serpentín evaporador, absorbe una cantidad de calor $Q_{frío}$ del espacio y de los productos que están siendo enfriados. Este calor hace hervir el refrigerante líquido y se lleva afuera del evaporador por el refrigerante gaseoso como latente de vaporización. Esta fase es el precio que se "paga" por toda la operación, y todos los componentes sólo contribuyen a la transferencia real de calor al evaporador. Finalmente, el vapor refrigerante abandona el evaporador y es succionado hacia el compresor para iniciar otro ciclo.

* RESUMEN *

La termodinámica es la ciencia que trata sobre la conversión del calor en trabajo, o el proceso inverso: la conversión de trabajo en calor. Ya se ha visto que no solamente debe conservarse la energía de tales procesos, sino que también hay límites en la eficiencia. Los principales conceptos presentados en este capítulo se resumen a continuación:

- **La primera ley de la termodinámica** es un replanteamiento del principio de la conservación de la energía. Establece que el calor neto ΔQ introducido en un sistema es igual al trabajo neto ΔW hecho por el sistema, más el cambio neto en energía interna ΔU del sistema. Simbólicamente,

$$Q = \Delta W + \Delta U \qquad \text{Primera ley de la termodinámica}$$

- **La segunda ley de la termodinámica** pone restricciones a la posibilidad de satisfacer la primera; en síntesis señala que en todo proceso hay una pérdida de energía debida a las fuerzas de rozamiento u otras fuerzas disipativas. No puede haber una máquina con una eficiencia del 100% que convierta todo el calor de entrada en trabajo útil de salida.

- **Una máquina térmica** se representa generalmente como en la figura 21-9. El significado de los símbolos utilizados en las ecuaciones siguientes puede tomarse de esa ecuación. El trabajo realizado por la máquina es la diferencia entre el calor de entrada y el de salida.

$$W = Q_{ent} - Q_{sal} \qquad \text{Trabajo (Kcal o J)}$$

- **La eficiencia E** de una máquina es el cociente del trabajo de salida entre el calor de entrada; esto puede calcularse para una máquina ideal mediante cualesquiera de las siguientes relaciones:

$$E = \frac{Q_{ent} - Q_{sal}}{Q_{ent}} \qquad E = \frac{T_{ent} - T_{sal}}{T_{ent}} \qquad \text{Eficiencia}$$

- **Un refrigerador** es una máquina térmica que opera a la inversa. Una medida del desempeño de tal dispositivo es la cantidad de enfriamiento que se obtiene del trabajo que debe introducirse en el sistema. El enfriamiento ocurre como el resultado de calor $Q_{frío}$ del depósito frío. El coeficiente de desempeño n se da mediante cualesquiera de las siguientes expresiones:

$$n = \frac{Q_{frío}}{Q_{cal} - Q_{frío}} \quad \text{o} \quad n = \frac{T_{frío}}{T_{cal} - T_{frío}}$$

* PREGUNTAS *

1. Defínanse los siguientes términos:

   a) Termodinámica.
   b) Diagrama P - V
   c) Proceso adiabático.
   d) Proceso isocórico.
   e) Máquina térmica.
   f) Refrigerador.
   g) Refrigerante.
   h) Compresor.
   i) Condensador.
   j) Evaporador.
   k) Función de energía interna.
   l) Primera ley de Termodinámica.
   m) Segunda ley de Termodinámica.
   n) Eficiencia térmica.
   o) Ciclo de Carnot.
   p) Eficiencia de Carnot.
   q) Coeficiente de funcionamiento

2. El calor latente de vaporización del agua es 540 cal/g; empero, cuando 1 g de agua se vaporiza por completo a presión constante, la energía interna del sistema sólo se incrementa en 500 cal. ¿Qué pasó con las 40 cal restantes? ¿Es éste un proceso isocórico? ¿Es un proceso isotérmico?

3. Si tanto el calor como el trabajo pueden expresarse en las mismas unidades, ¿por qué es necesario distinguir entre ambos términos?

4. ¿Es necesario emplear el concepto de energía molecular a fin de describir y utilizar la función de energía interna? Explíquese.

5. Un gas sufre una expansión adiabática. ¿Realiza trabajo externo? Si es así, ¿cuál es la fuente de energía?

6. ¿Qué pasa con la energía interna de un gas que sufre a) compresión adiabática, b) expansión isotérmica, y c) un proceso de estrangulamiento?

7. Un gas realiza trabajo externo durante una expansión isotérmica. ¿Cuál es la fuente de energía?

8. Desde el punto de vista energético es posible extraer la energía térmica contenida en el océano y utilizarla para impulsar a un vapor por el mar. ¿Qué objeciones se pueden dar?

9. En un refrigerador eléctrico, se transfiere calor desde el interior frío a los alrededores más cálidos. ¿Por qué lo anterior no viola la segunda ley de la termodinámica?

10. Considérese que se realiza trabajo externo mediante una expansión isotérmica de un gas ideal. ¿Por qué este proceso de transformar calor en trabajo no viola la segunda ley de la termodinámica?

11. Si los procesos naturales tienden a que el orden en el universo disminuya, ¿cómo puede explicarse la evolución de los sistemas biológicos a estados de alta organización? ¿Este hecho viola la segunda ley de la termodinámica?

12. Si la puerta de un refrigerador eléctrico se mantiene abierta, ¿enfriará o calentará una habitación? Explíquese.

13. ¿Qué temperatura debe tener el recipiente frío si se desea que una máquina de Carnot tenga un rendimiento de 100%? ¿Podrá suceder siempre? Si es imposible que una máquina de Carnot tenga un rendimiento de 100%, ¿por qué se llama máquina ideal?

14. ¿Qué determina el rendimiento de las máquinas térmicas? ¿Por qué suele ser tan bajo?

* PROBLEMAS *

1. Un émbolo realiza un trabajo de 3000 lb·ft sobre un gas, que a su vez se expande, efectuando un trabajo sobre sus alrededores de 2500 lb·ft. ¿Cuál es el cambio en energía interna del gas Btu?

   Respuesta 0.643 Btu.

2. Un cubo de 100 lb se desliza hacia abajo de un plano una distancia vertical de 10 ft. Si el cubo se mueve con una velocidad de 15 ft/s cuando llega al extremo inferior del plano, ¿cuántos Btu de calor se perdieron debido al rozamiento?

3. Un gas se expande contra un émbolo móvil, levantándolo 2 in a velocidad constante. a) ¿Cuánto trabajo realiza el gas si el émbolo pesa 200 lb y tiene un área de sección transversal de 12 in^2? b) Si la expansión es adiabática, ¿cuál es el cambio en la energía interna en Btu? c) ¿El valor de U representará un decremento o incremento en la energía interna?

   Respuesta a) 33.3 ft·lb, b) 0.043 Btu, c) Decrece.

4. Durante la expansión isotérmica de un gas ideal, se absorben 3 Btu de energía térmica. El émbolo pesa 2000 lb. ¿A qué altura se elevará por arriba de su posición inicial?

5. Una máquina de vapor opera con un rendimiento del 12%. ¿Qué cantidad de calor debe suministrarse por hora a fin de desarrollar 4 hp?

   Respuesta 8.48×10^4 Btu.

6. El calor de combustión del carbón es 12000 Btu/lb. Una máquina, al levantar 4 tons. de agua a una altura de 100 ft quema 2 lb de carbón. ¿Cuál es el rendimiento de la máquina?

7. A presión atmosférica 1 g de agua tiene un volumen de 1.0 cm^3. El calor de vaporización del agua a 1 atm es 540 cal/g. Cuando 1 g de agua se evapora completamente a presión atmosférica, su volumen final es de 1671 cm^3 en forma de vapor. a) Calcúlese el trabajo externo realizado por el sistema al expandirse en contra de sus alrededores. b) ¿Cuál es el incremento de la energía interna del sistema?

Respuesta a) 40.4 cal, b) 499.6 cal.

8. En un proceso termodinámico se suministrarán 2000 cal de calor a un sistema, y se permite que éste realice un trabajo externo de 3350 J. ¿Cuál es el incremento de energía térmica durante el proceso?

9. Una máquina de vapor toma vapor de un calentador a 200°C y lo expulsa directamente al aire a 100°C. ¿Cuál es su rendimiento ideal?

Respuesta 21%.

10. En un ciclo de Carnot la expansión isotérmica de un gas se efectúa a 400 K, y se absorben 500 cal de energía térmica por el gas. a) ¿Cuánto calor se expulsa por el sistema durante la compresión isotérmica si el proceso ocurre a 300 K? b) ¿Qué trabajo externo es realizado por el sistema?

11. Una máquina de Carnot absorbe calor de un recipiente a 500 K y expulsa calor a un recipiente a 300 K; en cada ciclo la máquina recibe 1200 cal de calor del recipiente a alta temperatura a) ¿Cuál es el rendimiento del ciclo de Carnot? b) ¿Cuántas calorías se expulsarán al recipiente a baja temperatura? c) ¿Cuánto trabajo externo se realiza en joules?

Respuesta a) 40%, b) 720 cal c) [illegible]

La fuerza eléctrica

30-1 LA CARGA ELÉCTRICA

Un peine de plástico duro o una barra del mismo material adquieren una capacidad extraña para atraer otros objetos después de frotarlos con la manga de un abrigo. En algunas ocasiones se experimenta un *choque* molesto cuando se toca la manija de la puerta de un automóvil después de que se desliza uno en el asiento. Hojas apiladas de papel tienden a ejercer resistencia a ser separadas. Todos estos fenómenos son ejemplos de *electrificación*, que ocurren con frecuencia cuando se frotan objetos entre sí. Desde tiempos remotos, se denominó *cargar* al proceso de frotamiento, y se decía que el objeto electrificado se había cargado. En este capítulo se inicia el estudio de la *electrostática*, ciencia que trata acerca de las cargas eléctricas en reposo.

La mejor forma de iniciar el estudio de la electrostática es experimentar con objetos que llegan a cargarse cuando se frotan. En la figura 30-1 se muestran algunos materiales [illegible] que comúnmente se encuentran en un laboratorio

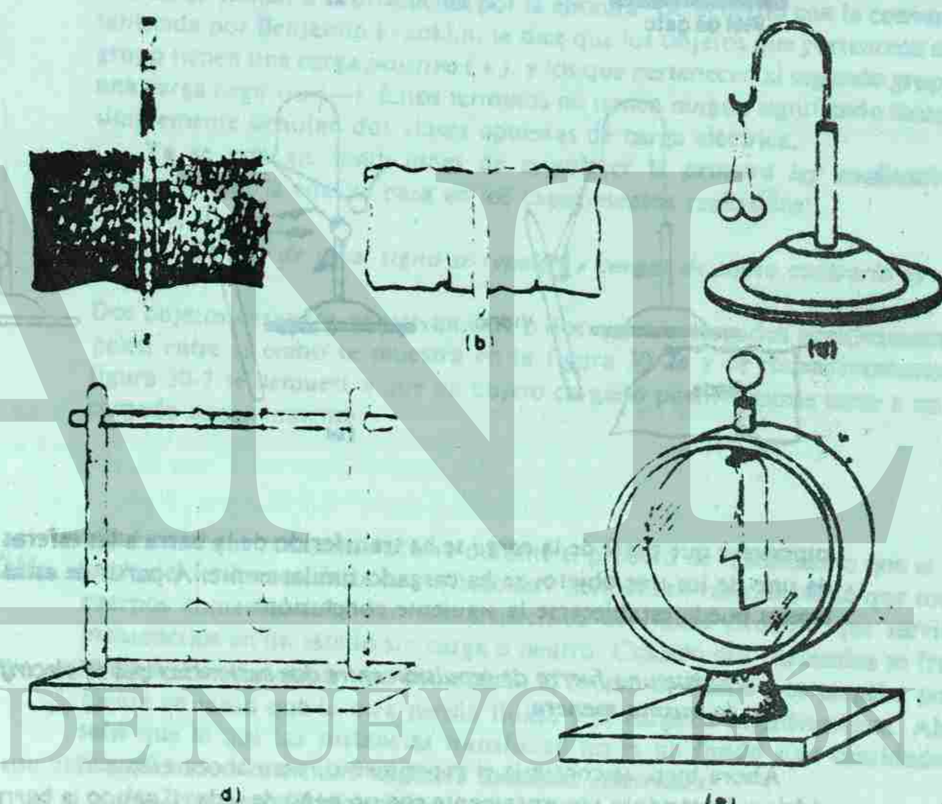


Fig. 30-1 Materiales de laboratorio empleados para el estudio de la electrostática: *a)* una barra de ebonita reposando sobre piel de gato; *b)* una barra de vidrio sobre un paño de seda; *c)* electroscopio de esferas de médula de saúco; *d)* esferas de médula de saúco suspendidas; y *e)* electroscopio de panes de oro.

de Física. En el orden que aparecen en la figura, son: una barra de caucho endurecido o ebonita reposando sobre una piel de gato, una barra de vidrio sobre un paño de seda, un electroscopio de esferas de médula de saúco, esferas de médula de saúco suspendidas, y un electroscopio de panes de oro. La esferita de médula de saúco es muy ligera, es de madera o medula de saúco pintada con pintura metálica y suele suspenderse mediante hilos de seda. Un *electroscopio* es un instrumento sensible de laboratorio que se emplea para detectar la presencia de cargas eléctricas.

Puede emplearse el electroscopio de esferas de médula de saúco para estudiar los efectos de la electrificación. Aquél consta de dos esferitas de saúco, pintadas, suspendidas de un punto común por hilos de seda de igual longitud. Luego se frota vigorosamente la barra de ebonita con una piel de gato (o un paño de lana). Si la barra se lleva cerca del electroscopio, las esferas de médula de saúco suspendidas serán atraídas hacia la barra, como se muestra en la figura 30-2*a*. Después de

6. El calor de combustión del carbón es 12000 Btu/lb. Una máquina, al levantar 4 tons. de agua a una altura de 100 ft quema 2 lb de carbón. ¿Cuál es el rendimiento de la máquina?

7. A presión atmosférica 1 g de agua tiene un volumen de 1.0 cm^3. El calor de vaporización del agua a 1 atm es 540 cal/g. Cuando 1 g de agua se evapora completamente a presión atmosférica, su volumen final es de 1671 cm^3 en forma de vapor. a) Calcúlese el trabajo externo realizado por el sistema al expandirse en contra de sus alrededores. b) ¿Cuál es el incremento de la energía interna del sistema?

Respuesta a) 40.4 cal, b) 499.6 cal.

8. En un proceso termodinámico se suministrarán 2000 cal de calor a un sistema, y se permite que éste realice un trabajo externo de 3350 J. ¿Cuál es el incremento de energía térmica durante el proceso?

9. Una máquina de vapor toma vapor de un calentador a 200°C y lo expulsa directamente al aire a 100°C. ¿Cuál es su rendimiento ideal?

Respuesta 21%.

10. En un ciclo de Carnot la expansión isotérmica de un gas se efectúa a 400 K, y se absorben 500 cal de energía térmica por el gas. a) ¿Cuánto calor se expulsa por el sistema durante la comprensión isotérmica si el proceso ocurre a 300 K? b) ¿Qué trabajo externo es realizado por el sistema?

11. Una máquina de Carnot absorbe calor de un recipiente a 500 K y expulsa calor a un recipiente a 300 K; en cada ciclo la máquina recibe 1200 cal de calor del recipiente a alta temperatura a) ¿Cuál es el rendimiento del ciclo de Carnot? b) ¿Cuántas calorías se expulsarán al recipiente a baja temperatura? c) ¿Cuánto trabajo externo se realiza en joules?

Respuesta a) 40%, b) [illegible]20 cal c) [illegible]

La fuerza eléctrica

30-1 LA CARGA ELÉCTRICA

Un peine de plástico duro o una barra del mismo material adquieren una capacidad extraña para atraer otros objetos después de frotarlos con la manga de un abrigo. En algunas ocasiones se experimenta un *choque* molesto cuando se toca la manija de la puerta de un automóvil después de que se desliza uno en el asiento. Hojas apiladas de papel tienden a ejercer resistencia a ser separadas. Todos estos fenómenos son ejemplos de *electrificación*, que ocurren con frecuencia cuando se frotan objetos entre sí. Desde tiempos remotos, se denominó *cargar* al proceso de frotamiento, y se decía que el objeto electrificado se había cargado. En este capítulo se inicia el estudio de la *electrostática*, ciencia que trata acerca de las cargas eléctricas en reposo.

La mejor forma de iniciar el estudio de la electrostática es experimentar con objetos que lleguen a cargarse cuando se frotan. En la figura 30-1 se muestran algunos materiales que comúnmente se encuentran en un laboratorio

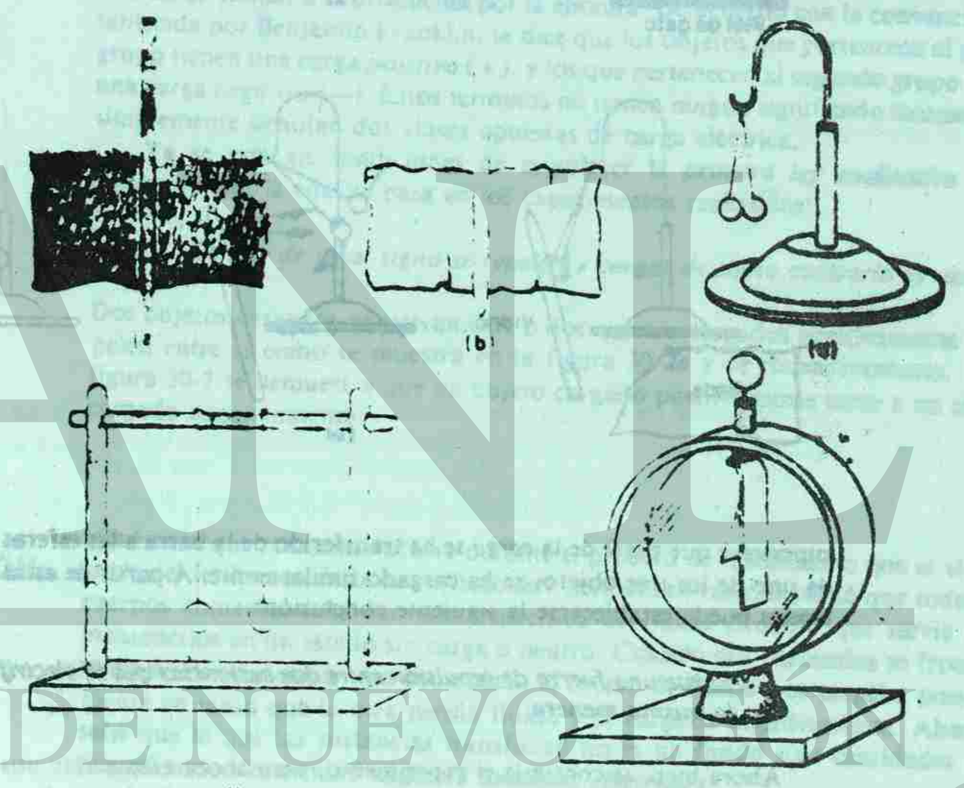


Fig. 30-1 Materiales de laboratorio empleados para el estudio de la electrostática: *a)* una barra de ebonita reposando sobre piel de gato; *b)* una barra de vidrio sobre un paño de seda; *c)* electroscopio de esferas de médula de saúco; *d)* esferas de médula de saúco suspendidas; y *e)* electroscopio de panes de oro.

de Física. En el orden que aparecen en la figura, son: una barra de caucho endurecido o ebonita reposando sobre una piel de gato, una barra de vidrio sobre un paño de seda, un electroscopio de esferas de médula de saúco, esferas de médula de saúco suspendidas, y un electroscopio de panes de oro. La esferita de médula de saúco es muy ligera, es de madera o medula de saúco pintada con pintura metálica y suele suspenderse mediante hilos de seda. Un *electroscopio* es un instrumento sensible de laboratorio que se emplea para detectar la presencia de cargas eléctricas.

Puede emplearse el electroscopio de esferas de médula de saúco para estudiar los efectos de la electrificación. Aquél consta de dos esferitas de saúco, pintadas, suspendidas de un punto común por hilos de seda de igual longitud. Luego se frota vigorosamente la barra de ebonita con una piel de gato (o un paño de lana). Si la barra se lleva cerca del electroscopio, las esferas de médula de saúco suspendidas serán atraídas hacia la barra, como se muestra en la figura 30-2*a*. Después de que permanecen en contacto con la barra por un instante, las esferas serán repelidas por la barra y además entre ellas. Cuando ésta se retira, las esferitas permanecen separadas, como se muestra en la figura. La atracción inicial debido a una redistribución de carga en las esferas eléctricamente neutrales se explicará posteriormente. La repulsión debe ser causada por alguna propiedad adquirida por las esferas como resultado de su contacto con la barra cargada. Razonablemente puede

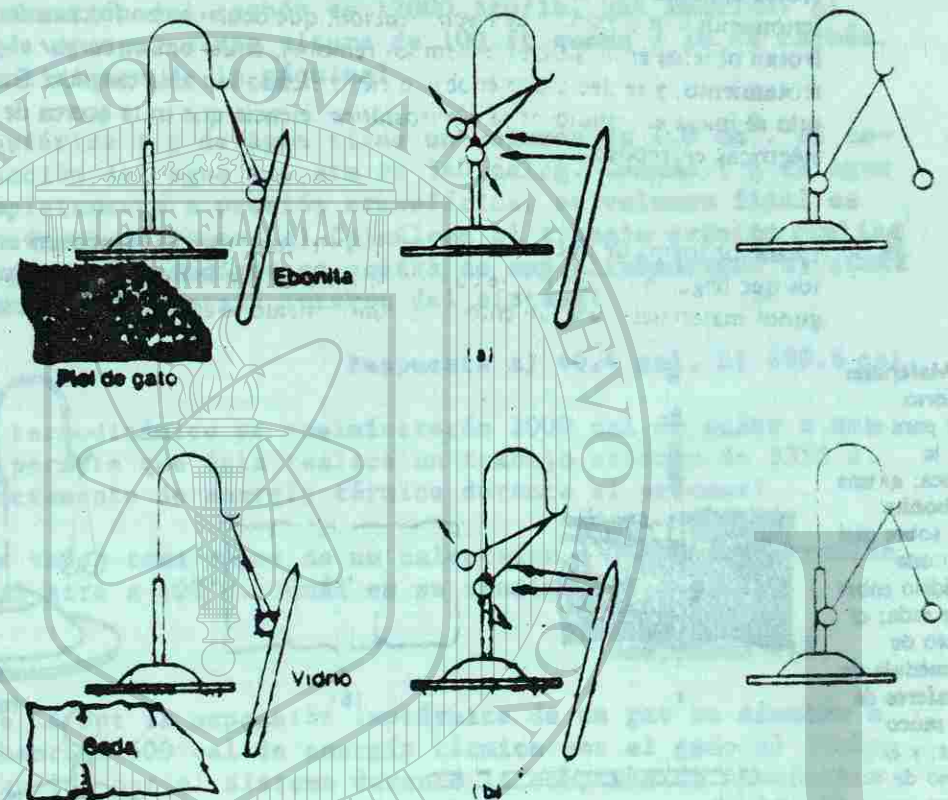


Fig. 30-2 *a)* Carga del electroscopio de esferas de médula de saúco con una barra de ebonita. ***b)*** **Carga de las esferas de médula de saúco con una barra de vidrio.**

suponerse que parte de la *carga* se ha transferido de la barra a las esferas y que cada uno de los tres objetos se ha cargado similarmente. A partir de estas observaciones puede establecerse la siguiente conclusión:

> *Existe una fuerza de repulsión entre dos sustancias que se electrificaron de la misma manera.*

Ahora bien, se continua el experimento, pero ahora empleando una barra de vidrio y frotándolo vigorosamente con un paño de seda. Cuando la barra cargada se acerca a las esferas, se produce la misma secuencia de fenómenos que para la barra de ebonita. Véase la figura 30-2*b*. ¿Esto significará que la naturaleza de la carga es la misma en ambas barras? Para el experimento efectuado no puede probarse ni desecharse la hipótesis. En cada caso, la barra y las esferas se electrificaron de un mismo modo, y en cada uno de los casos ocurría una repulsión.

Para probarse que los dos procesos son idénticos, se carga una de las esferas frotándola con una barra de vidrio y la otra con una barra de ebonita. Como se muestra en la figura 30-3, existe una fuerza de *atracción* entre las esferas cargadas de esta forma. De aquí se deduce que las cargas producidas en las barras de vidrio y ebonita son opuestas.

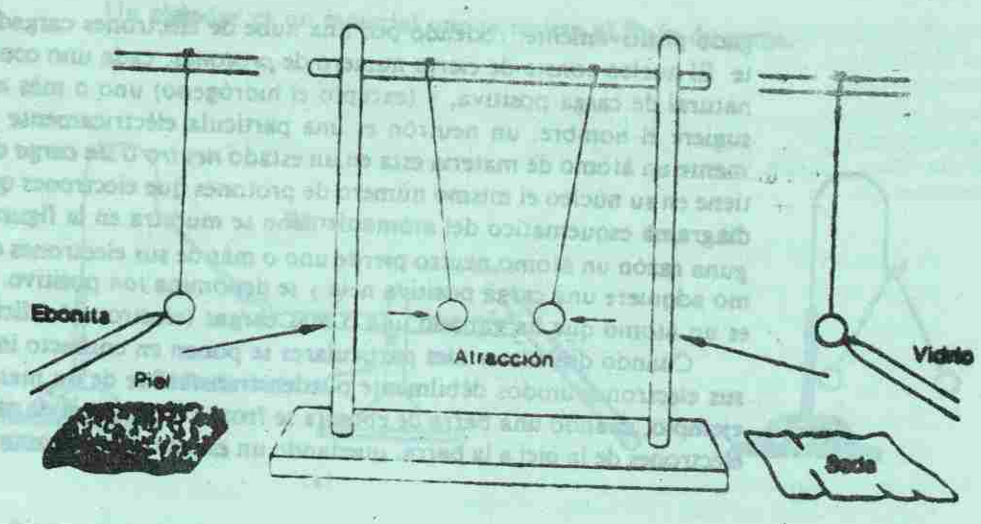


Fig. 30-3 Existe una fuerza de atracción entre dos objetos con cargas de diferente signo.

Mediante una experimentación análoga, empleando diferentes materiales, se demuestra que todos los objetos electrificados pueden dividirse en dos grupos: 1) los que tienen una carga semejante a la producida por el vidrio y 2) los que tienen una carga similar a la producida por la ebonita. De acuerdo con la convención establecida por Benjamin Franklin, se dice que los objetos que pertenecen al primer grupo tienen una carga *positiva* (+), y los que pertenecen al segundo grupo tienen una carga *negativa* (—). Estos términos no tienen ningún significado matemático; simplemente denotan dos clases opuestas de carga eléctrica.

Ya se está en condiciones de establecer la ***primera ley cualitativa de la electrostática***, la cual se basa en los experimentos realizados:

> *Cargas de igual signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen.*

Dos objetos cargados negativamente o dos objetos cargados positivamente se repelen entre sí como se muestra en la figura 30-2*a* y *b*, respectivamente. En la figura 30-3 se demuestra que un objeto cargado positivamente atrae a un objeto cargado negativamente.

30-2 EL ELECTRÓN

¿Qué es lo que realmente ocurre durante el proceso de frotamiento que es el causante del fenómeno de la electrificación? Benjamin Franklin pensó que todos los cuerpos contenían una cantidad específica de fluido eléctrico que servía para mantenerlos en un estado sin carga o neutro. Cuando dos sustancias se frotaban entre sí, él supuso que una acumulaba el exceso de fluido y se cargaba positivamente en tanto que la otra perdía fluido y se cargaba negativamente. Ahora se sabe que lo que las sustancias transfieren no es un fluido sino cantidades muy pequeñas de electricidad negativa llamadas *electrones*.

La teoría atómica moderna de la matéria sostiene que todas las sustancias están constituidas por átomos y moléculas. Cada átomo tiene un *núcleo* central car-

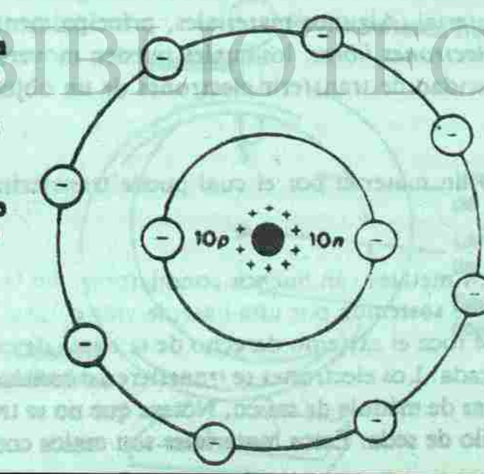


Fig. 30-4 El átomo de neón consta de un núcleo empaquetado estrechamente que contiene 10 protones (*p*) y 10 neutrones (*n*). El átomo es eléctricamente neutro porque está rodeado por 10 electrones.

gado positivamente, rodeado por una nube de electrones cargados negativamente. El núcleo consta de cierto número de *protones*, cada uno con una sola unidad natural de carga positiva, y (excepto el hidrógeno) uno o más *neutrones*. Como sugiere el nombre, un neutrón es una partícula eléctricamente neutra. Normalmente un átomo de materia está en un estado *neutro* o *sin carga* debido a que contiene en su núcleo el mismo número de protones que electrones que lo rodean. Un diagrama esquemático del átomo de neón se muestra en la figura 30-4. Si por alguna razón un átomo neutro pierde uno o más de sus electrones exteriores, el átomo adquiere una carga positiva neta y se denomina *ion* positivo. Un ion negativo es un átomo que ha ganado una o más cargas (electrones) adicionales.

Cuando dos materiales particulares se ponen en contacto íntimo, algunos de sus electrones unidos débilmente pueden transferirse de un material al otro. Por ejemplo, cuando una barra de ebonita se frota con una piel de gato, se transfieren electrones de la piel a la barra, quedando un *exceso* de electrones en la barra y una

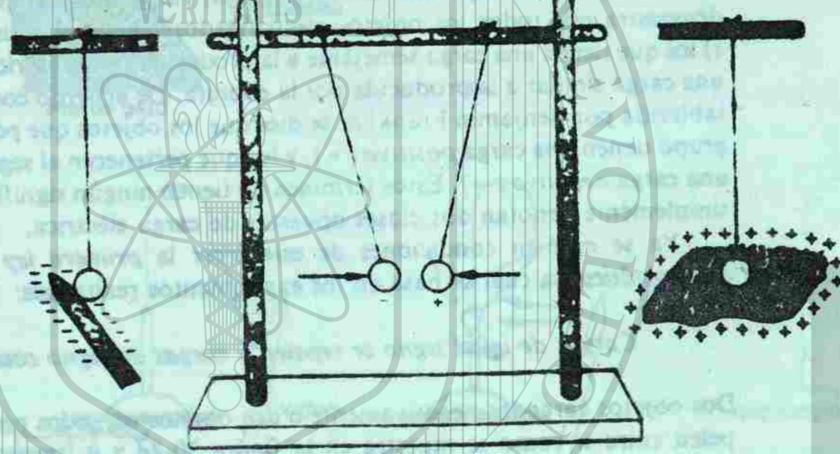


Fig. 30-5 Si se frota una barra de ebonita con un pedazo de piel se transfieren electrones de la piel a la barra.

deficiencia de electrones en la piel. Análogamente, cuando se frota una barra de vidrio con un paño de seda, se transfieren electrones del vidrio a la seda. Por lo tanto, se puede establecer.

Un objeto que tenga un exceso de electrones está cargado negativamente y un objeto que tenga deficiencia de electrones está cargado positivamente.

En la figura 30-5 se muestra un experimento de transferencia de carga. Una barra de ebonita se frota en forma vigorosa con una piel de gato. Una esfera de médula se carga negativamente con la barra, y la piel se to[illegible] ción que resulta demuestra que la piel está cargada [illegible] de frotamiento ha dejado una deficiencia de electrones en la piel de gato.

30-3 AISLADORES Y CONDUCTORES

Un pedazo de materia se compone de muchos átomos arreglados de una manera específica para dicho material. Algunos materiales, principalmente los metales, tienen gran número de *electrones libres*, los cuales pueden moverse por el material. Éstos tienen la capacidad de transferir electrones de un objeto a otro, y se llaman *conductores*.

Un conductor es un material por el cual puede transferirse carga fácilmente.

La mayor parte de los metales son buenos conductores. En la figura 30-6 se muestra una barra de cobre sostenida por una base de vidrio. Las esferas de médula pueden cargarse si se toca el extremo derecho de la barra de cobre mediante una barra de ebonita cargada. Los electrones se transfieren o *conducen* por medio de la barra hasta las esferas de médula de saúco. Nótese que no se transfiere carga a la base de vidrio o al hilo de seda. Estos materiales son malos conductores y se denominan *aisladores*.

Un aislador es un material que se resiste al flujo de carga.

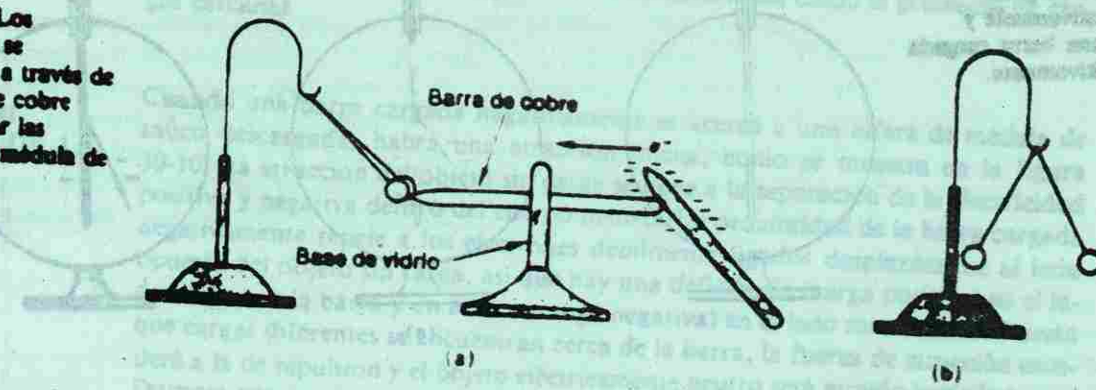


Fig. 30-6 Los electrones se desplazan a través de la barra de cobre para cargar las esferas de médula de saúco.

Otros ejemplos de buenos aisladores son la ebonita, plástico, mica, bakelita, azufre y aire seco.

Un semiconductor es un material intermedio en su capacidad para llevar o transportar carga.

Ejemplos son silicio, germanio y arseniuro de galio. La facilidad con la cual un semiconductor transporta carga puede variarse enormemente mediante la adición de impurezas o por un cambio en la temperatura.

30-4 EL ELECTROSCOPIO DE PANES DE ORO

El electroscopio que se ve en la figura 30-7 consta de una laminilla muy delgada de oro o estaño unida a una barra conductora. Tanto la barra como la laminilla están protegidas de las corrientes de aire por medio de una cubierta cilíndrica de metal con ventanas de vidrio. La barra se ajusta por medio de una barra cilíndrica de ebonita o de ámbar. Cuando se suministra cierta carga al botón o terminal del electroscopio, la repulsión entre las cargas de igual signo sobre la barra y la laminilla son la causa de que la laminilla se aleje de la barra.

En la figura 30-8 se ilustra la forma como se carga un electroscopio por *contacto*. Cuando se toca el botón con una barra cargada negativamente, los electrones fluyen desde la terminal a la barra y a la laminilla y el electroscopio adquiere un *exceso* de electrones. Cuando el botón se toca con una barra cargada positivamente, los electrones se transfieren del botón a la barra, dejando al electroscopio con una deficiencia de electrones. Adviértase que la carga residual en el electroscopio es del mismo signo que la de la barra de carga.

Una vez que el electroscopio ha sido cargado, ya sea negativa o positivamente, puede usarse para detectar la presencia y naturaleza de otros objetos cargados.

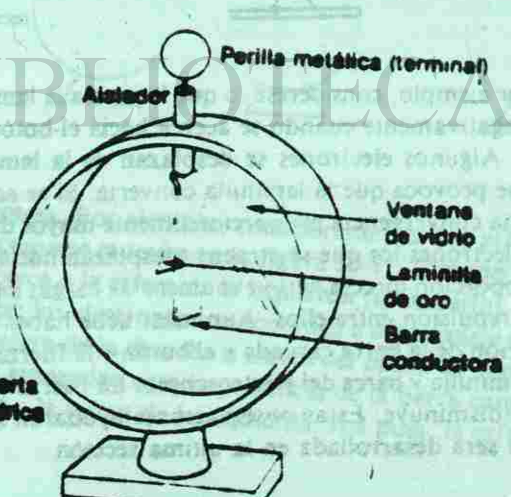


Fig. 30-7 Electroscopio de laminilla de oro.

Fig. 30-8 Carga de un electroscopio por contacto con *a)* barra cargada negativamente y *b)* una barra cargada positivamente.

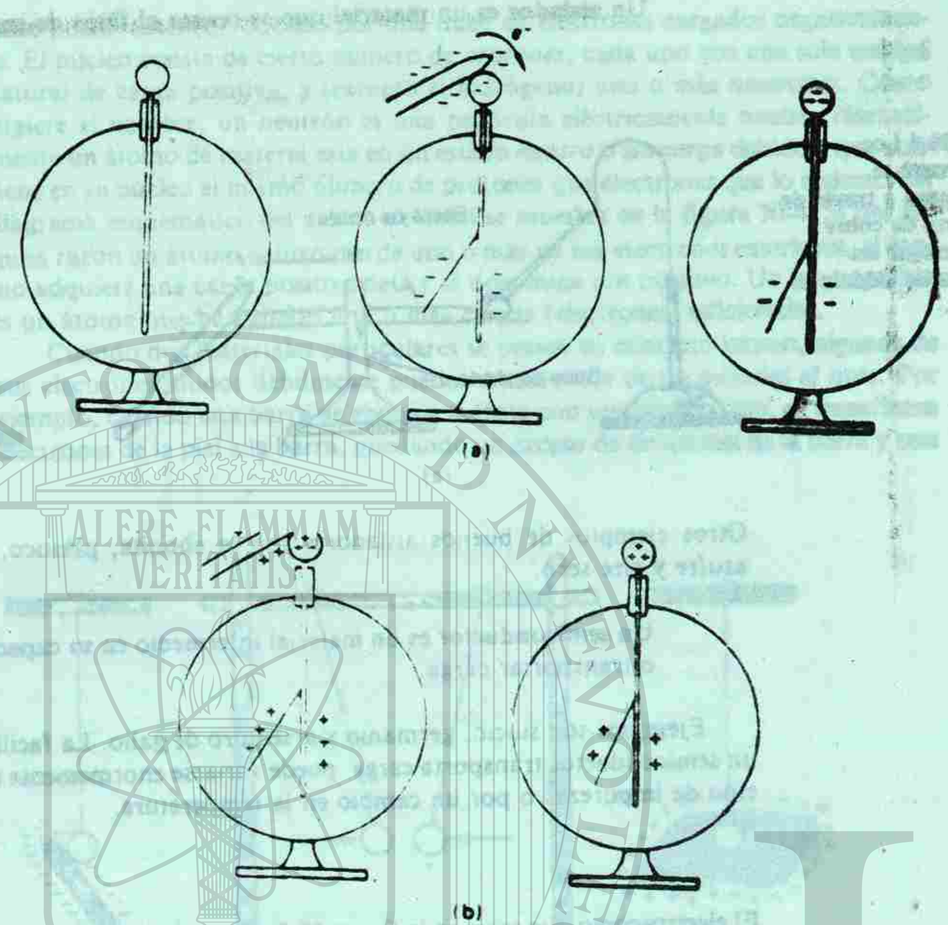
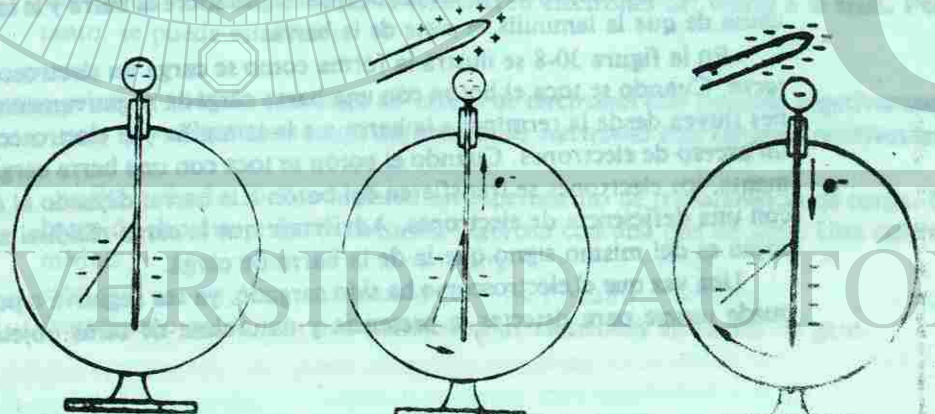


Fig. 30-9 Un electroscopio cargado negativamente puede usarse para detectar la presencia de otra carga.



(Véase Fig. 30-9). Por ejemplo, considérese lo que le pasa a la laminilla de un electroscopio cargado negativamente cuando se acerca hacia el botón una barra cargada positivamente. Algunos electrones se desplazan de la laminilla y la barra hasta el botón, lo que provoca que la laminilla converja. Si se acerca aún más la barra, se obtendrá una convergencia proporcionalmente mayor de la laminilla, ya que son más y más electrones los que se atraen y desplazan hacia el botón. Se infiere que hay una proporción directa entre el número de cargas en la laminilla y la barra y la fuerza de repulsión entre ellos. Aun más, debe haber una relación *inversa* entre la separación de la barra cargada y el botón y la fuerza de atracción de los electrones de la laminilla y barra del electroscopio. La fuerza es más intensa en cuanto la separación disminuye. Estas observaciones ayudarán a comprender la ley de Coulomb, que será desarrollada en la última sección.

Un razonamiento similar demostrará que la laminilla de un electroscopio cargado negativamente será repelido todavía más por la barra cuando el botón se coloca cerca de un objeto cargado negativamente. O sea, que puede utilizarse un electroscopio cargado para indicar tanto la naturaleza como la presencia de cargas cercanas.

30-5 REDISTRIBUCIÓN DE LA CARGA

Cuando una barra cargada nagativamente se acerca a una esfera de médula de saúco descargada, habrá una atracción inicial, como se muestra en la figura 30-10. La atracción del objeto sin carga se debe a la separación de la electricidad positiva y negativa dentro del cuerpo neutro. La proximidad de la barra cargada negativamente repele a los electrones débilmente ligados desplazándose al lado opuesto del objeto sin carga, así que hay una deficiencia (carga positiva) en el lado cercano a la barra y un exceso (carga negativa) en el lado más alejado. Puesto que cargas diferentes se encuentran cerca de la barra, la fuerza de atracción excederá a la de repulsión y el objeto eléctricamente neutro será atraído hacia la barra. Durante este proceso no se gana ni se pierde carga; simplemente la carga del cuerpo neutro se redistribuye.

30-6 INDUCCIÓN

La redistribución de carga debido a la presencia de un objeto cercano cargado puede ser útil para cargar objetos sin que haya contacto. Este proceso, llamado *inducción* de cargas, puede llevarse a cabo sin ninguna pérdida de carga del cuerpo cargado. Por ejemplo, considérense las dos esferas metálicas neutras en contacto, como se muestra en la figura 30-11. Cuando la barra cargada negativamente se acerca a la esfera de la izquierda (sin tocarla), tiene lugar una redistribución de carga; los electrones son forzados a desplazarse de la esfera de la izquierda hacia la esfera de la derecha a través del punto de contacto. Ahora bien, si las esferas son separadas ante la presencia de la barra cargada los electrones no pueden regresar a la esfera de la izquierda. Así pues, la esfera de la izquierda tendrá una

Fig. 30-10 Atracción de un cuerpo neutro debido a una redistribución de carga.

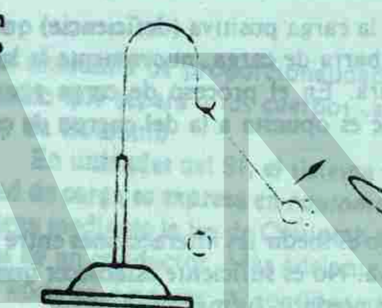
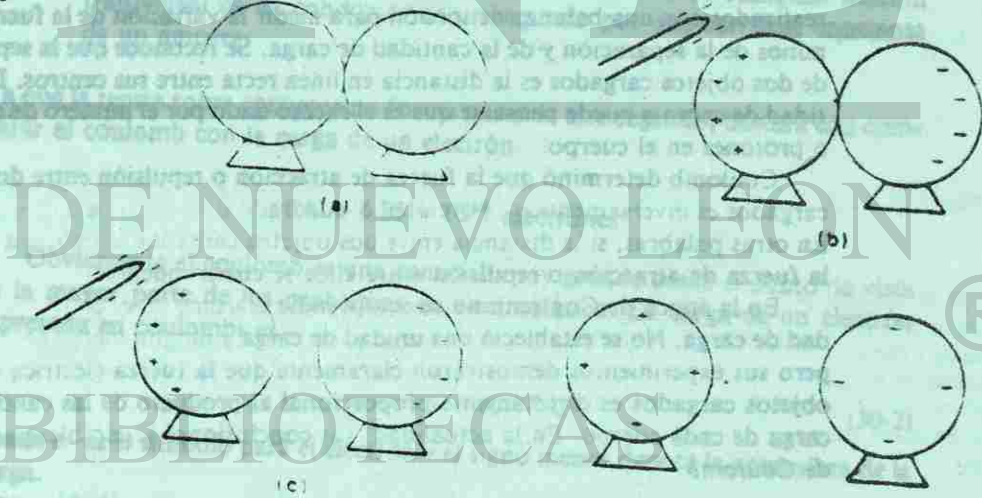


Fig. 30-11 Carga de dos esferas metálicas por inducción.



deficiencia de electrones (carga positiva), y la de la derecha tendrá un exceso de electrones (carga negativa).

También puede inducirse una carga en una sola esfera. Este proceso se muestra con el electroscopio en la figura 30-12. Se coloca una barra cargada negativamente cerca del botón metálico, de tal modo que haya una redistribución de carga. Los electrones repelidos son los responsables de que la laminilla diverja, dejando una deficiencia de electrones en el botón. Si se toca el botón con un dedo o si se conecta un alambre desde el mismo a tierra, se tiene entonces una trayectoria para que los electrones repelidos abandonen el electroscopio. El cuerpo o la

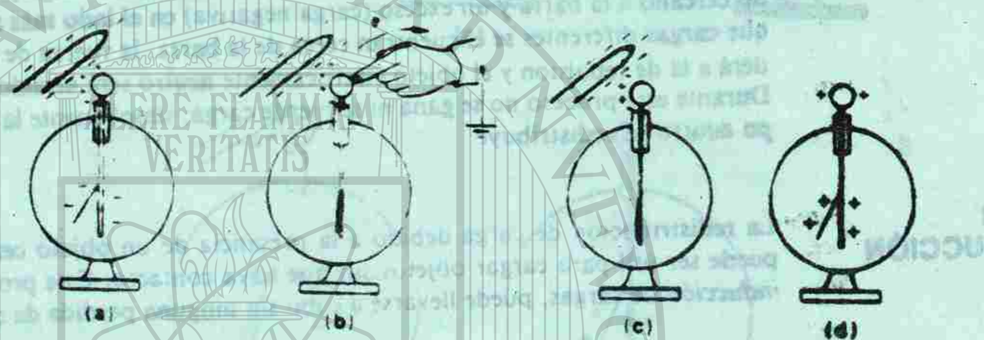


Fig. 30-12 Carga de un electroscopio por inducción. Nótese que la carga residual es opuesta a la del cuerpo de carga.

tierra adquirirán una carga igual que la carga positiva (deficiencia) que queda en el electroscopio. Cuando se retira la barra de carga, nuevamente la laminilla divergirá, como se muestra en la figura. En el proceso de carga por inducción siempre queda una carga residual que es opuesta a la del cuerpo de carga.

30-7 LEY DE COULOMB

Como de costumbre, la tarea del físico es medir las interacciones entre los objetos cargados de alguna forma cuantitativa. No es suficiente establecer que existe una fuerza eléctrica, se debe ser capaz de predecir su magnitud.

La primera investigación teórica de las fuerzas eléctricas entre cuerpos cargados fue efectuada por Charles Augustin de Coulomb en 1784. Sus estudios fueron realizados con una balanza de torsión para medir la variación de la fuerza en términos de la separación y de la cantidad de carga. Se reconoce que la separación r de dos objetos cargados es la distancia en línea recta entre sus centros. De la cantidad de carga q puede pensarse que es el exceso dado por el número de electrones o protones en el cuerpo.

Coulomb determinó que la fuerza de atracción o repulsión entre dos objetos cargados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En otras palabras, si la distancia entre dos objetos cargados se reduce a la mitad, la fuerza de atracción o repulsión entre ellos se cuadruplicará.

En la época de Coulomb no se comprendía claramente el concepto de cantidad de carga. No se estableció una unidad de carga y ningún medio para medirla, pero sus experimentos demostraron claramente que la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados es directamente proporcional al producto de las cantidades de carga de cada cuerpo. En la actualidad, sus conclusiones se establecen en la *ley de Coulomb:*

> *La fuerza de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.*

A fin de establecer matemáticamente la ley de Coulomb, considérense las cargas en la figura 30-13. En la figura 30-13*a* se indica la fuerza de atracción F entre dos cargas de diferente signo, y en la figura 30-13*b* se muestra una fuerza de repulsión entre cargas de igual signo. En cada caso la magnitud de la fuerza se determina de las magnitudes de las cargas q y q' y de su separación r. De la ley de Coulomb, puede escribirse

$$F \propto \frac{qq'}{r^2}$$

$$F = \frac{kqq'}{r^2} \qquad (30\text{-}1)$$

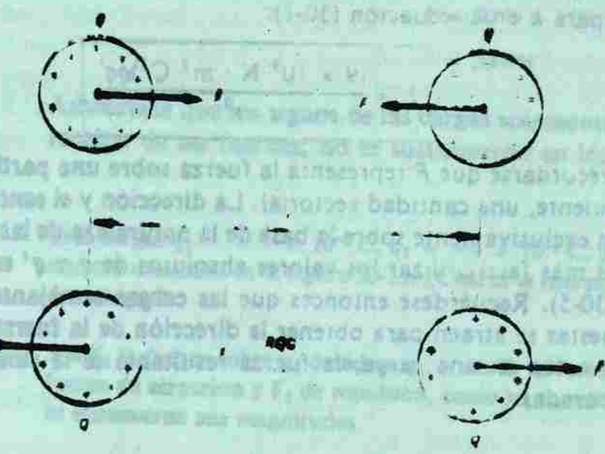


Fig. 30-13 Ilustración de la ley de Coulomb.

La constante de proporcionalidad k toma en consideración las propiedades del medio que separa a los cuerpos cargados y tiene las dimensiones dictadas por la ley de Coulomb.

En unidades del SI, el sistema práctico en el estudio de la electricidad, la unidad de carga se expresa en *coulombs* (C). En este caso, no se define la cantidad de carga mediante la ley de Coulomb sino que se relaciona con el flujo de carga a través de un conductor. Más adelante se estudiará que esta rapidez de flujo de carga se mide en *amperes*. A continuación se da una definición formal del coulomb:

> **Un coulomb** es la carga que se transfiere a través de cualquier sección transversal de un conductor en un segundo por una corriente constante de un ampere.

Ya que la teoría sobre corriente no forma parte de este capítulo, bastará con comparar al coulomb con la carga de un electrón.

$$1\ C = 6.25 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

Obviamente el coulomb es una cantidad muy grande desde el punto de vista de la mayor parte de los problemas en electrostática. La carga de un electrón expresada en coulombs es

$$e = -1.6 \times 10^{-19}\ C \qquad (30\text{-}2)$$

donde e es el símbolo para el electrón y el signo menos denota la naturaleza de la carga.

Una unidad más conveniente en electrostática es el microcoulomb (μC), que se define por

$$1\ \mu C = 10^{-6}\ C \qquad (30\text{-}3)$$

Puesto que en el SI las unidades de fuerza, carga y distancia no dependen de la ley de Coulomb, la constante k debe determinarse experimentalmente. Gran número de experimentos ha demostrado que cuando la fuerza se expresa en newtons, la distancia en metros y la carga en coulombs, la constante de proporcionalidad es aproximadamente:

$$k = 9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2 \qquad (30\text{-}4)$$

Cuando la ley de Coulomb se aplica en el sistema SI de unidades, se debe sustituir este valor para k en la ecuación (30-1):

$$\boxed{F = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)qq'}{r^2}} \qquad (30\text{-}5)$$

Debe recordarse que F representa la fuerza sobre una partícula cargada y es, por consiguiente, una cantidad vectorial. La dirección y el sentido de la fuerza se determinan exclusivamente sobre la base de la naturaleza de las cargas q y q'. Por lo tanto, es más fácil utilizar los valores absolutos de q y q' en la ley Coulomb, ecuación (30-5). Recuérdese entonces que las cargas semejantes se repelen y las cargas opuestas se atraen para obtener la dirección de la fuerza. Cuando más de una fuerza actúa en una carga, la fuerza resultante es la suma vectorial de las fuerzas separadas.

EJEMPLO 30-1 Una carga de $-3\ \mu C$ se coloca a 100 mm de una carga de $+3\ \mu C$. Calcúlese la fuerza entre estas dos cargas.

Solución Primero se convierte en unidades apropiadas.

$$3\ \mu C = 3 \times 10^{-6}\ C \qquad 100\ mm = 100 \times 10^{-3}\ m = 0.1\ M$$

A continuación se usan los valores absolutos, de tal manera que q y q', sean iguales a 3×10^{-6} C. Si se aplica la ley de Coulomb se obtiene

$$F = \frac{kqq'}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)(3 \times 10^{-6}\ C)(3 \times 10^{-6}\ C)}{(0.1\ m)^2}$$

$$F = 8.1\ N \qquad \textbf{\textit{Atracción}}$$

Esta es una fuerza de *atracción* porque las cargas tienen signos opuestos.

EJEMPLO 30-2 Dos cargas $q_1 = -8\ \mu C$ y $q_2 = +12\ \mu C$ son colocadas a 120 mm de distancia, en el aire. ¿Cuál es la fuerza resultante en una tercera carga $q_3 = -4\ \mu C$ colocada a medio camino entre las otras dos cargas?

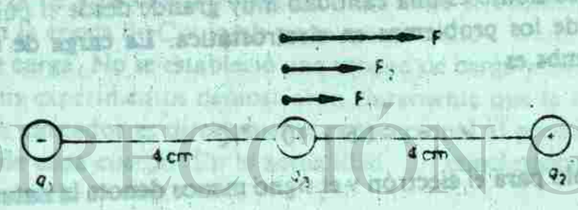


Fig. 30-14 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.

Solución Se convierten las cargas en coulombs ($1\ \mu C = 1 \times 10^{-6}$ C), se usan valores absolutos y se convierte la distancia en metros (120 mm = 0.12 m). La mitad de 0.12 m es 0.06 m. Se dibuja un esquema en la figura 30-14 para ayudar a visualizar las fuerzas. La fuerza en q_3 debida a q_1 es dirigida hacia la derecha y se calcula a partir de la ley de Coulomb

$$F_1 = \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)(8 \times 10^{-6}\ C)(4 \times 10^{-6}\ C)}{(0.06\ m)^2}$$

$$F_1 = \frac{0.288\ N \cdot m^2}{0.0036\ m^2} = 80\ N \qquad \textbf{\textit{Repulsión hacia la derecha}}$$

De una manera parecida, la fuerza F_2 en q_3 debida a q_2 es igual a

$$F_2 = \frac{kq_2q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)(12 \times 10^{-6}\ C)(4 \times 10^{-6}\ C)}{(0.06\ m)^2}$$

$$F_2 = 120\ N \qquad \textbf{\textit{Atracción, también a la derecha}}$$

La fuerza resultante F es la suma vectorial de F_1 y F_2. Entonces, con la anotación:

$$F = 80\ N + 120\ N$$

$$= 200\ N \qquad \textbf{\textit{Dirigida a la derecha.}}$$

Adviértase que los signos de las cargas solamente se usaron para determinar la dirección de las fuerzas; no se sustituyeron en los cálculos.

EJEMPLO 30-3 Tres cargas $q_1 = +4 \times 10^{-9}$ C, $q_2 = -6 \times 10^{-9}$ C, y $q_3 = -8 \times 10^{-9}$ C se arreglan de la manera mostrada en la figura 30-15. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Solución Sea F_1 la fuerza sobre q_3 debida a q_1, y sea F_2 la fuerza sobre q_3 causada por q_2. F_1 es una fuerza de atracción y F_2 de repulsión, como se muestra en la figura. De la ley de Coulomb se encuentran sus magnitudes.

$$F_1 = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)(4 \times 10^{-9}\ C)(8 \times 10^{-9}\ C)}{(0.1\ m)^2}$$

$$= 2.88 \times 10^{-5}\ N \qquad (37°\ \text{noroeste})$$

$$F_2 = \frac{(9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2)(6 \times 10^{-9}\ C)(8 \times 10^{-9}\ C)}{(8 \times 10^{-2}\ m)^2}$$

$$= 6.75 \times 10^{-5}\ N \qquad \text{este}$$

A continuación debe determinarse la resultante F de las fuerzas F_1 y F_2. Del diagrama de cuerpo libre se observa que

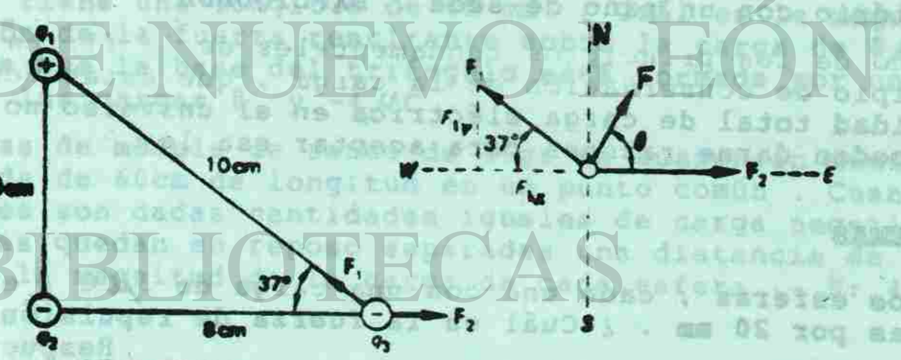
$$F_x = F_2 - F_{1x} = F_2 - F_1 \cos 37$$

$$= (6.75 \times 10^{-5}\ N) - (2.88 \times 10^{-5}\ N)(0.8)$$

$$= 4.45 \times 10^{-5}\ N$$

$$F_y = F_1 \operatorname{sen} 37 = 1.73 \times 10^{-5}\ N$$

Fig. 30-15



De las componentes se encuentra que

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{1.73 \times 10^{-5}\ N}{4.45 \times 10^{-5}\ N} = 0.389$$

$$\theta = 21°$$

$$F = \frac{F_y}{\operatorname{sen} \theta} = \frac{1.73 \times 10^{-5}\ N}{\operatorname{sen} 21°} = 4.80 \times 10^{-5}\ N$$

En consecuencia, la fuerza resultante sobre q_3 es 4.8×10^{-5} N dirigida 21° al noreste.

RESUMEN

La electrostática es la ciencia que trata del estudio de las cargas en reposo . Se ha visto que hay dos clases de carga en la naturaleza . Si un objeto tiene exceso de electrones se dice que está cargado negativamente ; si tiene una deficiencia de electrones está cargado positivamente . La ley de Coulomb se introdujo para proporcionar una medida cuantitativa de las fuerzas eléctricas entre esas cargas . Los conceptos principales son :

+ La primera ley de la electrostática establece que las cargas semejantes se repelen entre sí y las cargas diferentes se atraen.
+ La ley de Coulomb establece que la fuerza de atracción ó de repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas , e inversamente proporcional a la separación entre las dos cargas .

$$F = \frac{K\,qq'}{r^2} \qquad K = 9 \times 10^9\ N.m^2/C^2$$

La fuerza F está en newton (N) cuando la separación está en metros (m) y la carga q se mide en coulombs (C)

+ Al resolver los problemas de este capítulo es importante emplear el signo de las cargas para determinar la dirección de las fuerzas , y la ley de Coulomb para determinar sus magnitudes . Por lo tanto , la fuerza resultante en una carga particular se encuentra mediante los métodos de la mecánica vectorial .

PREGUNTAS

1.- Definase los siguiente términos :

a) Electrostática	b) cargar	c) Electrón
d) Carga negativa	e) Carga positiva	f) Ion
g) Carga inducida	h) Conductor	i) Aislador
j) Semiconductor	k) Ley de Coulomb	l) Coulomb (unidad
m) Microcoulomb	n) Electroscopio	

2.- ¿ Se crea carga en el proceso de frotamiento de una barra de vidrio con un paño de seda ? EXPLIQUESE

3.- Uno de los principios fundamentales de la física es el principio de conservación de la carga , que establece que la cantidad total de carga eléctrica en el universo no cambia . ¿ Pueden darse razones para aceptar esa ley ?

PROBLEMAS

1.- Dos esferas , cada una con una carga de $3\mu C$, están separadas por 20 mm . ¿ Cuál es la fuerza de repulsión entre ellas? Respuesta: 202 N.

2.- Dos cargas puntuales de -3 y $+4\mu C$ se encuentran separadas por 12 mm en el vacío . ¿ Cuál es la fuerza electrostática entre ellas ?

3.- ¿ Cuál debe ser la separación entre dos cargas de $-4\mu C$, si la fuerza de repulsión entre ellas es de 20 Newtons?

Respuesta : 84.9 mm

4.- Dos carga idénticas desconocidas experimentan una fuerza repulsiva de 48 N . cuando están separadas 60 mm . ¿ Cuál es la magnitud de cada carga ?

5.- A una esfera metálica pequeña se le suministra una carga de $+40\mu C$, y a una segunda esfera localizada a 8 cm se le dá una carga de $-12\mu C$. a) ¿ Cuál es la fuerza de atracción entre ellas ? b) Si se permite que las dos esferas se pongan en contacto y luego se separan nuevamente a 8 cm , ¿ cuál es la fuerza eléctrica que existe entre ellas ?

RESPUESTA : a)675N b)276N (repulsión)

6.- Dos cargas se atraen entre sí con una fuerza de 6×10^{-5} N, cuando se encuentran separadas cierta distancia en el vacío . Si su separación se disminuye en la tercera parte de su distancia original . ¿¿cuál es la nueva fuerza de atracción ??

7.- La fuerza de repulsión entre dos esferas de médula de sauco es de $60\mu N$. Si cada una de las esferas lleva una carga de 8nC , ¿ cuál es su separación ? RESPUESTA : 98 mm.

8.- Una carga de $+60\mu C$ se coloca a 60 mm a la izquierda de una carga de $+20\mu C$. ¿ Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de $-35\mu C$ colocada en el punto medio entre las otras dos cargas ?

RESPUESTA: 1.4x10 N. izquierda

9.- Una carga puntual de $+36\mu C$ se sitúa a 80 mm de una segunda carga puntual de $-22\mu C$. a) ¿ Cuál es la fuerza que se ejerce sobre cada una de las cargas ? b) ¿ Cuál es la fuerza resultante sobre una tercera carga de $+12\mu C$ colocada entre las otras cargas y localizadas a 60 mm de la carga de $+36\mu C$?

10.-Dos cargas de +16 y $+9\mu C$ están separadas 80mm en el aire . ¿ dónde deberá colocarse una tercera carga a fin de que la fuerza resultante que actué sobre ella sea cero ? ¿ por qué no es necesario especificar la magnitud ó el signo de la tercera carga ?

11.-Tres cargas puntuales $q_1 = +8\mu C$, $q_2 = -4\mu C$, y $q_3 = +2\mu C$ se colocan en los vértices de un triángulo equilátero . Cada uno de sus lados tiene una longitud de 80 mm. ¿ Cuál es la magnitud y la direción de la fuerza resultante sobre la carga de $8\mu C$? Se infiere que la base del triángulo está formada por una linea que une a las cargas 8 y $-4\mu C$.

12.-Dos esferas de médula de sauco de 8 gr se suspenden mediante hilos de seda de 60cm de longitud en un punto común . Cuando a las esferas les son dadas cantidades iguales de carga negativa , las esferas quedan en reposo separadas una distancia de 30 cm. Calcúlese la magnitud de la carga de cada esfera . R: 450 nC

El campo eléctrico

En los capítulos anteriores se estudiaron minuciosamente los conceptos de fuerza y movimiento. Normalmente se utilizaron las leyes de movimiento de Newton para analizar las consecuencias de las fuerzas de *contacto*. Si se reflexiona un momento acerca del universo entero se concluirá que hay un número enorme de objetos que *no* están en contacto.

Un proyectil que experimenta una fuerza hacia abajo no puede explicarse en términos de su interacción con partículas de aire; los planetas giran continuamente a través del espacio que rodea al Sol y éste experimenta una fuerza que lo hace girar en una trayectoria elíptica por fuerzas que no lo tocan. Incluso a nivel atómico, no hay "cuerdas" que mantengan a los electrones en sus órbitas alrededor del núcleo.

Si realmente quiere comprenderse al universo en que vivimos, deben desarrollarse leyes para predecir la magnitud y dirección de las fuerzas que no se transmiten por contacto. Dos de estas leyes ya han sido estudiadas:

1. *Ley de Newton de la gravitación universal:*

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{31-1}$$

2. *Ley de Coulomb de las fuerzas electrostáticas:*

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{31-2}$$

La ley de Newton predice la fuerza mutua que existe entre dos masas separadas por una distancia r; la ley de Coulomb trata con la fuerza electrostática, como se estudió en el capítulo 30. Al aplicar estas leyes se encuentra que es útil desarrollar ciertas propiedades del espacio que rodea a las masas o a las cargas.

31-1 CONCEPTO DE CAMPO

Tanto la fuerza eléctrica como la gravitacional son ejemplos de *fuerza de acción a distancia* que resultan extremadamente difíciles de visualizar. A fin de resolver este hecho, los físicos de antaño postularon la existencia de un material invisible llamado éter, que se suponía llenaba todo el espacio. De este modo ellos podían explicarse la fuerza de atracción gravitacional como debida a esfuerzos en el éter causadas por la presencia de varias masas. Ciertos experimentos de óptica han demostrado que la teoría del éter es insostenible (véase Sec. 24-2), y esto obligó a considerar si el espacio por sí mismo poseía propiedades de interés para el físico.

Puede afirmarse que la presencia de una masa altera el espacio que la rodea de tal modo que produce una fuerza gravitacional sobre otra masa cercana. Se describe esta alteración de las propiedades del espacio por medio de la introducción del concepto de *campo gravitacional* que rodea todas las masas. Un campo de este tipo puede decirse que existe en cualquier región del espacio donde una masa testigo o de prueba experimentara una fuerza gravitacional. La intensidad del campo en cualquier punto sería proporcional a la fuerza que experimenta cierta masa dada en dicho punto. Por ejemplo, en cualquier punto cercano a la Tierra, el campo gravitacional podría representarse cuantitativamente por

$$g = \frac{F}{m} \tag{31-3}$$

donde
g = aceleración gravitacional debida a la fuerza de gravedad
F = fuerza gravitacional
m = masa testigo o de prueba (véase Fig. 31-1)

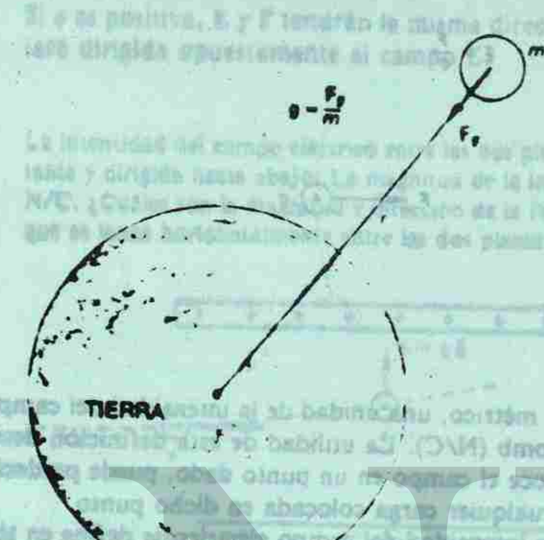


Fig. 31-1 El campo gravitacional en cualquier punto por encima de la Tierra puede representarse por la aceleración gravitacional g que una pequeña masa m experimentaría si fuera colocada en ese punto.

Si se conoce g en cualquier punto por encima de la Tierra, la fuerza F que actúa sobre cierta masa m colocada en dicho punto puede determinarse a partir de la ecuación (31-3).

El concepto de un campo también puede aplicarse a objetos cargados eléctricamente. El espacio que rodea un objeto cargado se altera por la presencia de un *campo eléctrico* en ese espacio.

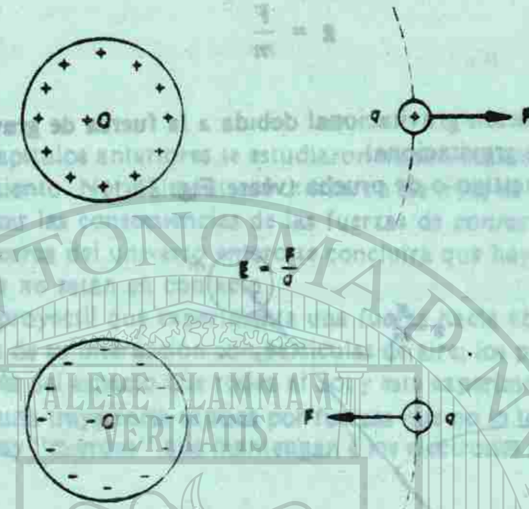
Se dice que un campo eléctrico existe en una región del espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica.

Esta definición suministra una prueba para la existencia de un campo eléctrico. Simplemente se coloca una carga en el punto en cuestión. Si se observa una fuerza eléctrica, en ese punto existe un campo eléctrico.

De la misma manera que la fuerza por unidad de masa proporciona una definición cuantitativa de un campo gravitacional, la intensidad de un campo eléctrico puede representarse mediante la fuerza por unidad de carga. Se define la intensidad del campo eléctrico E en un punto en términos de la fuerza F experimentada por una carga positiva pequeña $+q$ cuando se coloca en dicho punto. (Véase Fig. 31-2.) La magnitud de la intensidad del campo eléctrico es dada por

$$\boxed{E = \frac{F}{q}} \tag{31-4}$$

Fig. 31-2 La dirección de la intensidad del campo eléctrico en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de una carga positiva $+q$ cuando se coloca en ese punto; su magnitud es la fuerza por unidad de carga (F/q).



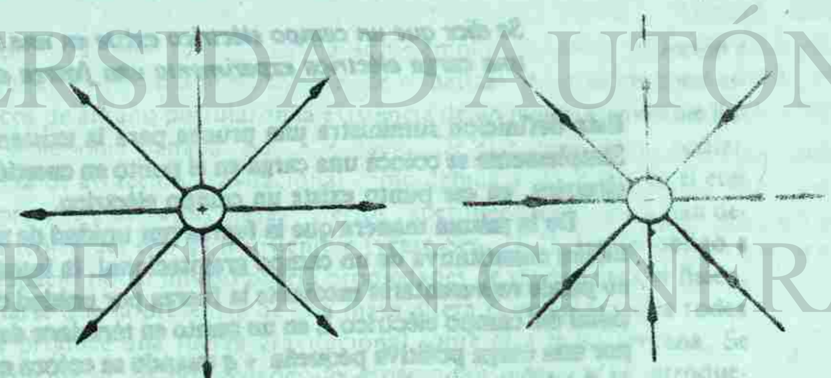
En el sistema métrico, una unidad de la intensidad del campo eléctrico es el newton por coulomb (N/C). La utilidad de esta definición descansa en el hecho de que si se conoce el campo en un punto dado, puede predecirse la fuerza que actuará sobre cualquier carga colocada en dicho punto.

Ya que la intensidad del campo eléctrico se define en términos de una carga *positiva*, su dirección en cualquier punto es la misma que la fuerza electrostática sobre una carga positiva de prueba en dicho punto.

> *La dirección (y sentido) de la intensidad del campo eléctrico* **E** *en un punto del espacio, es la misma que la dirección (y sentido) en la cual una carga positiva se movería si fuere colocada en dicho punto.*

Sobre esta base, el campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva $+Q$ será hacia afuera, o alejándose de la carga, como se indica por la figura 31-3*a*. En la vecindad de una carga negativa $-Q$, la dirección, será hacia adentro, o sea, dirigido hacia la carga (Fig. 31-3*b*).

Fig. 31-3 *a)* El campo en la vecindad de una carga positiva está dirigido radialmente hacia afuera a cualquier punto. *b)* El campo está dirigido hacia adentro o hacia una carga negativa.



Debe recordarse que la intensidad del campo eléctrico es una propiedad que se asocia con el espacio que rodea al cuerpo cargado. Un campo gravitacional existe alrededor de la Tierra y no depende de que haya o no una masa cerca de ésta. De manera similar, existe un campo eléctrico en la vecindad de un cuerpo cargado, independientemente de si se coloca o no una carga en el campo. Si se coloca una carga en el campo, experimentará una fuerza F dada por

$$F = qE \tag{31-5}$$

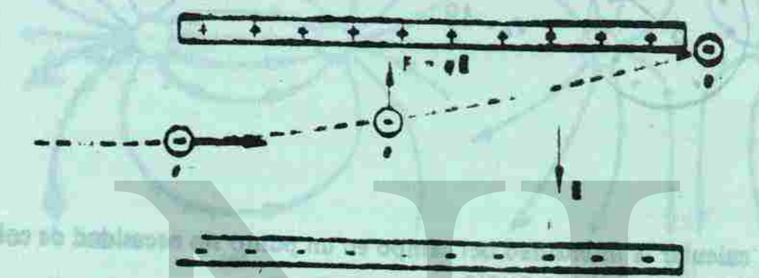
donde E = intensidad del campo eléctrico
q = magnitud de la carga colocada en el campo

Si q es positiva, E y F tendrán la misma dirección; si q es negativa, la fuerza F estará dirigida opuestamente al campo E.

EJEMPLO 31-1

La intensidad del campo eléctrico entre las dos placas mostradas en la figura 31-4 es constante y dirigida hacia abajo. La magnitud de la intensidad del campo eléctrico es 6×10^4 N/C. ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica ejercida sobre un electrón que se lanza horizontalmente entre las dos placas?

Fig. 31-4 Un electrón proyectado dentro de un campo eléctrico de intensidad constante.



Solución

Ya que la dirección de la intensidad del campo **E** se define en términos de una carga positiva, la fuerza sobre un electrón actuará hacia arriba, u opuesta a la dirección del campo. La carga del electrón es -1.6×10^{-19} C. Así que la fuerza eléctrica está dada por la ecuación (31-5).

$$F = qE = (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(6 \times 10^4\ \text{N/C})$$
$$= 9.6 \times 10^{-15}\ \text{N} \quad \textbf{hacia arriba}$$

Recuérdese que se utiliza el valor absoluto de la carga. Las direcciones de **F** y **E** son las mismas para cargas positivas, y opuestas para cargas negativas.

31-2 CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO

Ya se ha estudiado un método para medir la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en un punto del espacio; se coloca una carga conocida en un punto, y se mide la fuerza resultante que actúa sobre ella. La fuerza por unidad de carga es una medida de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto. La desventaja de este método es que no sustenta una relación obvia con la carga Q, la cual crea el campo. Mediante la experimentación se demuestra rápidamente que la magnitud del campo eléctrico que rodea a un cuerpo cargado es directamente proporcional a la cantidad de carga en el cuerpo. También puede demostrarse que en los puntos más y más alejados de una carga Q, una carga testigo q experimentará cada vez fuerzas menores. La relación exacta es derivada de la ley de Coulomb.

$$F = \frac{kQq}{r^2} \tag{31-6}$$

Si este valor se sustituye para F en la ecuación (31-4), se tiene

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQq/r^2}{q}$$

$$\boxed{E = \frac{kQ}{r^2}} \qquad (31\text{-}7)$$

donde k es igual que $9 \times 10^{9}\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$. El sentido del campo es opuesto a Q si Q es positiva y hacia Q si Q es negativa. Ahora ya se tiene la relación que permite calcular la intensidad del campo en un punto sin necesidad de colocar una segunda carga en dicho punto.

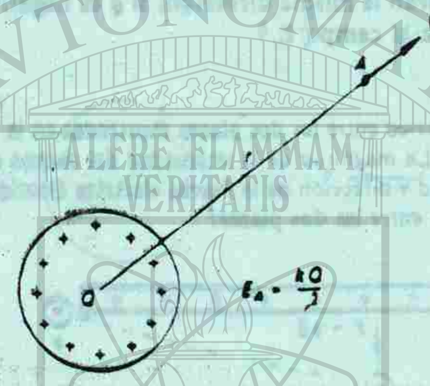


Fig. 31-5 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico a una distancia r del centro de una carga sola Q.

31-3 LÍNEAS DEL CAMPO ELÉCTRICO

Michael Faraday (1791-1867) introdujo una forma muy ingeniosa para facilitar la visualización de los campos eléctricos, en sus trabajos iniciales sobre electromagnetismo. El método consiste en representar tanto la dirección (como el sentido) de un campo eléctrico mediante líneas imaginarias llamadas *líneas del campo eléctrico*.

Las líneas del campo eléctrico son líneas imaginarias dibujadas de tal modo que su dirección (y sentido) en cualquier punto es la misma que la dirección y sentido de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto.

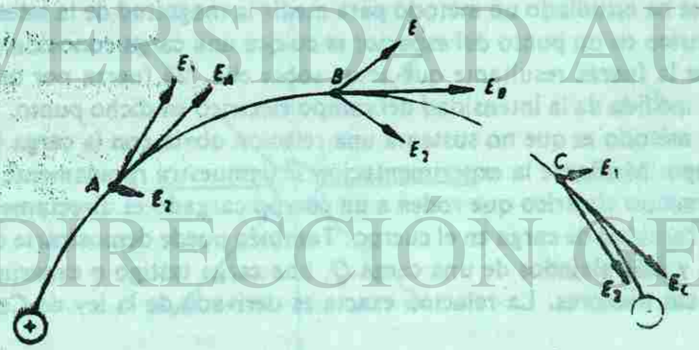


Fig. 31-8 La dirección de una línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección de la intensidad del campo eléctrico resultante en dicho punto.

Por ejemplo, las líneas dibujadas radialmente hacia afuera de la carga positiva de la figura 31-3*a*, representan la dirección del campo en cualquier punto sobre la línea. Las líneas del campo eléctrico en la vecindad de una carga eléctrica negativa serían radiales y estarían dirigidas hacia la carga, como en la figura 31-3*b*. Más adelante se verá que la densidad de esas líneas, en cualquier región del espacio, una medida de la *magnitud* de la intensidad del campo en esa región.

En general, la dirección del campo eléctrico en una región del espacio suele variar de un punto a otro. De aquí que normalmente las líneas sean curvas. Por ejemplo, considérese la construcción de una línea de campo eléctrico en la región entre una carga positiva y una carga negativa, como se muestra en la figura 31-8.

La dirección de la línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección del vector de campo eléctrico resultante en dicho punto. Deben seguirse dos reglas al construir las líneas del campo eléctrico:

1. La dirección de la línea de campo en cualquier punto es la misma que la dirección en la cual se movería una carga positiva si fuera colocada en ese punto.

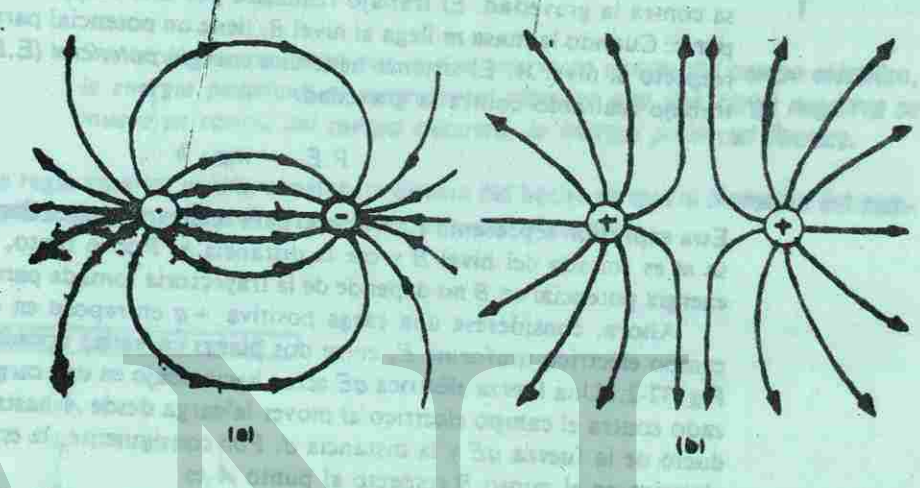


Fig. 31-9 *a)* Representación gráfica de las líneas de campo eléctrico en los alrededores de un dipolo. *b)* Las líneas de campo eléctrico entre dos cargas positivas.

2. El espaciado de las líneas del campo debe ser de tal modo que estén más juntas donde se tiene un campo fuerte y alejadas entre sí donde el campo es débil.

Si se siguen estas reglas muy generales, se pueden construir las líneas del campo eléctrico para dos casos comunes mostrados en la figura 31-9. Como una consecuencia de la manera en la que se dibujan las líneas, *éstas siempre divergen de las cargas positivas y convergen en las cargas negativas*. La líneas no pueden originarse o finalizar en el espacio, aunque el extremo de una línea eléctrica pueda proseguir al infinito.

Potencial eléctrico

Muchos de los problemas estudiados en mecánica se simplificaron notablemente al introducir el concepto de energía. La conservación de la energía mecánica permitió definir ciertas cosas en relación con los estados inicial y final de los sistemas sin necesidad de analizar el movimiento entre estados. El concepto de transformación de la energía potencial en energía cinética evita el problema de las fuerzas variables.

En electricidad, pueden resolverse muchos problemas si se consideran los cambios de energía que experimenta una carga en movimiento; por ejemplo, si se requiere cierta cantidad de trabajo para mover una carga en contra de fuerzas

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQq/r^2}{q}$$

$$\boxed{E = \frac{kQ}{r^2}} \qquad (31\text{-}7)$$

donde k es igual que $9 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2$. El sentido del campo es opuesto a Q si Q es positiva y hacia Q si Q es negativa. Ahora ya se tiene la relación que permite calcular la intensidad del campo en un punto sin necesidad de colocar una segunda carga en dicho punto.

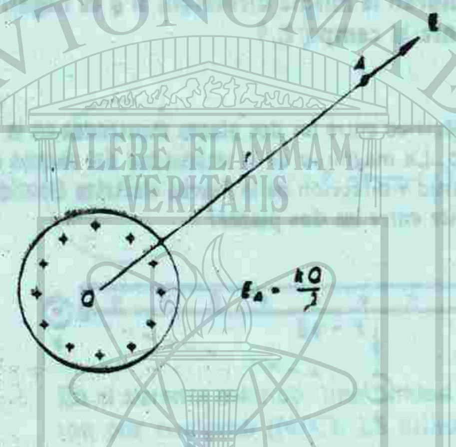


Fig. 31-5 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico a una distancia r del centro de una carga sola Q.

31-3 LÍNEAS DEL CAMPO ELÉCTRICO

Michael Faraday (1791-1867) introdujo una forma muy ingeniosa para facilitar la visualización de los campos eléctricos, en sus trabajos iniciales sobre electromagnetismo. El método consiste en representar tanto la dirección (como el sentido) de un campo eléctrico mediante líneas imaginarias llamadas *líneas del campo eléctrico*.

Las líneas del campo eléctrico son líneas imaginarias dibujadas de tal modo que su dirección (y sentido) en cualquier punto es la misma que la dirección y sentido de la intensidad del campo eléctrico en dicho punto.

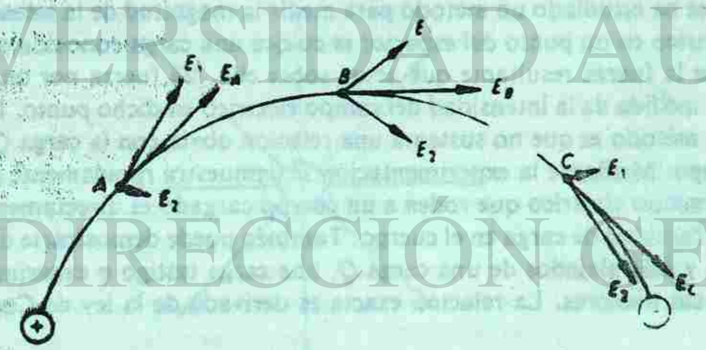


Fig. 31-6 La dirección de una línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección de la intensidad del campo eléctrico resultante en dicho punto.

Por ejemplo, las líneas dibujadas radialmente hacia afuera de la carga positiva de la figura 31-3*a*, representan la dirección del campo en cualquier punto sobre la línea. Las líneas del campo eléctrico en la vecindad de una carga eléctrica negativa serían radiales y estarían dirigidas hacia la carga, como en la figura 31-3*b*. Más adelante se verá que la densidad de esas líneas, en cualquier región del espacio, una medida de la *magnitud* de la intensidad del campo en esa región.

En general, la dirección del campo eléctrico en una región del espacio suele variar de un punto a otro. De aquí que normalmente las líneas sean curvas. Por ejemplo, considérese la construcción de una línea de campo eléctrico en la región entre una carga positiva y una carga negativa, como se muestra en la figura 31-8.

La dirección de la línea de campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la dirección del vector de campo eléctrico resultante en dicho punto. Deben seguirse dos reglas al construir las líneas del campo eléctrico:

1. La dirección de la línea de campo en cualquier punto es la misma que la dirección en la cual se movería una carga positiva si fuera colocada en ese punto.

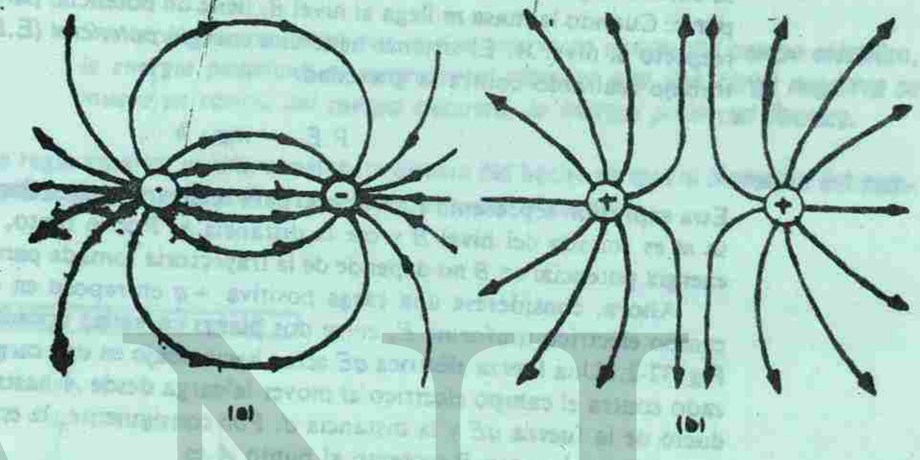


Fig. 31-9 *a)* Representación gráfica de las líneas de campo eléctrico en los alrededores de un dipolo. *b)* Las líneas de campo eléctrico entre dos cargas positivas.

2. El espaciado de las líneas del campo debe ser de tal modo que estén más juntas donde se tiene un campo fuerte y alejadas entre sí donde el campo es débil.

Si se siguen estas reglas muy generales, se pueden construir las líneas del campo eléctrico para dos casos comunes mostrados en la figura 31-9. Como una consecuencia de la manera en la que se dibujan las líneas, *éstas siempre divergen de las cargas positivas y convergen en las cargas negativas*. Las líneas no pueden originarse o finalizar en el espacio, aunque el extremo de una línea eléctrica pueda proseguir al infinito.

Potencial eléctrico

Muchos de los problemas estudiados en mecánica se simplificaron notablemente al introducir el concepto de energía. La conservación de la energía mecánica permitió definir ciertas cosas en relación con los estados inicial y final de los sistemas sin necesidad de analizar el movimiento entre estados. El concepto de transformación de la energía potencial en energía cinética evita el problema de las fuerzas variables.

En electricidad, pueden resolverse muchos problemas si se consideran los cambios de energía que experimenta una carga en movimiento; por ejemplo, si se requiere cierta cantidad de trabajo para mover una carga en contra de fuerzas eléctricas, esa carga debe tener un *potencial* para entregar una cantidad equivalente de energía cuando se libera. En este capítulo se desarrolla la idea de energía potencial eléctrica.

32-1 ENERGÍA DE POTENCIAL ELÉCTRICO

Una de las mejores formas de comprender el concepto de energía de potencial eléctrico es comparándola con la energía de potencial gravitacional. En el caso gravitacional, considérese que una masa m es movida del nivel A en la figura 32-1 al nivel B. Una fuerza externa F igual al peso mg debe aplicarse para mover la masa contra la gravedad. El trabajo realizado por esta fuerza es el producto de mg por h. Cuando la masa m llega al nivel B, tiene un potencial para hacer un trabajo respecto al nivel A. El sistema tiene una *energía potencial* (E.P.) que es igual al trabajo realizado contra la gravedad.

$$\text{P.E.} = mg \cdot h$$

Esta expresión representa el potencial para realizar trabajo, después de que la masa m es soltada del nivel B y cae la distancia h. Por lo tanto, la magnitud de la energía potencial en B no depende de la trayectoria tomada para llegar a ese nivel.

Ahora, considérese una carga positiva $+q$ en reposo en el punto A, en un campo eléctrico uniforme E, entre dos placas cargadas opuestamente. (Véase la Fig. 32-2.) Una fuerza eléctrica qE actúa hacia abajo en una carga. El trabajo realizado contra el campo eléctrico al mover la carga desde A hasta B es igual al producto de la fuerza qE y la distancia d. Por consiguiente, la energía de potencial eléctrico en el punto B respecto al punto A es

$$\text{P.E.} = qE \cdot d \tag{32-1}$$

Antes de proseguir con este estudio, debe señalarse una diferencia importante entre la energía potencial gravitacional y la energía potencial eléctrica. En el caso de la gravitacional, sólo hay una clase de masa, y las fuerzas que intervienen son

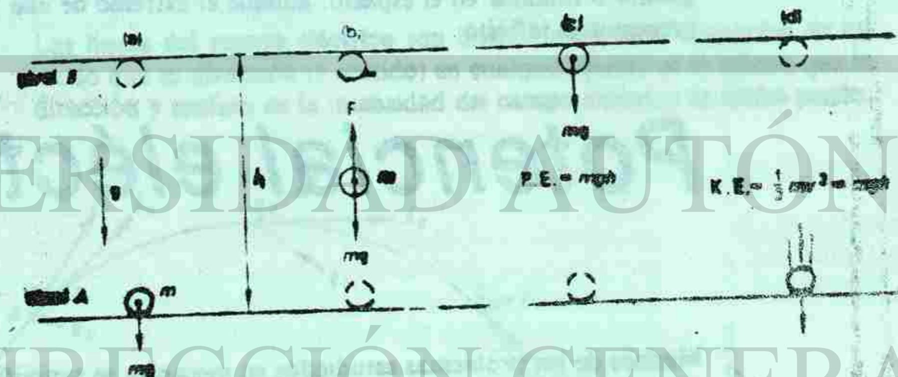


Fig. 32-1 Una masa m levantada contra el campo gravitacional g resulta en una energía potencial de mgh en el nivel B. Cuando se suelta, esta energía será transformada enteramente en energía cinética conforme cae al nivel A.

siempre de atracción. Por consiguiente, una masa a alturas mas elevadas siempre da como resultado una mayor energía potencial relativa a la Tierra. Éste no es el caso en electricidad debido a la existencia de carga negativa. En el ejemplo de una carga positiva, como se ve en la figura 32-2, hay una energía potencial mayor en el punto A que en el punto B. Esto es cierto, independientemente del punto de referencia para medir la energía potencial debido a que se ha realizado trabajo en *contra* del campo. (Véase Fig. 32-3.) Por otro lado, si una carga negativa se desplazara del punto B al punto A, el trabajo sería realizado *por* el campo. En el caso de una carga negativa, habría una *menor* energía potencial en A, lo cual es exactamente opuesto a la situación para una carga positiva.

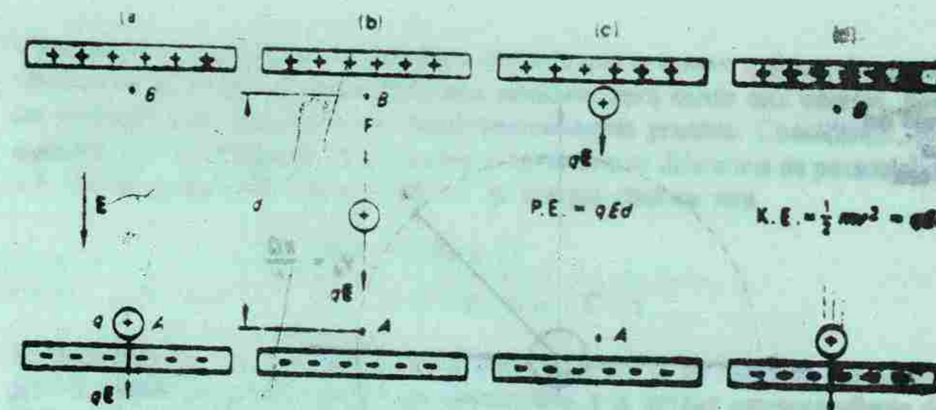


Fig. 32-2 Una carga positiva $+q$ es desplazada contra un campo eléctrico constante E, a través de una distancia d. En el punto B la energía potencial será qEd respecto al punto A. Cuando se suelte la carga ganará una cantidad equivalente de energía cinética.

Siempre que una carga positiva se mueve en contra del campo eléctrico, la energía potencial se incrementa; siempre que una carga negativa se mueve en contra del campo eléctrico, la energía potencial decrece.

La regla anterior es una constancia directa del hecho de que la dirección del campo eléctrico se define en términos de una carga positiva.

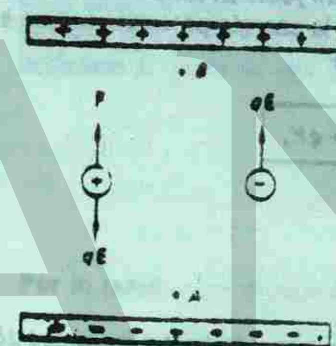


Fig. 32-3 Una carga positiva incrementa su energía potencial cuando se desplaza de A a B; una carga negativa *pierde* energía potencial cuando se desplaza de A a B.

32-3 POTENCIAL

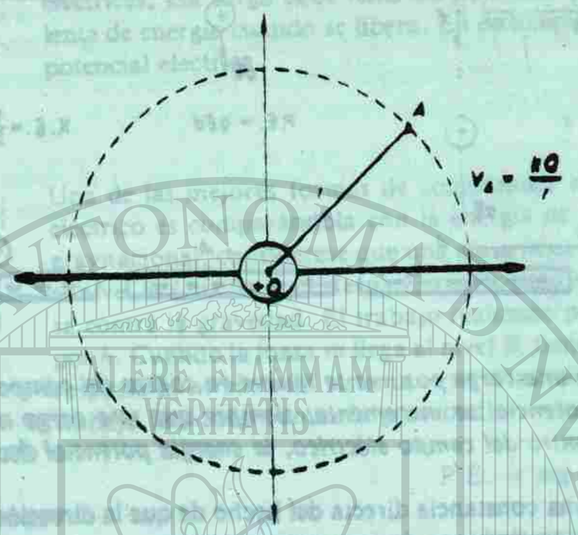
Cuando por primera vez se introdujo el concepto de intensidad del campo eléctrico como la fuerza por unidad de carga, se señaló que la ventaja primordial de dicho concepto estribaba en que permitía asignarle una propiedad eléctrica al espacio. Si en algún punto se conoce la intensidad del campo, la fuerza sobre una carga colocada en ese punto puede predecirse. Asimismo es conveniente asignar otra propiedad al espacio que rodea a la carga que permitirá predecir la energía potencial debida a otra carga colocada en cualquier punto. A esta propiedad del espacio se la llama *potencial* y se define como sigue:

> El potencial V en un punto a una distancia r de una carga Q es igual al trabajo por unidad de carga realizado en contra de las fuerzas eléctricas al traer una carga $+q$ desde el infinito a dicho punto.

En otras palabras, el potencial en algún punto A, como se muestra en la figura 32-5, es igual a la *energía potencial por unidad de carga*. Las unidades del potencial se expresan en *joules por coulomb*, y se define como *volt* (V).

$$V_A(\text{V}) = \frac{\text{P.E.(J)}}{q(\text{C})} \tag{32-2}$$

Fig. 32-6 Cálculo del potencial a una distancia r de una carga $+Q$.



Así un potencial de un volt en un punto A significa que para una carga de un coulomb tendrá una energía potencial de un joule en ese punto. En general, cuando se conoce el potencial en un punto A, la energía potencial debida a la carga q en ese punto puede calcularse a partir de

$$\boxed{P.E. = qV_A} \quad (32\text{-}8)$$

32-4 DIFERENCIA DE POTENCIAL

En electricidad práctica, es escaso el interés por el trabajo por unidad de carga para trasladar una carga al infinito. Con mayor frecuencia, lo que se desea saber es la cantidad de trabajo necesario para mover cargas entre dos puntos. Esto lleva al concepto de *diferencia de potencial.*

La diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga positiva realizado por fuerzas eléctricas para mover una pequeña carga de prueba desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial.

Otra manera de establecer lo anterior sería decir que la diferencia de potencial entre dos puntos es la diferencia entre los potenciales en dichos puntos. Por ejemplo, si el potencial en algún punto A es 100 V y el potencial en otro punto B es 40 V, la diferencia de potencial es

$$V_A - V_B = 100\ \text{V} - 40\ \text{V} = 60\ \text{V}$$

Esto significa que se realizarán 60 J de trabajo por el campo eléctrico sobre cada coulomb de carga positiva para llevarla desde A a B. En general, el trabajo realizado por el campo eléctrico para mover una carga q desde el punto A hasta el punto B puede encontrarse de

$$\boxed{\text{Trabajo}_{A \to B} = q(V_A - V_B)}$$

32-6 ELECTRÓN-VOLT

Considérese la energía de una partícula cargada que se mueve a través de una diferencia de potencial. Existen diferentes opciones para medir esta energía, pero las unidades más familiares son inconvenientemente grandes. Considérese, por ejemplo, que una carga de 1 C se acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V. De las ecuaciones (32-2) y (32-11), su energía cinética será

$$K.E. = qEd = qV$$
$$= (1\ \text{C})(1\ \text{V}) = 1\ \text{C} \cdot \text{V}$$

El coulomb-volt, es, por supuesto, un joule. Pero 1 C de carga es demasiado grande cuando se aplica a partículas elementales, y la unidad correspondiente de energía (el joule) también lo es. La unidad de energía más conveniente, en Física atómica y nuclear, es el electrón-volt (eV).

El electrón-volt es una unidad de energía equivalente a la energía adquirida por un electrón, que se acelera a través de una diferencia de potencial de un volt.

El electrón-volt difiere del coulomb-volt en el mismo orden que la diferencia en la carga de un electrón y la carga de 1 C. Para comparar las dos unidades supóngase que se calcula la energía en joules adquirida por un electrón, que ha sido acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 V:

$$K.E. = qV$$
$$= (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(1\ \text{V})$$
$$= 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

Por lo tanto, 1 eV es equivalente a una energía de 1.6×10^{-19} J.

Corriente y resistencia

Ahora se deja la electrostática y se entra al estudio de las cargas en movimiento. Se han considerado fuerzas, campos eléctricos y energías potenciales en relación con conductores cargados. Por ejemplo, electrones en exceso, distribuidos uniformemente sobre una superficie esférica aislada, permanecerán en reposo. Empero, si un alambre se conecta desde la esfera a tierra, los electrones fluirán por el alambre hasta esta última. El flujo de carga constituye una *corriente eléctrica*. En este capítulo se ponen los cimientos para el estudio de corrientes directas y de resistencia eléctrica.

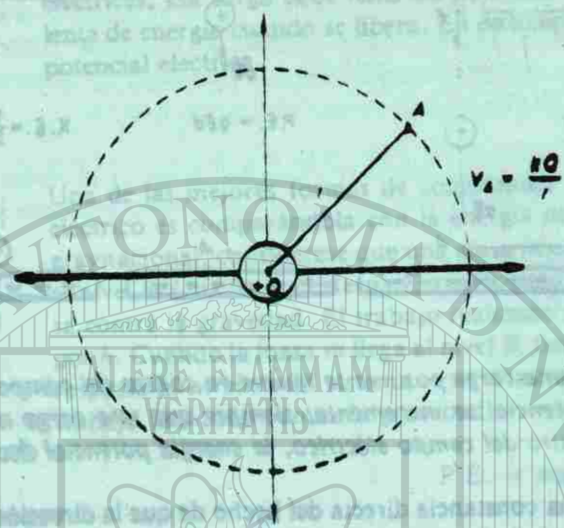


Fig. 32-5 Cálculo del potencial a una distancia r de una carga $+Q$.

Así *un potencial de un volt en un punto A significa que para una carga de un coulomb tendrá una energía potencial de un joule en ese punto*. En general, cuando se conoce el potencial en un punto A, la energía potencial debida a la carga q en ese punto puede calcularse a partir de

$$\boxed{\text{P.E.} = qV_A} \qquad (32\text{-}8)$$

32-4 DIFERENCIA DE POTENCIAL

En electricidad práctica, es escaso el interés por el trabajo por unidad de carga para trasladar una carga al infinito. Con mayor frecuencia, lo que se desea saber es la cantidad de trabajo necesario para mover cargas entre dos puntos. Esto lleva al concepto de *diferencia de potencial*.

> **La diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga positiva realizado por fuerzas eléctricas para mover una pequeña carga de prueba desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial.**

Otra manera de establecer lo anterior sería decir que la diferencia de potencial entre dos puntos es la diferencia entre los potenciales en dichos puntos. Por ejemplo, si el potencial en algún punto A es 100 V y el potencial en otro punto B es 40 V, la diferencia de potencial es

$$V_A - V_B = 100\ \text{V} - 40\ \text{V} = 60\ \text{V}$$

Esto significa que se realizarán 60 J de trabajo por el campo eléctrico sobre cada coulomb de carga positiva para llevarla desde A a B. En general, el trabajo realizado por el campo eléctrico para mover una carga q desde el punto A hasta el punto B puede encontrarse de

$$\boxed{\text{Trabajo}_{A \to B} = q(V_A - V_B)}$$

32-6 ELECTRÓN-VOLT

Considerese la energía de una partícula cargada que se mueve a través de una diferencia de potencial. Existen diferentes opciones para medir esta energía, pero las unidades más familiares son inconvenientemente grandes. Considérese, por ejemplo, que una carga de 1 C se acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V. De las ecuaciones (32-2) y (32-11), su energía cinética será

$$\text{K.E.} = qEd = qV$$
$$= (1\ \text{C})(1\ \text{V}) = 1\ \text{C} \cdot \text{V}$$

El coulomb-volt, es, por supuesto, un joule. Pero 1 C de carga es demasiado grande cuando se aplica a partículas elementales, y la unidad correspondiente de energía (el joule) también lo es. La unidad de energía más conveniente, en Física atómica y nuclear, es el electrón-volt (eV).

> **El electrón-volt es una unidad de energía equivalente a la energía adquirida por un electrón, que se acelera a través de una diferencia de potencial de un volt.**

El electrón-volt difiere del coulomb-volt en el mismo orden que la diferencia en la carga de un electrón y la carga de 1 C. Para comparar las dos unidades supóngase que se calcula la energía en joules adquirida por un electrón, que ha sido acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 V:

$$\text{K.E.} = qV$$
$$= (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(1\ \text{V})$$
$$= 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

Por lo tanto, 1 eV es equivalente a una energía de 1.6×10^{-19} J.

Corriente y resistencia

Ahora se deja la electrostática y se entra al estudio de las cargas en movimiento. Se han considerado fuerzas, campos eléctricos y energías potenciales en relación con conductores cargados. Por ejemplo, electrones en exceso, distribuidos uniformemente sobre una superficie esférica aislada, permanecerán en reposo. Empero, si un alambre se conecta desde la esfera a tierra, los electrones fluirán por el alambre hasta esta última. El flujo de carga constituye una *corriente eléctrica*. En este capítulo se ponen los cimientos para el estudio de corrientes directas y de resistencia eléctrica.

La corriente eléctrica I es la rapidez del flujo de carga Q que pasa por un punto dado P en un conductor eléctrico.

$$\boxed{I = \frac{Q}{t}} \qquad (34\text{-}1)$$

La unidad de corriente eléctrica es el *ampere*. Un ***ampere (A)*** **representa un flujo de carga con una rapidez de un *coulomb por segundo*, que pasa por cualquier punto.**

$$1\ A = \frac{1\ C}{1\ s}$$

En el ejemplo de la descarga del capacitor, la corriente se origina en el movimiento de los electrones, como se observa en la figura 34-2. Las cargas positivas en el alambre están fuertemente ligadas y no pueden moverse. El campo eléctrico creado en el interior del alambre se debe a la diferencia de potencial entre las placas y ocasiona que los electrones libres en el alambre experimenten un impulso hacia la placa positiva. Los electrones son en repetidas ocasiones frenados, acelerados y sufren deflexiones debido a un proceso que tiene que ver con impurezas y el movimiento térmico de los átomos. En consecuencia, el movimiento de los electrones no es acelerado sino un arrastre o proceso de difusión. La velocidad media de arrastre de los electrones es típica del orden de 4 m/h. Esta velocidad con la que se mueve la carga, que es una *distancia* por unidad de tiempo, no debe ser confundida con la corriente, que es la *cantidad* de carga por unidad de tiempo.

Es útil la analogía del agua que fluye por una tubería para comprender el flujo de corriente. La rapidez del flujo de agua (gasto) en galones por minuto, es

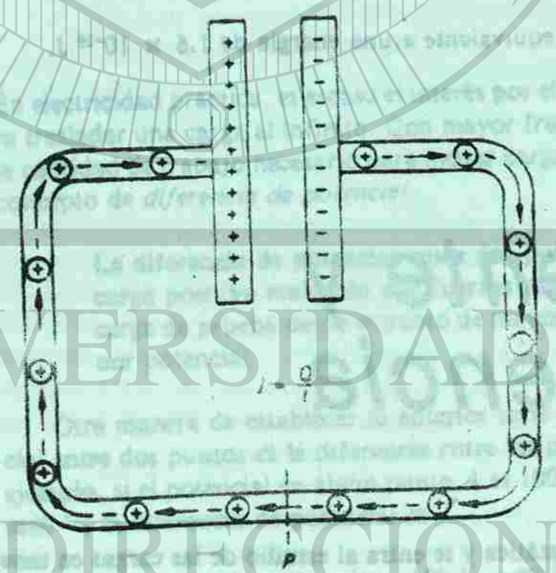


Fig. 34-2 La corriente se origina por el movimiento de los electrones y es una medida de la cantidad de carga que pasa por un punto dado en la unidad de tiempo.

análoga a la rapidez del flujo de carga en coulombs por segundo. Para una corriente de 1 A, 6.25×10^{18} electrones (1 C) pasan por un punto dado cada segundo. En la misma forma que la sección transversal y la longitud del tubo afectan el flujo de agua, la sección transversal y la longitud del conductor afectan el flujo de electrones.

EJEMPLO 34-1 ¿Cuántos electrones pasan por un punto en 5 s si en un conductor se mantiene una corriente constante de 8 A?

Solución De la ecuación (34-1),

$$Q = It = (8\ A)(5\ s)$$
$$= (8\ C/s)(5\ s) = 40\ C$$
$$= (40\ C)(6.25 \times 10^{18}\ \text{electrones/C})$$
$$= 2.50 \times 10^{20}\ \text{electrones}$$

34-2 DIRECCIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

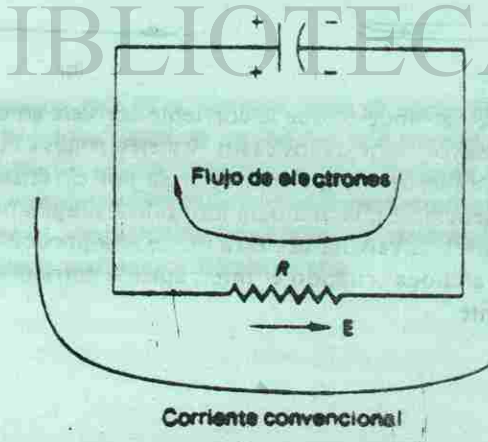
Hasta ahora sólo se ha estudiado la magnitud de la corriente eléctrica. La selección de la dirección es meramente arbitraria en tanto la definición se aplique de manera permanente. El flujo de carga originado por un campo eléctrico en un gas o un líquido, consta de un flujo de iones positivos en la dirección opuesta al campo. Como se ha visto, la corriente en un material metálico consiste en electrones que fluyen contra la dirección del campo. Sin embargo, una corriente que consta de partículas negativas que se mueven en una dirección es eléctricamente la misma que una corriente que consta de cargas positivas moviéndose en dirección opuesta.

Hay buen número de razones para preferir el movimiento de cargas positivas como un indicador de la dirección. En primer lugar, todos los conceptos introducidos en electrostática se definieron en términos de cargas positivas, es decir, la intensidad del campo eléctrico, la energía potencial, y la diferencia de potencial. Un electrón fluye en dirección contraria al campo eléctrico y acusa una subida de potencial, desde la placa negativa a la positiva. Si se define la corriente como el flujo de carga *positiva* la perdida en energía a medida que la carga encuentra resistencia será de + a — o "sufre una caída de potencial". Por conveniencia, se considera que todas las corrientes consisten en un flujo de carga positiva.

La dirección de una corriente convencional siempre es la misma que aquella en la que se moverían las cargas positivas, aun si la corriente realmente consiste en un flujo de electrones.

Tanto el flujo de electrones como la corriente convencional de un alambre conductor metálico se pueden ver en la figura 34-3. La línea en zig-zag se usa para indicar la resistencia eléctrica R. Obsérvese que el flujo de corriente convencional fluye de la placa positiva del capacitor y neutraliza la carga negativa en la otra placa. La corriente convencional tiene la misma dirección que el campo eléctrico **E** que produce la corriente.

Fig. 34-3 En un conductor metálico la dirección de la corriente convencional se da en sentido opuesto al flujo de electrones.



34-3 FUERZA ELECTROMOTRIZ

Las corrientes estudiadas en las secciones anteriores se llaman *corrientes transitorias* porque su existencia es únicamente por corto tiempo. Una vez que el capacitor se haya descargado por completo, no habrá una diferencia de potencial que provoque el flujo de carga adicional. Si existiera algún medio disponible para que pudiera estar continuamente cargado el capacitor, se lograría mantener una corriente continua. Esto requeriría estar suministrando electrones, en forma constante, a la placa negativa para reemplazar a aquellos que salen de ella. O sea debe suministrarse energía para sustituir su pérdida por la carga en el circuito externo; de esta manera se mantendría la diferencia de potencial entre las placas, de tal modo que permaneciera un flujo continuo de carga. Un dispositivo con la capacidad de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos se llama *fuente de fuerza electromotriz* (fem).

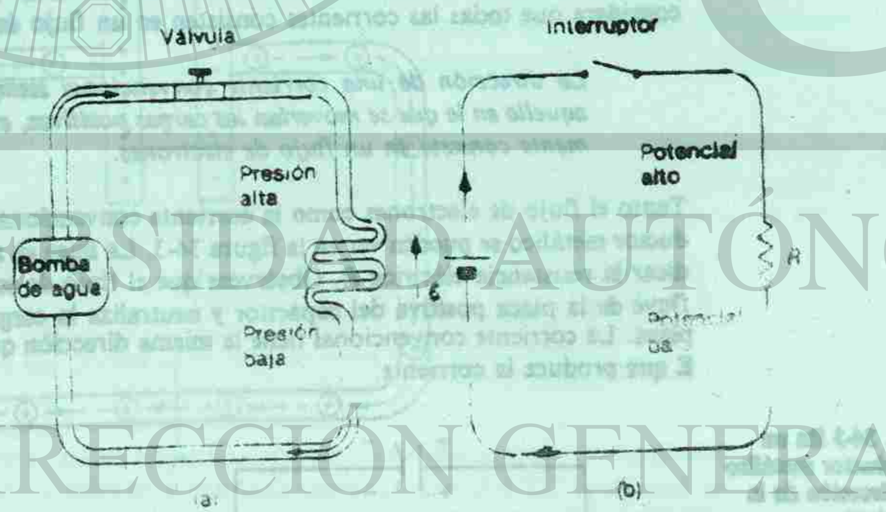
Las fuentes más familiares de fem son los acumuladores y los generadores: los acumuladores convierten la energía química en energía eléctrica y los generadores transforman energía mecánica en energía eléctrica. La naturaleza y operación detallada de estos dispositivos se estudiará en un capítulo posterior.

Una fuente de fuerza electromotriz (fem) es un dispositivo que convierte energía química, mecánica u otras formas de energía en la energía eléctrica necesaria para mantener un flujo continuo de carga eléctrica.

En un circuito eléctrico, la fuente de fem suele representarse mediante el símbolo $\mathcal{E}$.

La función de una fuente de fem en un circuito eléctrico es similar a la función de una bomba de agua para mantener el flujo continuo de agua a través de un sistema de tubería. En la figura 34-4*a* la bomba de agua debe realizar trabajo sobre cada unidad de volumen de agua necesario para reemplazar la pérdida de energía por cada unidad de carga que pase a través de esta a fin de elevarla a un potencial mayor. Este trabajo debe suministrarse con una rapidez igual a la rapidez con la cual se pierde la energía al fluir por el circuito.

Fig. 34-4 Para explicar la función de una fuente de fem en un circuito eléctrico, puede utilizarse la analogía mecánica de la bomba de agua.



Por conveniencia se ha supuesto que la corriente consiste en un flujo de carga positiva aunque en la mayor parte de los casos son electrones cuya carga es negativa. Por tanto, la carga pierde energía cuando pasa por el resistor desde un alto potencial a un bajo potencial. En la analogía hidráulica el agua pasa desde la presión alta a la baja. Cuando la válvula se cierra existe una presión pero no hay flujo de agua. En forma análoga, cuando el interruptor eléctrico está *abierto*, hay voltaje pero no corriente.

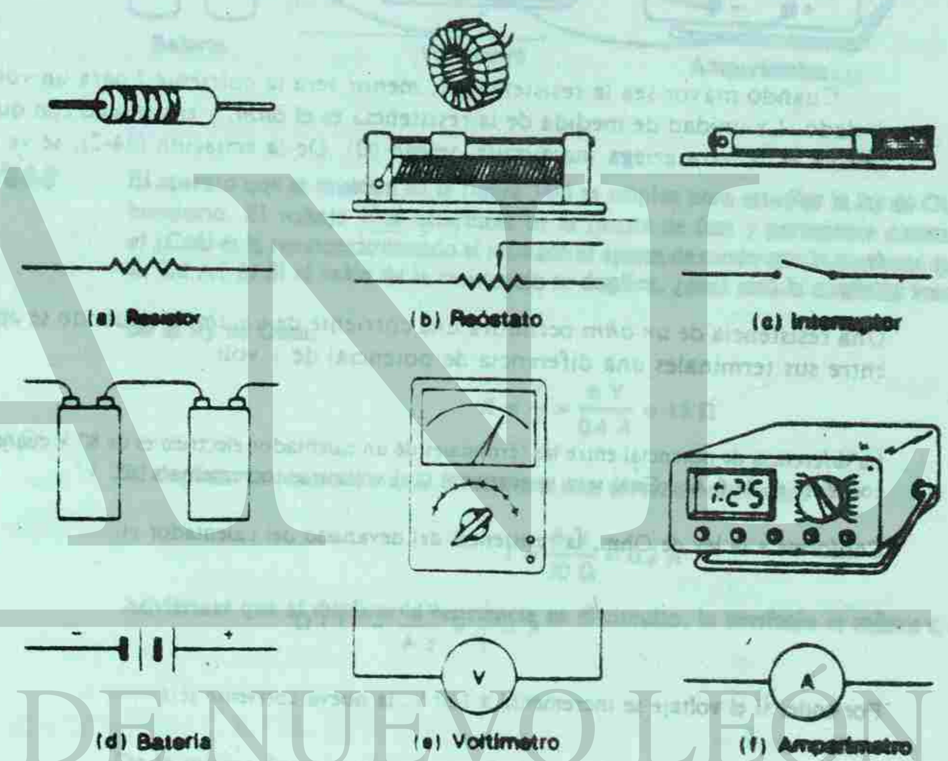
Puesto que la fem es trabajo por unidad de carga, se expresa con la misma unidad que la diferencia de potencial, o sea, el joule por coulomb, o volt.

Una fuente de fem de un volt realizará un joule de trabajo sobre cada coulomb de carga que pasa por ella.

Por ejemplo, un acumulador de 12 V realiza un trabajo de 12 J sobre cada coulomb de carga transferida desde el borne de bajo potencial (terminal negativa) al borne de alto potencial (terminal positiva). Suele dibujarse una flecha (↑) próxima al símbolo $\mathcal{E}$ de la fem para indicar la dirección en que la fuente actúa tan sólo para provocar movimiento de carga positiva por el circuito externo. La corriente convencional tiene una dirección de la terminal (+) del acumulador a la terminal (—) del mismo y la carga positiva fluye como la corriente a través de la resistencia externa perdiendo energía potencial.

En las siguientes secciones, los diagramas de circuitos semejantes a los mostrados en la figura 34-4*b* se usarán con frecuencia para describir sistemas eléctricos. Muchos de los símbolos que serán empleados se definen en la figura 34-5.

g. 34-5 Símbolos nvencionales que emplean en los agramas de cuitos eléctricos.



4 Y DE OHM; ESISTENCIA

La resistencia (*R*) es definida como la oposición al flujo de carga eléctrica. Aunque la mayor parte de los metales son buenos conductores de la electricidad, todos ofrecen alguna oposición al flujo de carga eléctrica que pasa a través de ellos. Esta resistencia eléctrica es estable para muchos materiales específicos de tamaño, forma y temperatura conocidos; es independiente de la fem aplicada y de la corriente que pasa a través de ella.

Los efectos de la resistencia al limitar el flujo de carga fueron primero estudiados cuantitativamente por George Simon Ohm en 1826; descubrió que *para un resistor dado, a determinada temperatura la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado.* Al igual que la velocidad del flujo de agua entre dos puntos depende de la diferencia de altura entre ellos, la rapidez del flujo de carga eléctrica entre dos puntos depende de la diferencia de potencial entre ellos. Esta proporcionalidad suele establecerse como *ley de Ohm:*

La corriente producida en cierto conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus puntos extremos.

La corriente I que se mide para determinado voltaje V es por ende una indicación de la resistencia. Matemáticamente, la resistencia R de un conductor dado puede calcularse de

$$R = \frac{V}{I} \qquad V = IR \tag{34-2}$$

Cuando mayor sea la resistencia R, menor será la corriente I para un voltaje V dado. La unidad de medida de la resistencia es el *ohm*, y el símbolo con que se denota es la letra griega mayúscula *omega* (Ω). De la ecuación (34-2), se ve que

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

Una resistencia de *un ohm* permitirá una corriente de *un ampere* cuando se aplica entre sus terminales una diferencia de potencial de 1 volt.

EJEMPLO 34-2 La diferencia de potencial entre las terminales de un calentador eléctrico es de 80 V cuando la corriente es de 6 A. ¿Cuál será la corriente si el voltaje se incrementa a 120 V?

Solución Conforme a la ley de Ohm, la resistencia del devanado del calentador es

$$R = \frac{V}{I} = \frac{80\ \text{V}}{6\ \text{A}} = 13.3\ \Omega$$

Por ende, si el voltaje se incrementa a 120 V, la nueva corriente será

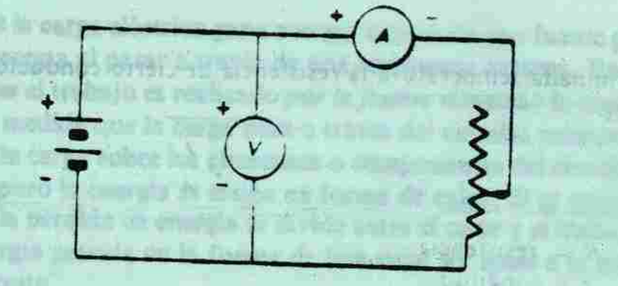
$$I = \frac{V}{R} = \frac{120\ \text{V}}{13.3\ \Omega} = 9\ \text{A}$$

Aquí se ha despreciado cualquier cambio en la resistencia debido a la temperatura del devanado del calentador.

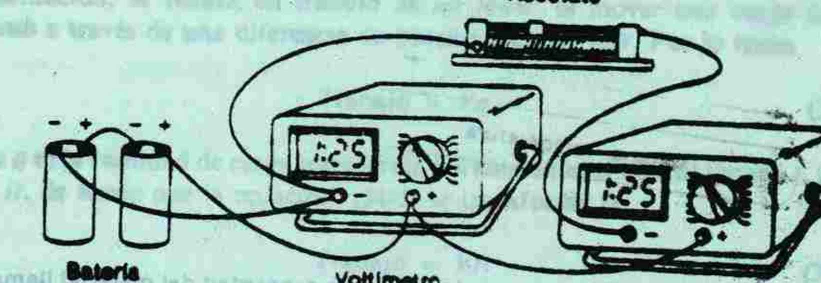
Cuatro dispositivos se usan comúnmente en el laboratorio para estudiar la ley de Ohm: batería, voltímetro, amperímetro y reóstato. Como sus nombres lo indican, el voltímetro y el amperímetro son dispositivos para medir voltaje y corriente. El reóstato es simplemente un resistor variable. Un contacto deslizable cambia el número de espiras de resistencia por la cual puede fluir la carga. En la figura 34-6 se muestran estos dispositivos de laboratorio.

Se debe estudiar el diagrama del circuito de la figura 34-6a y justificar las conexiones eléctricas indicadas en la figura 34-6b. Nótese que el voltímetro se conecta en paralelo con la batería en tanto que el amperímetro se conecta en serie. En general, las terminales positivas son de color rojo y las negativas son negras con base en el código de colores.

Fig. 34-6 ***a)*** **Diagrama de un circuito para el estudio de la ley de Ohm;** ***b)*** **Diagrama ilustrativo que demuestra cómo se conectan los diversos elementos de un circuito en el laboratorio.**



(a)



(b)

EJEMPLO 34-3 El aparato que se muestra en la figura 34-6 se emplea para estudiar la ley de Ohm en el laboratorio. El voltaje V se determina de la fuente de fem y permanece constante a 6 V. *a)* ¿Cuál es la resistencia cuando el reóstato se ajusta de modo que la corriente que indica es de 0.4 A? *b)* Si el valor de la resistencia se duplica, ¿cuál será la corriente resultante?

Solución a) De la ley de Ohm,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6\ \text{V}}{0.4\ \text{A}} = 15\ \Omega$$

Solución b) Al duplicar la resistencia a 30 Ω resultará una corriente expresada por

$$I = \frac{6\ \text{V}}{30\ \Omega} = 0.2\ \text{A}$$

Adviértase que al duplicar la resistencia en el circuito, la corriente se reduce a la mitad.

34-6 RESISTIVIDAD

De la misma forma que la capacitancia es independiente del voltaje y de la cantidad de carga, la resistencia de un conductor es independiente de la corriente y del voltaje; tanto la capacitancia como la resistencia son propiedades inherentes de un conductor. La resistencia de un alambre de área de sección transversal uniforme, como el mostrado en la figura 34-7, se determina a partir de los cuatro factores siguientes:

1. Tipo de material
2. Longitud
3. Área de la sección transversal
4. Temperatura

Ohm, el físico alemán que descubrió la ley que lleva su nombre, también comprobó que *la resistencia de un conductor a cierta temperatura es directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su área de sección transversal, y depende del material del cual esté hecho.*

A determinada temperatura la resistencia de cierto conductor **puede calcularse a** partir de

$$R = \rho \frac{l}{A} \qquad (34\text{-}7)$$

donde R = resistencia
l = longitud
A = área

Fig. 34-7 La resistencia de un alambre depende del tipo de material, longitud, área de la sección transversal y de la temperatura del alambre.

La constante de proporcionalidad ρ es una propiedad del material llamada ***resistividad***, expresada por

$$\rho = \frac{RA}{l} \qquad (34\text{-}8)$$

La resistividad varía marcadamente para diferentes materiales y también se ve afectada por cambios en la temperatura. Cuando R se expresa en ohms, A en metros cuadrados y l en metros, la unidad de resistividad es el ohm-metro ($\Omega \cdot m$):

$$\frac{\Omega (m^2)}{m} = \Omega \cdot m$$

en la tabla 34-1 se da una lista de las resistividades de varios metales comunes.

EJEMPLO 34-5 ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de 20 m de longitud y 0.8 mm de diámetro?

Solución Primero se obtiene el área de sección transversal del alambre en m^2.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(8 \times 10^{-4}\ m)^2}{4} = 5.03 \times 10^{-7}\ m^2$$

La resistividad del cobre es $1.72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$. Si se sustituye en la ecuación (34-8) da

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{(1.72 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m)(20\ m)}{5.03 \times 10^{-7}\ m^2}$$

$$= 0.684\ \Omega$$

Tabla 34-1 Resistividades de varios materiales a 20 °C

	Resistividad $\Omega \cdot m$
Aluminio	2.8×10^{-8}
Constantan	49×10^{-8}
Cobre	1.72×10^{-8}
Oro	2.2×10^{-8}
Hierro	9.5×10^{-8}
Nicrom	100×10^{-8}
Tungsteno	5.5×10^{-8}
Plata	1.63×10^{-8}

34-6 POTENCIA ELÉCTRICA Y PÉRDIDA DE CALOR

Se ha visto que la carga eléctrica gana energía dentro de una fuente **generadora de fem y pierde energía al pasar a través de una resistencia externa. En el interior de la fuente de fem el trabajo es realizado *por la fuente* elevando la energía potencial de la carga. A medida que la carga pasa a través del circuito externo el trabajo es efectuado *por* la carga sobre los elementos o componentes del circuito. En el caso de un resistor puro la energía se disipa en forma de calor. Si se conecta un motor en el circuito, la pérdida de energía se divide entre el calor y el trabajo útil. En cada caso la energía ganada en la fuente de fem debe ser igual a la energía perdida en todo el circuito.**

Considérese el trabajo efectuado dentro de la fuente de fem **con más detalle. Por definición, se realiza** un trabajo de ***un joule***, **al mover una carga de un *coulomb*** a través de una diferencia de potencial de ***un volt***. **Por lo tanto**

$$\text{Trabajo} = Vq \qquad (34\text{-}3)$$

donde q es la cantidad de carga transferida durante **un intervalo de tiempo t. Pero $q = It$,** de modo que la ecuación (34-3) se transforma **en**

$$\text{Trabajo} = VIt \qquad (34\text{-}4)$$

donde I es la corriente en ***coulombs por segundo***.
Este trabajo representa la energía **ganada** o **absorbida por la carga al pasar por la fuente de fem** durante el tiempo t. Una cantidad equivalente **de energía es disipada en forma** de calor cuando la carga se mueve a través de la **resistencia externa.**

La rapidez con la cual se disipa el calor **en un circuito eléctrico se denomina potencia consumida o disipada.** Cuando la carga **fluye en forma continua por el circuito, la potencia disipada o consumida se obtiene mediante**

$$P = \frac{\text{trabajo}}{t} = \frac{VIt}{t} = VI \qquad (34\text{-}5)$$

Cuando V se expresa en volts e I en amperes, la potencia consumida o disipada se mide en watts. El producto del voltaje y la corriente **dará la unidad de potencia, la cual puede demostrarse como sigue:**

$$(V)(A) = \frac{J}{C}\frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W$$

La ecuación (34-5) puede ser expresada de diversas formas con el empleo de la ley de Ohm ($V = IR$). Sustituyendo para V, puede escribirse

$$P = VI = I^2 R \qquad (34\text{-}6)$$

Si se sustituye para I en la ecuación (34-6) da otra variante:

$$P = VI = \frac{V^2}{R} \qquad (34\text{-}7)$$

La relación expresada por la ecuación (36-6) se emplea con mucha frecuencia en trabajos de electricidad ya que la pérdida de calor en un alambrado eléctrico con frecuencia es citada como potencia disipada "I —cuadrada— R".

RESUMEN

En ésta sección se introdujo el ampere como una unidad de corriente eléctrica , y se estudiaron las diferentes cantidades que afectan su magnitud . La ley de Ohm describe matemáticamente la relación entre corriente , resistencia y voltaje aplicado . También se estudiaron los factores que afectan la resistencia eléctrica y se aplicarpn éstos conceptos a la solución de problemas básicos de electricidad elemental . Los puntos más importantes se resumen a continuación :

+ La corriente eléctrica I es el flujo de carga Q que pasa por un punto dado en un conductor .

$$I = \frac{Q}{t} \qquad 1 \text{ ampere } (A) = \frac{1 \text{ coulomb } (C)}{1 \text{ segundo } (s)}$$

+ Por convención , la dirección de la corriente eléctrica es la dirección en que las cargas positivas se moverían , aún si la corriente real consiste en un flujo de electrones cargados negativamente .
+ La ley de Ohm establece que la corriente producida en un conductor dado es directamente propórcional a la diferencia de potencial entre sus extremos :

$$R = \frac{V}{I} \qquad V = I.R \qquad \text{Ley de Ohm}$$

El símbolo R representa la resistencia en ohms (Ω) definida como

$$1 \text{ Ohm } (\Omega) = \frac{1 \text{ ampere } (A)}{1 \text{ volt } (V)}$$

+ La potencia eléctrica en watts se da por cualquiera de las siguientes expresiones :

$$P = VI \qquad P = I^2R \qquad P = \frac{V^2}{R} \qquad \textbf{POTENCIA}$$

+ La resistencia de un alambre depende de cuatro factores : a) el tipo de material , b) la longitud , c) el área de la sección transversal y d) la temperatura . Al introducir una propiedad del material denominada resistividad ρ , se puede escribir :

$$R = \rho\frac{l}{A} \qquad \rho = \frac{RA}{l}$$

PREGUNTAS

1.- Defínase los siguientes términos

a) corrientes	b) Resistencia	c) Ampere (unidad)
d) Fem	e) Ohm (unidad)	f) Reóstato
g) Amperímetro	h) Voltímetro	i) Potencia eléctrica

2.- ¿ Es la fuerza electromotriz en realidad una fuerza ? ¿ Cuál es la función de una fuente de fem

3.- ¿ Cuál es el error en el siguiente enunciado La resistividad de un material es directamente proporcional a su longitud.

PROBLEMAS

1.- ¿ Cuántos electrones pasan cada segundo por un punto en un alambre por el que circulan 20 A ? ¿ Cuánto tiempo es necesario para transportar una carga de 40 C más allá de este punto ? RESPUESTA : 1.25×10^{20} electrones , 2 seg.

2.-Si 600 C de carga pasan por un punto dado en 3 seg. ¿ cuál es la corriente eléctrica en amperes ?

3.- Encuéntrese la corriente en amperes si 690 C de carga circulan por un alambre en dos minutos .

4.- Si una corriente de 24 A se mantiene durante 50 seg. ¿ cuántos coulombs de carga han pasado a través del alambre ?

5.- a) ¿ cuál es la caída de potencial a través de un resistor de 4 Ω cuando por él circula una corriente de 8 A ? b)¿ cuál es la resistencia de un reóstato si la caída de potencial es de 48 V , y la corriente de 4 A ? c) Determine la corriente a través de un resistor de 5 Ω que tiene una caída de potencial de 40 V a lo largo del mismo ?

6.- Un fusible de 2A es colocado en un circuito con un acumulador que tiene un voltaje de 12 V en sus terminales . ¿ Cuál es la resistencia mínima para un circuito que contenga este fusible ?

7.- Un dispositivo para soldar emplea 0.75 A a 120 V . ¿ Cuál es su resistencia ? ¿ Cuánta energía utilizará en 15 min. ?

8.- Una lampara eléctrica tiene un filamento de 80 Ω conectado a una linea de corriente directa de 110 V . ¿ Cuál es la corriente que circula por el filamento ? ¿ Cuál es la potencia disipada en watts ? RESPUESTA : 1.38 A ; 151 W

9.- Un horno de corriente directa de 120 V suministra 2.4 kW a un generador eléctrico . ¿ Cuál es la corriente suministrada ? , ¿ Cuál es la resistencia encontrada ?

10.-Un calefactor radiante de 110 V toma una corriente de 6A . ¿ Cuánta energía térmica en joules suministra en una hora ?

11.-Un resistor de 20 Ω tiene una potencia de régimen de 100 W Determínese los valores máximos de corriente y voltaje que pueden ser suministradas en estas condiciones .

12.- ¿ Cuál es la resistencia de un alambre de hierro de 200 pies de longitud y un diámetro de 0.002 pulg.a 20° C ?

13.-¿ Qué longitud de alambre de cobre de 1/16 de pulgada de diámetro es necesaria para construir un resistor de 20 Ω a 20°C?

14.-Determínese la resistencia de 40 m de alambre de cobre de 0.8 mm de diámetro a 20° C.

15.-Un alambre de nicrom tiene una longitud de 40 m a 20°C . Si resistencia total es de 500 Ω , ¿ cuál es du diámetro ?

EJEMPLO 34-4 Una corriente de 6 A fluye por una resistencia de 300 Ω durante una hora. ¿Cuál es la potencia disipada? ¿Cuánto calor se genera en joules?

Solución De la ecuación (34-6),

$$P = I^2R = (6\ A)^2(300\ \Omega) = 10.800\ W$$

Ya que la potencia representa el calor disipado en la unidad de tiempo, se obtiene

$$\text{Trabajo} = Pt = (10\ 800\ W)\ (3600\ s)$$
$$\text{Pérdida de calor} = 3.89 \times 10^7\ J$$

Esto representa alrededor de 36 900 Btu.

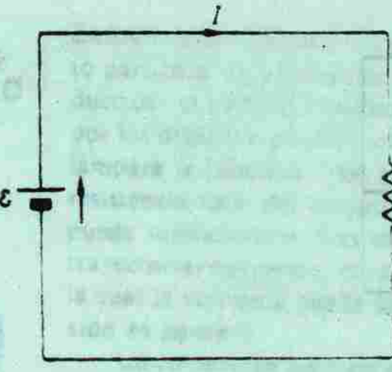
Circuitos de corriente continua

Se usan dos tipos de corriente; la corriente continua (cc) es el flujo continuo de carga en una sola dirección; la corriente alterna (ca) es un flujo de carga que cambia en forma constante su magnitud y dirección. En este capítulo se analiza la corriente, el voltaje y la resistencia para circuitos de cc. Muchos de los mismos métodos y procedimientos también pueden aplicarse a los circuitos de ca. Las variaciones requeridas para las corrientes alternas se apoyan lógicamente en un fundamento firme en el análisis de las corrientes continuas.

35-1 CIRCUITOS SIMPLES; RESISTORES EN SERIE

Un circuito eléctrico consta de cierta cantidad de ramas unidas entre sí de tal forma que cuando menos se tiene una trayectoria cerrada para que circule la corriente. El circuito más simple consta de una sola fuente de fem conectada a una resistencia externa, como se muestra en la figura 35-1. Si ℰ representa la fem y R indica la resistencia total, de la ley de Ohm se obtiene

$$\mathcal{E} = IR$$



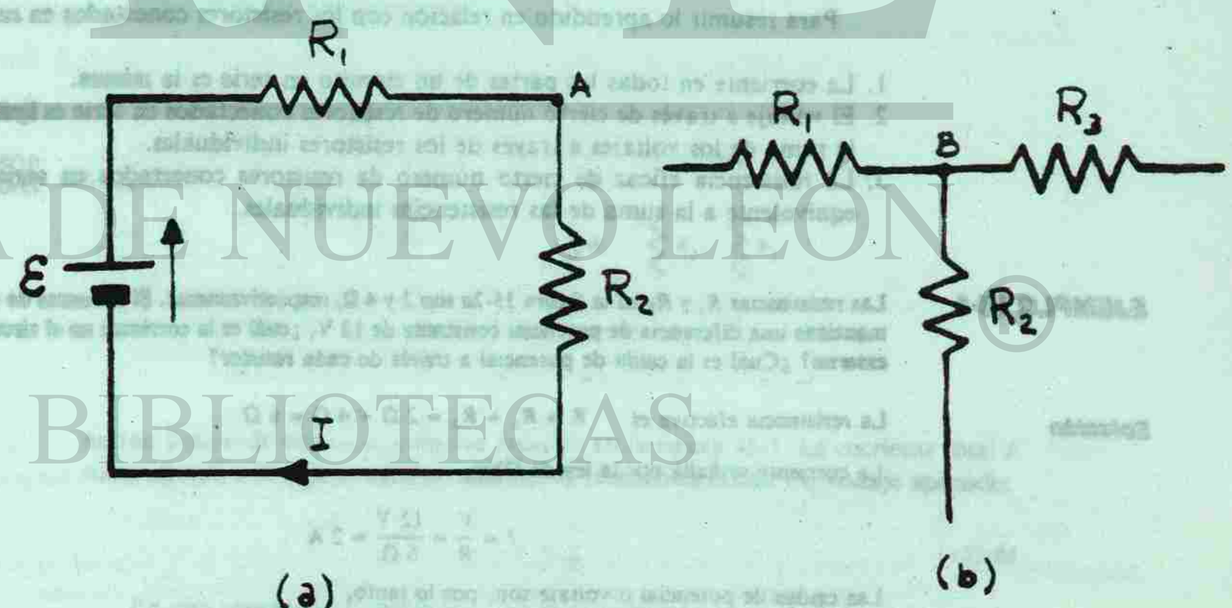
…1 Circuito …o elemental.

donde I es la corriente a través del circuito. Toda la energía ganada por la carga al pasar a través de la fuente de fem es perdida al fluir a través de la resistencia.

Considérese la adición de cierto número de elementos a un circuito. Se dice que dos o más elementos están en *serie* si ellos solamente tienen un punto en común que no se encuentra conectado a un tercer elemento. La corriente sólo puede fluir por una trayectoria a través de los elementos conectados en serie. Los resistores R_1 y R_2 de la figura 35-2*a* están en serie debido a que el punto A es común a ambos resistores. Los resistores en la figura 35-2*b*, empero, no están en serie ya que el punto B es común a las tres ramas de corriente. La corriente eléctrica que entra a la unión puede seguir dos trayectorias por separado.

Considérese que tres resistores (R_1, R_2 y R_3) están conectados en serie y encerrados en una caja, como se indica por la porción sombreada de la figura 35-3. La resistencia eficaz R de los tres resistores puede determinarse a partir del voltaje externo V y la corriente I, valores que pueden registrarse mediante medidores. De la ley de Ohm

$$R = \frac{V}{I} \tag{35-2}$$



…35-2 *a)* Resistores …conectados en … *b)* Resistores …conectados en …

EJEMPLO 34-4 Una corriente de 6 A fluye por una resistencia de 300 Ω durante una hora. ¿Cuál es la potencia disipada? ¿Cuánto calor se genera en joules?

Solución De la ecuación (34-6),

$$P = I^2R = (6\ A)^2(300\ \Omega) = 10.800\ W$$

Ya que la potencia representa el calor disipado en la unidad de tiempo, se obtiene

$$\text{Trabajo} = Pt = (10\,800\ W)(3600\ s)$$
$$\text{Pérdida de calor} = 3.89 \times 10^7\ J$$

Esto representa alrededor de 36 900 Btu.

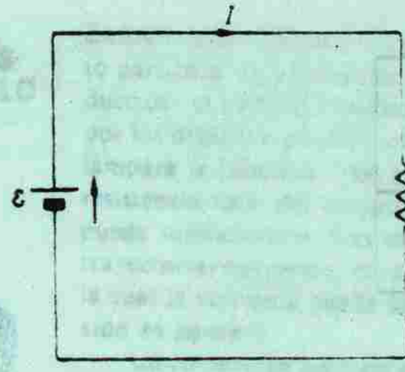
Circuitos de corriente continua

Se usan dos tipos de corriente; la corriente continua (cc) es el flujo continuo de carga en una sola dirección; la corriente alterna (ca) es un flujo de carga que cambia en forma constante su magnitud y dirección. En este capítulo se analiza la corriente, el voltaje y la resistencia para circuitos de cc. Muchos de los mismos métodos y procedimientos también pueden aplicarse a los circuitos de ca. Las variaciones requeridas para las corrientes alternas se apoyan lógicamente en un fundamento firme en el análisis de las corrientes continuas.

35-1 CIRCUITOS SIMPLES; RESISTORES EN SERIE

Un circuito eléctrico consta de cierta cantidad de ramas unidas entre sí de tal forma que cuando menos se tiene una trayectoria cerrada para que circule la corriente. El circuito más simple consta de una sola fuente de fem conectada a una resistencia externa, como se muestra en la figura 35-1. Si $\mathcal{E}$ representa la fem y R indica la resistencia total, de la ley de Ohm se obtiene

$$\mathcal{E} = IR$$



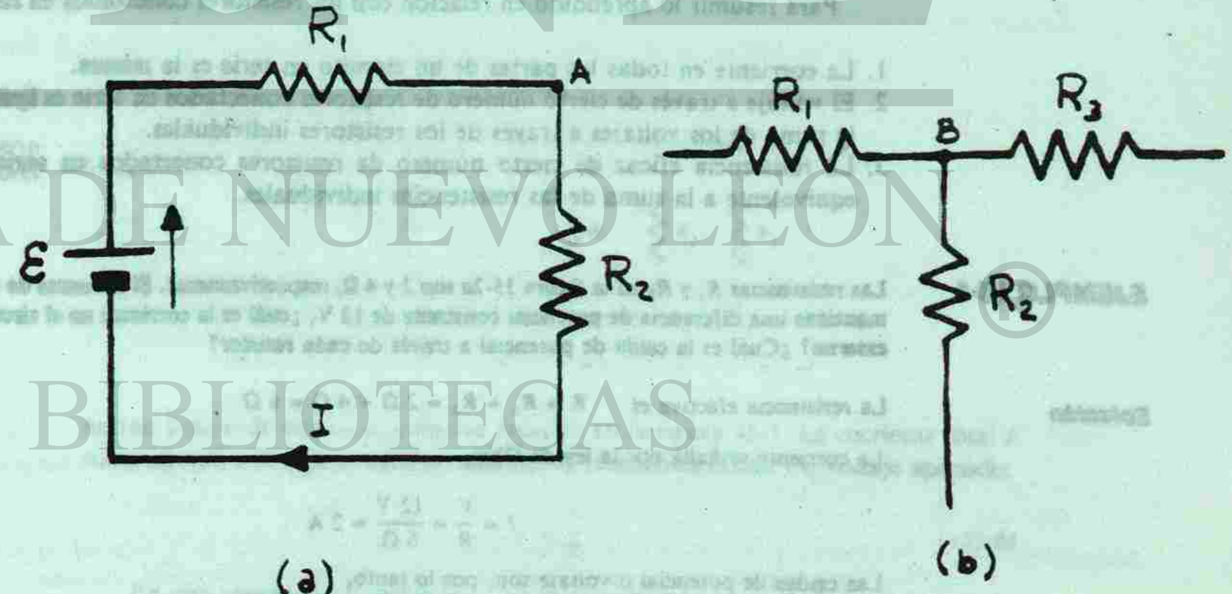
…1 Circuito …o elemental.

donde I es la corriente a través del circuito. Toda la energía ganada por la carga al pasar a través de la fuente de fem es perdida al fluir a través de la resistencia.

Considérese la adición de cierto número de elementos a un circuito. Se dice que dos o más elementos están en *serie* si ellos solamente tienen un punto en común que no se encuentra conectado a un tercer elemento. La corriente sólo puede fluir por una trayectoria a través de los elementos conectados en serie. Los resistores R_1 y R_2 de la figura 35-2*a* están en serie debido a que el punto A es común a ambos resistores. Los resistores en la figura 35-2*b*, empero, no están en serie ya que el punto B es común a las tres ramas de corriente. La corriente eléctrica que entra a la unión puede seguir dos trayectorias por separado.

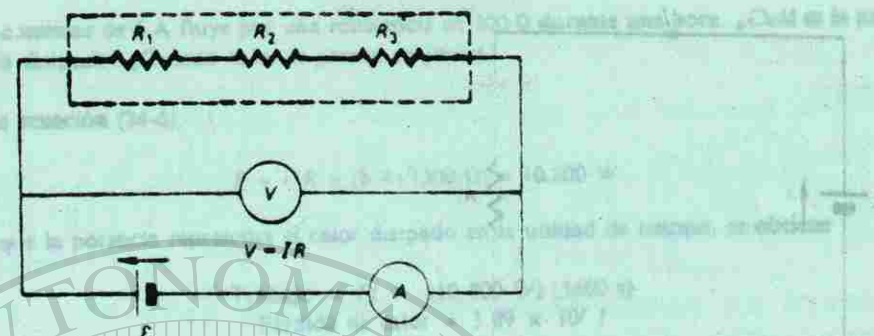
Considérese que tres resistores (R_1, R_2 y R_3) están conectados en serie y encerrados en una caja, como se indica por la porción sombreada de la figura 35-3. La resistencia eficaz R de los tres resistores puede determinarse a partir del voltaje externo V y la corriente I, valores que pueden registrarse mediante medidores. De la ley de Ohm

$$R = \frac{V}{I} \tag{35-2}$$



…35-2 *a)* Resisto… …conectados en … *b)* Resistores …conectados en …

Fig. 35-3 Método del voltímetro-amperímetro para medir la resistencia eficaz de un número de resistores conectados en serie.



Pero, ¿cuál es la relación de R con las tres resistencias internas? La corriente que circula por cada resistor debe ser idéntica puesto que sólo se tiene una sola trayectoria. Así pues,

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \tag{35-3}$$

Si se utiliza este hecho y se advierte que la ley de Ohm se aplica por igual a cualquier parte de un circuito, se escribe

$$V = IR \qquad V_1 = IR_1 \qquad V_2 = IR_2 \qquad V_3 = IR_3 \tag{35-4}$$

El voltaje externo V representa la suma de las energías perdidas por unidad de carga al circular a través de cada resistencia. De aquí que

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Finalmente, si se sustituye de la ecuación (35-4) y se divide entre la corriente, se obtiene

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$\boxed{R = R_1 + R_2 + R_3} \qquad \textit{resistores en serie} \tag{35-5}$$

Para resumir lo aprendido en relación con los resistores conectados en *serie:*

1. La corriente en todas las partes de un circuito en serie es la misma.
2. El voltaje a través de cierto número de resistores conectados en serie es igual a la suma de los voltajes a través de los resistores individuales.
3. La resistencia eficaz de cierto número de resistores conectados en serie es equivalente a la suma de las resistencias individuales.

EJEMPLO 35-1

Las resistencias R_1 y R_2 en la figura 35-2a son 2 y 4 Ω, respectivamente. Si la fuente de fem mantiene una diferencia de potencial constante de 12 V, ¿cuál es la corriente en el circuito externo? ¿Cuál es la caída de potencial a través de cada resistor?

Solución

La resistencia efectiva es $\quad R = R_1 + R_2 = 2\ \Omega + 4\ \Omega = 6\ \Omega$

La corriente se halla por la ley de Ohm

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

Las caídas de potencial o voltaje son, por lo tanto,

$$V_1 = IR_1 = (2\ \text{A})(2\ \Omega) = 4\ \text{V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2\ \text{A})(4\ \Omega) = 8\ \text{V}$$

Nótese que la suma de las caídas de voltaje ($V_1 + V_2$) es igual al voltaje aplicado, 12 V.

35-2 RESISTORES EN PARALELO

Existen varias limitaciones en la operación de los circuitos en serie. Si un elemento particular en un circuito en serie falla en proporcionar una trayectoria de conducción, el circuito completo se abre y cesa la corriente. Será muy molesto si todos los dispositivos eléctricos en una casa dejaran de funcionar cada vez que una lámpara se fundiera. Más aún, cada elemento en un circuito en serie hace que la resistencia total del circuito aumente, y este hecho limita la corriente total que puede suministrarse. Las objeciones anteriores pueden evitarse si se dispone de trayectorias opcionales para la corriente eléctrica. A una conexión de este tipo, en la cual la corriente puede dividirse entre dos o más elementos, se la llama *conexión en paralelo*.

Un *circuito en paralelo* es aquel en el que dos o más componentes o elementos conectan a dos puntos comunes en el circuito. Por ejemplo, en la figura 35-4 los resistores R_2 y R_3 están en paralelo puesto que ambos tienen en común los puntos A y B. Obsérvese que la corriente I suministrada por la fuente de fem se divide entre los resistores R_2 y R_3.

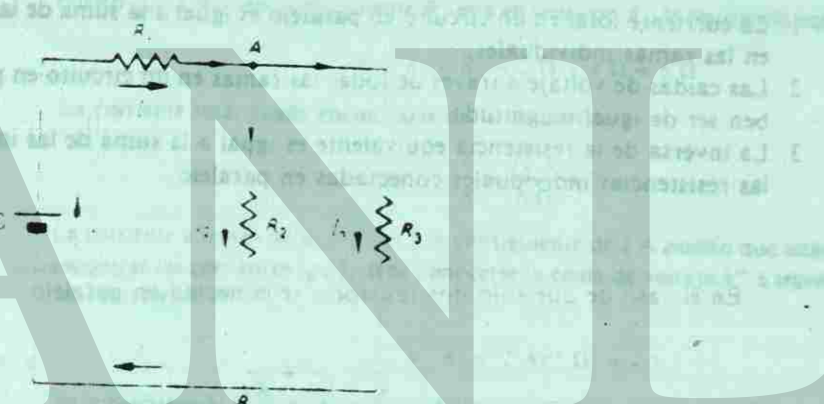
Para llegar a una expresión de la resistencia equivalente R de un número de resistencias conectadas en paralelo, se sigue un procedimiento similar al estudiado para conexiones en serie. Supóngase que tres resistores (R_1, R_2 y R_3) se conectan dentro de una caja, como se muestra en la figura 35-5. La corriente total I suministrada a la caja es determinada por la resistencia eficaz y el voltaje aplicado:

$$I = \frac{V}{R} \tag{35-6}$$

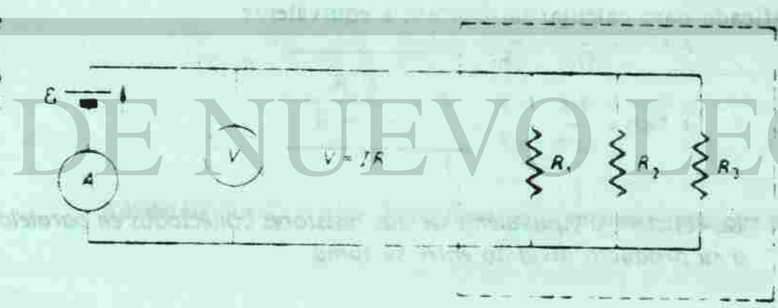
En una conexión en paralelo, la caída de voltaje a través de cada resistor es la misma y es equivalente a la caída total de voltaje.

$$V = V_1 = V_2 = V_3 \tag{35-7}$$

g. 35-4 Los resistores R_2 y R_3 están conectados en paralelo.



g. 35-5 Cálculo de resistencia equivalente de cierto número de resistores conectados en paralelo.



Puede verse que esto es cierto si se considera que la misma energía debe perderse por unidad de carga independientemente de la trayectoria que recorre en el circuito. En este ejemplo puede fluir carga a través de cualquiera de los tres resistores. De esta forma la corriente total suministrada se divide entre los resistores.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \tag{35-8}$$

Al aplicar la ley de Ohm a la ecuación (35-8) se obtiene

$$\frac{V}{R} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

Pero como los voltajes son iguales, se puede dividir entre el voltaje para conseguir

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \qquad \textit{resistores en paralelo} \tag{35-9}$$

En resumen, para resistores conectados en paralelo:

1. La corriente total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las corrientes en las ramas individuales.
2. Las caídas de voltaje a través de todas las ramas en un circuito en paralelo deben ser de igual magnitud.
3. La inversa de la resistencia equivalente es igual a la suma de las inversas o de las resistencias individuales conectadas en paralelo.

En el caso de que sólo dos resistores se conectan en paralelo

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

y si esta ecuación se resuelve algebraicamente para R, se obtiene una fórmula simplificada para calcular la resistencia equivalente

$$\boxed{R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \tag{35-10}$$

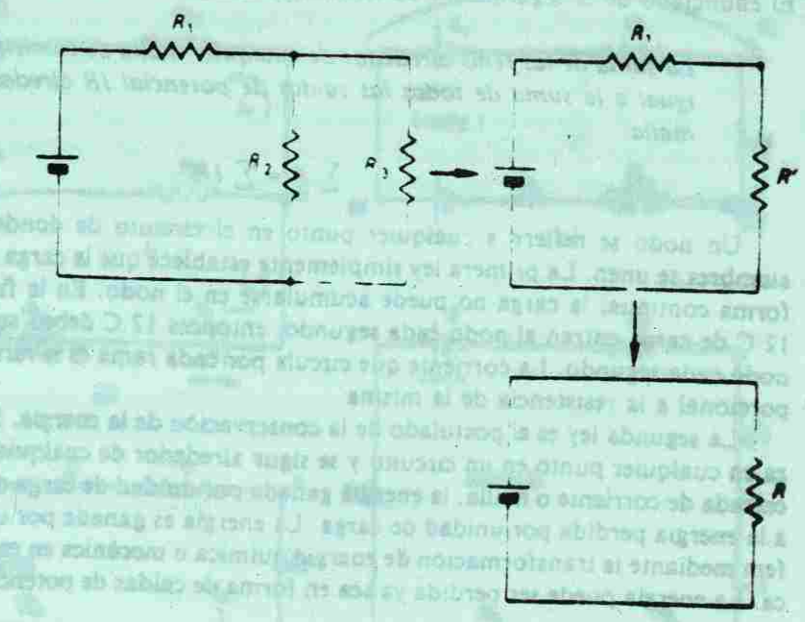
La resistencia equivalente de dos resistores conectados en paralelo es igual a su producto dividido entre su suma.

EJEMPLO 35-2 El voltaje total aplicado al circuito de la figura 35-4 es de 12 V, y las resistencias R_1, R_2 y R_3 son de 4, 3 y 6 Ω, respectivamente. *a)* Determínese la resistencia equivalente del circuito. *b)* ¿Cuál es la corriente que circula por cada resistor?

Solución a) El mejor procedimiento para resolver el problema que contiene tanto resistores en serie como en paralelo consiste en reducir el circuito mediante pasos a su forma más simple, como se muestra en la figura 35-6. El primer paso consiste en determinar la resistencia R' del par de resistores R_2 y R_3.

$$R' = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{(3\ \Omega)(6\ \Omega)}{(3 + 6)\Omega} = 2\ \Omega$$

Fig. 35-6 Forma de reducir un circuito completo a un circuito equivalente simple.



Puesto que la resistencia equivalente R' está en serie con R_1, la resistencia equivalente total es

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

Solución b) La corriente total puede encontrarse de la ley de Ohm:

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

La corriente a través de R_1 y R' es por consiguiente de 2 A puesto que están en serie. Para encontrar las corrientes I_2 e I_3 debe conocerse la caída de voltaje V' a través de la resistencia equivalente R'

$$V' = IR' = (2\ \text{A})(2\ \Omega) = 4\ \text{V}$$

en consecuencia, la caída de potencial debe ser de 4 V a través de cada uno de los resistores R_2 y R_3. Las corrientes se encuentran a partir de la ley de Ohm:

$$I_2 = \frac{V'}{R_2} = \frac{4\ \text{V}}{3\ \Omega} = 1.33\ \text{A}$$

$$I_3 = \frac{V'}{R_3} = \frac{4\ \text{V}}{6\ \Omega} = 0.67\ \text{A}$$

Adviértase que $I_2 + I_3 = 2$ A, la cual es la corriente total que circula por el circuito.

35-6 LEYES DE KIRCHHOFF

Una red eléctrica es un circuito complejo que consta de cierto número de trayectorias cerradas de corrientes o mallas. Para redes complejas que contienen varias mallas y determinado número de fuentes de fem resulta difícil aplicar la ley de Ohm. Un procedimiento más directo para analizar circuitos de este tipo fue desarrollado en el siglo XIX por Gustav Kirchhoff, un científico alemán. Su método comprende la aplicación de dos leyes. *La primera ley de Kirchhoff* es:

La suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen del mismo nodo.

$$\sum I_{\text{entran}} = \sum I_{\text{salen}} \tag{35-16}$$

El enunciado de la *segunda ley de Kirchhoff* establece:

> ***La suma de las fems alrededor de cualquier malla de corriente cerrada es igual a la suma de todas las caídas de potencial IR alrededor de dicha malla.***

$$\sum \mathcal{E} = \sum IR \qquad (35\text{-}17)$$

Un nodo se refiere a cualquier punto en el circuito de donde tres o más alambres se unen. La primera ley simplemente establece que la carga debe fluir en forma continua; la carga no puede acumularse en el nodo. En la figura 35-9, si 12 C de carga entran al nodo cada segundo, entonces 12 C deben salir o dejar el nodo cada segundo. La corriente que circula por cada rama es inversamente proporcional a la resistencia de la misma.

La segunda ley es el postulado de la conservación de la energía. Si se comienza en cualquier punto en un circuito y se sigue alrededor de cualquier trayectoria cerrada de corriente o malla, la energía ganada por unidad de carga debe ser igual a la energía perdida por unidad de carga. La energía es ganada por una fuente de fem mediante la transformación de energía química o mecánica en energía eléctrica. La energía puede ser perdida ya sea en forma de caídas de potencial *IR* o en el

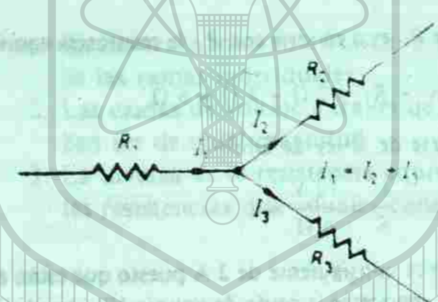


Fig. 35-9 La suma de las corrientes que entran a un nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen del mismo.

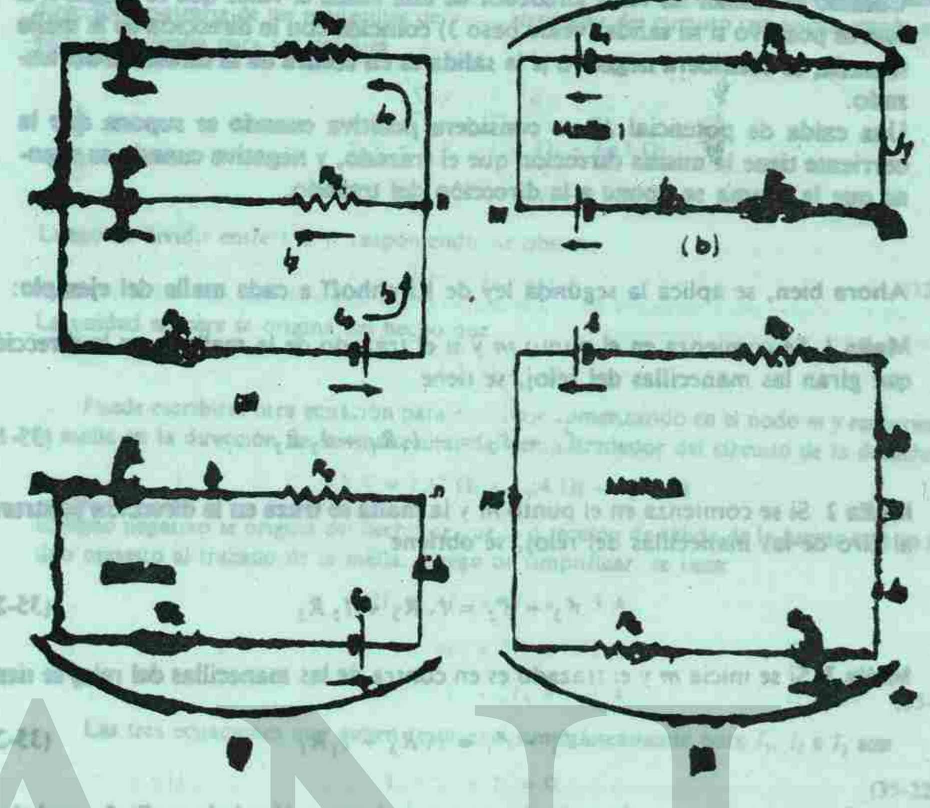
proceso de revertir la corriente a través de la fuente de fem. En este último caso la energía eléctrica se transforma en la energía química necesaria para cargar un acumulador o la energía eléctrica se transforma en energía mecánica en la operación de un motor.

En la aplicación de las reglas o leyes de Kirchhoff deben seguirse procedimientos bien definidos. Los pasos del procedimiento general serán presentados al considerar el ejemplo ofrecido por la figura 35-10*a*.

1. Se supone una dirección de la corriente para cada malla de la red.

Las tres mallas que pueden considerarse son las que se muestran en la figura 35-10*b*, *c* y *d*. Se supone que la corriente I_1 fluye en contra de las manecillas del reloj en la parte superior de la malla, que I_2 circula a la izquierda en la rama de en medio y la I_3 fluye en contra de las manecillas del reloj en la malla inferior. Si las suposiciones son correctas, la solución del problema dará un valor positivo para las corrientes; si son incorrectas, un valor negativo indicará que la corriente circula realmente en dirección opuesta.

…0 Aplica- …las leyes de …ff a una red



2. Se aplica la primera ley de Kirchhoff para escribir una ecuación de corriente para todos y cada uno de los nodos.

Si se escribe la ecuación de corriente para *todos* los nodos, daría como resultado una ecuación duplicada. En este ejemplo hay dos nodos que han sido identificados como *m* y *n*, respectivamente. La ecuación para la corriente en el nodo *m* es

$$\sum I_{entrar} = \sum I_{salir}$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \qquad (35\text{-}18)$$

La misma ecuación resultaría si se considerara el nodo *n*, sin que se llegue a obtener nueva información.

3. **Indíquese por medio de una flecha pequeña, dibujada próxima al símbolo para cada fem, la dirección en la cual la fuente, actuando sola, provocaría que una carga positiva se moviera por el circuito.**

En este ejemplo, $\mathcal{E}_1$ y $\mathcal{E}_2$ están dirigidas hacia la izquierda, y $\mathcal{E}_3$ a la derecha.

4. **Se aplica la segunda ley de Kirchhoff ($\sum \mathcal{E} = \sum IR$) a cada malla una sola vez. Habrá una ecuación para cada malla.**

Al aplicar la segunda ley de Kirchhoff, se debe comenzar en un punto específico de una malla y al *trazarla* alrededor de un circuito se hará en una dirección uniforme de modo que regrese al punto de partida. La selección de la *dirección del trazado* es arbitraria pero, una vez establecida, se considera la dirección positiva (+) por la convención de signos. (En la Fig. 35-10 se trazan las direcciones para las tres mallas del ejemplo citado.) Se aplican las siguientes convenciones de signos:

1. Cuando se suman las fems alrededor de una malla el valor que se asigna a la fem es positivo si su salida (véase paso 3) coincide con la dirección de la malla trazada; se considera negativo si la salida es en contra de la dirección del trazado.
2. Una caída de potencial IR se considera positiva cuando se supone que la corriente tiene la misma dirección que el trazado, y negativa cuando se supone que la misma se opone a la dirección del trazado.

Ahora bien, se aplica la segunda ley de Kirchhoff a cada malla del ejemplo:

Malla 1 Se comienza en el punto m y si el trazado de la malla es en la dirección que giran las manecillas del reloj, se tiene

$$-\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = -I_1R_1 + I_2R_2 \tag{35-19}$$

Malla 2 Si se comienza en el punto m y la malla se traza en la dirección contraria al giro de las manecillas del reloj, se obtiene

$$\mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_2 = I_3R_3 + I_2R_2 \tag{35-20}$$

Malla 3 Si se inicia en m y el trazado es en contra de las manecillas del reloj se tiene

$$\mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_1 = I_3R_3 + I_1R_1 \tag{35-21}$$

Si la ecuación para la malla 1 se resta de la ecuación de la malla 2, se obtiene la ecuación para la malla 3, lo que demuestra que la última ecuación no contiene nueva información.

Se tienen tres ecuaciones independientes que sólo contienen tres incógnitas. Para encontrar las incógnitas, las ecuaciones pueden resolverse simultáneamente, y la ecuación de la tercera malla puede utilizarse para verificar los resultados.

EJEMPLO 35-6 Resuélvase para las corrientes desconocidas de la figura 35-11 aplicando las leyes de Kirchhoff.

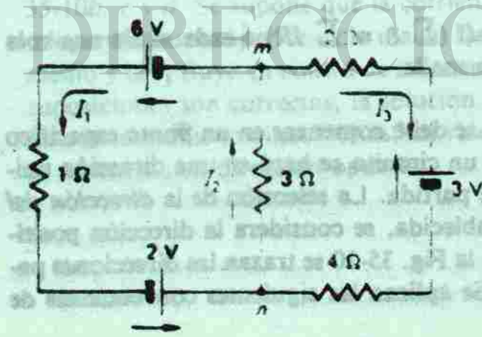
Solución Como se ve en la figura, se indican las direcciones que se suponen para las corrientes I_1, I_2 e I_3. Si se aplica la primera ley de Kirchhoff al nodo m, se obtiene

$$\sum I \text{ (entran)} = \sum I \text{ (salen)}$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{35-22}$$

Luego, la dirección de la salida positiva se indica en la figura adyacente a cada fuente de fem. Puesto que hay tres incógnitas, se requieren al menos dos ecuaciones más que resultan

Fig. 35-11



de la aplicación de la segunda ley de Kirchhoff. Si se comienza en m y se recorre la malla en dirección contraria de las manecillas del reloj alrededor del circuito izquierdo, puede escribirse la ecuación para los voltajes

$$\sum \mathcal{E} = \sum IR$$

$$6\text{ V} + 2\text{ V} = I_1(1\ \Omega) + I_2(3\ \Omega)$$

$$8\text{ V} = (1\ \Omega)I_1 + (3\ \Omega)I_2$$

Luego de dividir entre 1 Ω y trasponiendo, se obtiene

$$I_1 + 3I_2 = 8\text{ A} \tag{35-23}$$

La unidad ampere se origina del hecho que

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

Puede escribirse otra ecuación para el voltaje comenzando en el nodo m y recorriendo la malla en la dirección de las manecillas del reloj alrededor del circuito de la derecha:

$$-3\text{ V} = I_3(2\ \Omega) + I_3(4\ \Omega) + I_2(3\ \Omega)$$

El signo negativo se origina del hecho de que la dirección de salida de la fuente está en sentido opuesto al trazado de la malla. Luego de simplificar, se tiene

$$2I_3 + 4I_3 + 3I_2 = -3\text{ A}$$

$$6I_3 + 3I_2 = -3\text{ A}$$

$$I_2 + 2I_3 = -1\text{ A} \tag{35-24}$$

Las tres ecuaciones que deben resolverse simultáneamente para I_1, I_2 e I_3 son

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \tag{35-22}$$

$$I_1 + 3I_2 = 8\text{ A} \tag{36-23}$$

$$I_2 + 2I_3 = -1\text{ A} \tag{35-24}$$

De la ecuación (35-22), se observa que

$$I_1 = I_2 - I_3$$

La cual, si se sustituye en la ecuación (35-23) se consigue

$$(I_2 - I_3) + 3I_2 = 8\text{ A}$$

$$4I_2 - I_3 = 8\text{ A} \tag{35-25}$$

A continuación pueden resolverse las ecuaciones (35-24) y (35-25) simultáneamente por la eliminación de I_3 de las dos ecuaciones:

$$\begin{array}{rrcl} (35\text{-}24) & I_2 + 2I_3 & = & -1\text{ A} \\ 2 \times (35\text{-}25) & 8I_2 - 2I_3 & = & 16\text{ A} \\ \hline & 9I_2 & = & 15\text{ A} \\ & I_2 & = & 1.67\text{ A} \end{array}$$

Si se sustituye $I_2 = 1.67$ A en las ecuaciones (35-23) y (35-24) se obtienen los valores para las otras corrientes:

$$I_1 = 3\text{ A} \qquad I_3 = -1.33\text{ A}$$

El valor negativo que se obtuvo para I_3 indica que la dirección de la corriente supuesta era incorrecta. En realidad, la corriente fluye en dirección contraria al sentido supuesto. Sin embargo, en los problemas de trabajo debe retenerse el signo menos hasta que se hayan determinado todas las incógnitas.

Para verificar los resultados anteriores puede escribirse una ecuación de voltaje extra al aplicar la segunda ley de Kirchhoff a la malla exterior. Si se comienza en m y el trazado de la misma es en contra de las manecillas del reloj, se obtiene

$$(6 + 2 + 3)\ V = I_1(1\ \Omega) - I_3(4\ \Omega) - I_3(2\ \Omega)$$

$$I_1 - 6I_3 = 11\ A$$

Al sustituir en I_1 e I_3 se obtiene

$$3\ A - (6)(-1.33\ A) = 11\ A$$

$$11\ A = 11\ A \qquad \textbf{Verificación}$$

Nótese otra vez que el valor negativo de I_3 fue usado en las matemáticas aun cuando este valor indica una suposición incorrecta.

RESUMEN

Es esencial la comprensión de circuitos de corriente continua **como introducción** a la tecnología eléctrica . La mayor parte de los **estudios avanzados se basan** en las ideas presentadas **en ésta sección Se deberá revisar** con detalle cualquier apartado que no haya **quedado suficientemente** clara . A continuación se presenta **un resumen de las principales** relaciones :

- En los circuitos de cc , los resistores pueden conectarse en serie ó en paralelo .
  - **a) Para conexiones en serie** , la corriente en todas **las partes del circuito es la misma** , la caída de potencial **es la suma de las caídas** individuales a través de cada resistor , y la **resistencia efectiva** es igual a la suma de las **resistencias individuales** :

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 \qquad V_t = V_1 + V_2 + V_3$$

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 \qquad \text{CONEXIONES EN SERIE}$$

  - **b) Para conexiones** en paralelo , la corriente total **es la suma de las corriente** individuales ; la caída de **potencial es igual y la resistencia** efectiva es dada por :

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 \qquad V_t = V_1 = V_2 = V_3$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \qquad \text{CONEXIONES EN PARALELO}$$

Para dos resistores conectados en paralelo , **una forma simple es**

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{DOS RESISTORES EN PARALELO}$$

- **Deben aplicarse** los siguientes pasos **para** resolver circuitos **con las leyes de Kirchhoff** :

PASO 1 : Supóngase una dirección **para** la corriente **en cada malla de la red** .

PASO 2 : Aplíquese la primera ley de Kirchhoff **para** escribir **una ecuación de** corriente **para todas** , menos **uno de los puntos de unión** . $\sum I_{entrada} = \sum I_{salida}$

PASO 3 : Indíquese mediante una pequeña flecha la dirección en la cual actua cada fem , que actúa sola , causaría que una carga positiva se moviera .

PASO 4 : Aplíquese la segunda ley de Kirchhoff $\sum \varepsilon = \sum IR$ **para escribir una ecuación para todas las corrientes de malla posibles** . Escoge una dirección positiva arbitraria . **Una fem se considera** positiva si su dirección de salida **es la misma que la dirección** escogida . **Una caída IR se considera positiva** cuando la dirección **supuesta de la corriente es la misma** que su dirección .

PASO 5 : Resuélvase las ecuaciones simultáneamente para determinar las cantidades desconocidas .

PREGUNTAS

1.- Defínanse los siguientes términos :

a) Circuito cc b) Conexión en serie c) Conexión en paralelo
d) Diferencia de potencial entre las terminales
e) Resistencia interna f) Primera ley de Kirchhoff
g) Segunda ley de Kirchhoff

2.- Justifíquese el siguiente postulado : La resistencia eficaz de un grupo de resistores conctados en paralelo será menor que cualquiera de las resistencias individuales .

3.-Analícense las ventajas y desventajas de los foquitos luminosos de los arboles de navidad si se conectan : a) en serie ; b) en paralelo .

4.- ¿ Nos elementos conectados en serie deben diseñarse para que funcionen a corriente constante ó a voltaje constante ?

5.- En un circuito eléctrico se desea que disminuya la resistencia efectiva cuando se añaden resistores . ¿ Deben conectarse los resistores en serie ó en paralelo ?

PROBLEMAS

1.- Un resistor R_1 de 18 Ω y otro R_2 de 9 Ω se conectan en paralelo y posteriormente en serie con un acumulador de 24 V .¿ Cuál es la resistencia eficaz para cada conexión ? ¿ Qué conexión toma más corriente del acumulador ?

2.- Un resistor de 12 Ω y un resistor de 8 Ω se conectan en paralelo con una fuente de fem de 28 V . ¿ Cuál es la resistencia efectiva ? ¿ cuál es la corriente entregada por el acumulador ? ¿ cuáles son las resistencia efectiva y la corriente , si los resistores son reconectados en serie ?

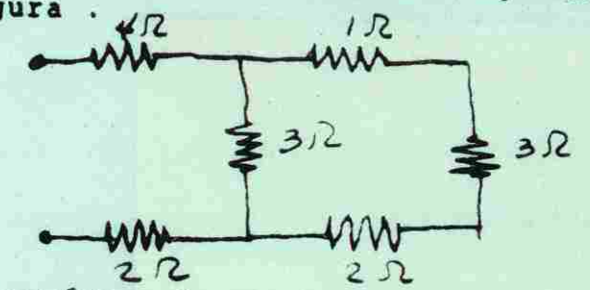
3.- Un resistor de 8 Ω y un resistor de 3 Ω son conectados primero en paralelo y luego en serie con una 'fuente de fem de 12 V . ¿ Cuál es la resistencia efectiva y corriente de circuito para cada caso ? Dibujense los diagramas de circuitos para cada caso

4.- Dado tres resistores de 80 Ω, 60 Ω y 40 Ω , encuentrese su resistencia efectiva cuando se conecten ; a) en serie y b) en paralelo .

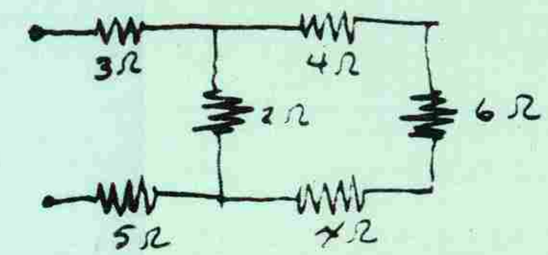
5.- Tres resistencias de 4 Ω, 9 Ω y 11 Ω se conectan primero en serie y después en paralelo . Encuentrese la resistencia para cada conexión .

6.- Un resistor de 9 Ω se conecta en serie con dos resistores en paralelo de 6 Ω y 12 Ω . ¿¿ Cuál es la diferencia de potencial terminal si la corriente total del acumulador de 4 A ?

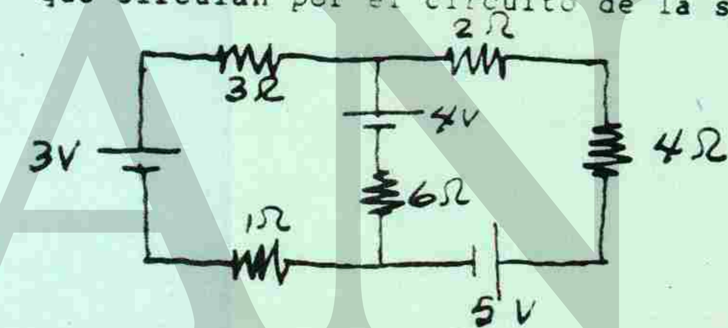
7.- Encuéntrese la resistencia equivalente del circuito de la sig. figura .



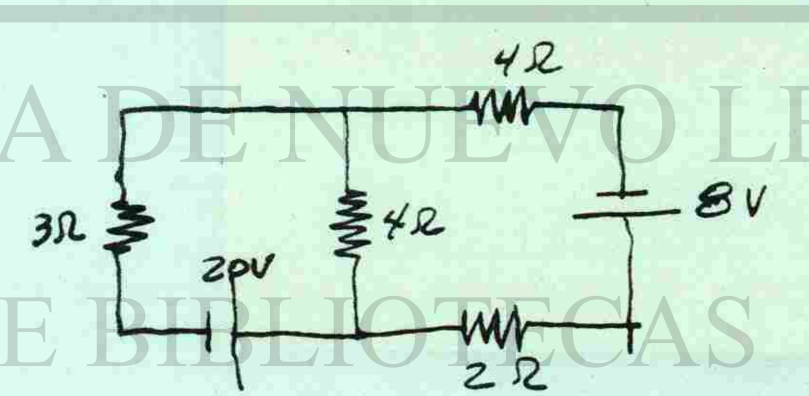
8.- Determínese la resistencia efectiva del siguiente circuito



9.- Aplíquense las leyes de Kirchhoff para determinar las corriente que circulan por el circuito de la siguiente figura .



10.- Empléense las leyes de Kirchhoff a fin de obtener las corrientes que circulan a través del siguiente circuito .



Vellocino editor