cantidad de calor Q_{ent}. 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 al comienzo, 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_3/V_2).

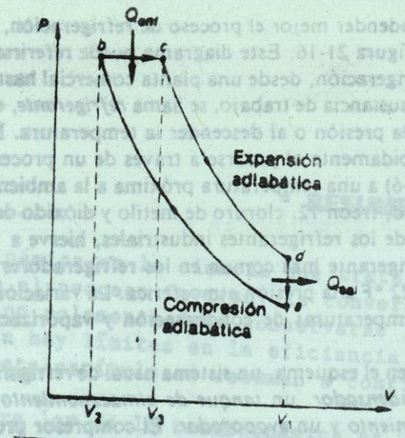


Figura 21-14 Ciclo diesel ideal.

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,

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

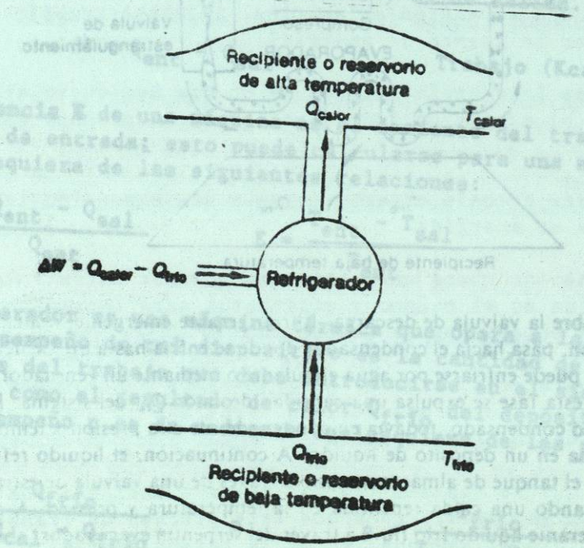


Figura 21-15 Diagrama esquemático de un refrigerador.

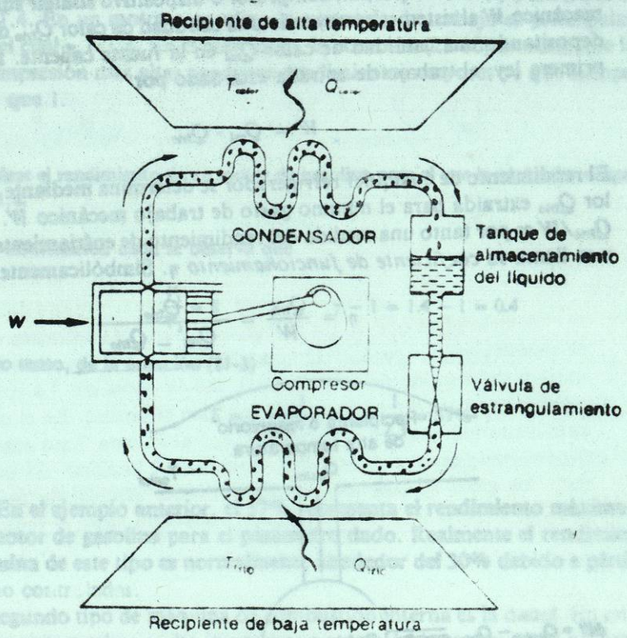
El rendimiento máximo puede expresarse en términos de temperaturas absolutas:

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

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 comun 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 licua. 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 [illegible] fuera 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 solo 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 la 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.

36378

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) 3360 J.

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. En 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 electrificarse cuando se frotan. En la figura 30-1 se muestran algunos materiales que comúnmente se encuentran en un laboratorio 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 médula 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.

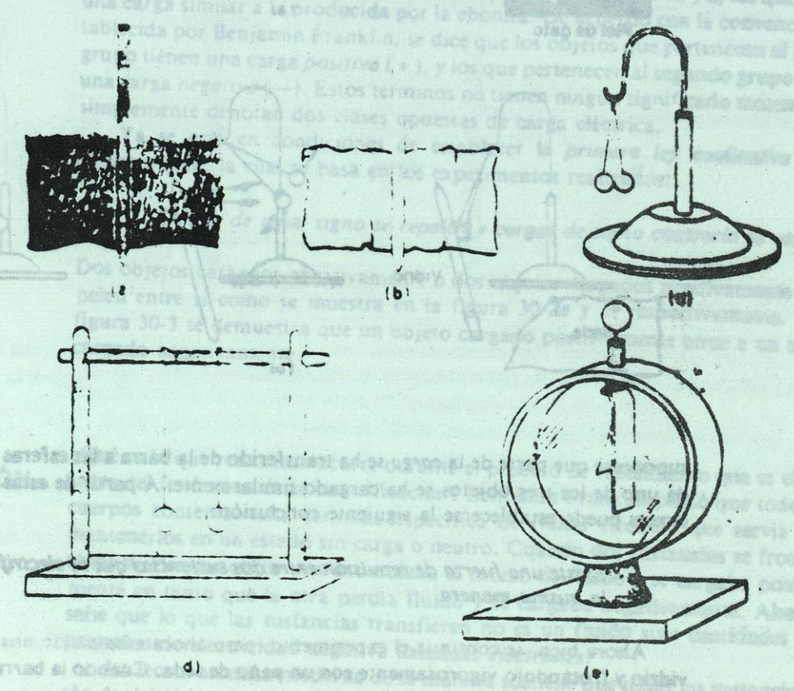


Fig. 30-1 Materiales de laboratorio empleados para el estudio de la electrostática: *a)* una barra de ebonita reposando sobre piel de gato; *b)* una barra de vidrio sobre un paño de seda; *c)* electroscopio de esferas de médula de saúco; *d)* esferas de médula de saúco suspendidas; y *e)* electroscopio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

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