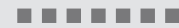


## LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

**H**asta este punto, la atención se ha centrado en la primera ley de la termodinámica, que requiere que la energía se conserve durante un proceso. En este capítulo se introduce la segunda ley de la termodinámica, la cual afirma que los procesos ocurren en cierta dirección y que la energía tiene calidad así como cantidad. Un proceso no puede tener lugar a menos que satisfaga tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica. En el capítulo se introducen primero los depósitos de energía térmica, los procesos reversibles e irreversibles, las máquinas térmicas, los refrigeradores y las bombas de calor. Varios enunciados de la segunda ley están acompañados por una explicación de las máquinas de movimiento perpetuo y la escala de temperatura termodinámica. Después se introduce el ciclo de Carnot y se analizan los principios de Carnot. Por último, se examinan las máquinas térmicas de Carnot, los refrigeradores y las bombas de calor.

### OBJETIVOS



En el capítulo 6, los objetivos son:

- Introducir la segunda ley de la termodinámica.
- Identificar procesos válidos como aquellos que satisfacen tanto la primera como la segunda leyes de la termodinámica.
- Analizar los depósitos de energía térmica, procesos reversibles e irreversibles, máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor.
- Describir los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius de la segunda ley de la termodinámica.
- Explicar los conceptos de máquinas de movimiento perpetuo.
- Aplicar la segunda ley de la termodinámica a ciclos y dispositivos cíclicos.
- Aplicar la segunda ley para desarrollar la escala de temperatura termodinámica absoluta.
- Describir el ciclo de Carnot.
- Examinar los principios de Carnot, las máquinas térmicas idealizadas de Carnot, los refrigeradores y las bombas de calor.
- Determinar las expresiones para las eficiencias térmicas y los coeficientes de desempeño para máquinas térmicas reversibles, bombas de calor y refrigeradores.



FIGURA 6-1

Una tasa de café caliente no se pondrá más caliente en una habitación más fría.

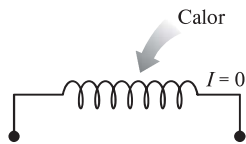


FIGURA 6-2

Transferir calor a un alambre no generará electricidad.

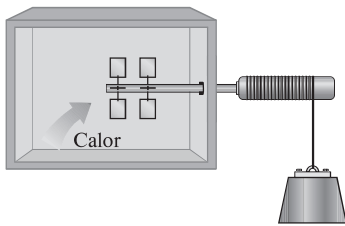


FIGURA 6-3

Transferir calor a una rueda de paletas no hará que ésta gire.

UN SOLO SENTIDO

FIGURA 6-4

Los procesos ocurren en una cierta dirección y no en la dirección contraria.

## 6-1 ■ INTRODUCCIÓN A LA SEGUNDA LEY

En los capítulos 4 y 5 se aplicó la *primera ley de la termodinámica*, o *principio de conservación de la energía*, a procesos relacionados con sistemas cerrados y abiertos. Como se señaló en varias ocasiones en esos capítulos, la energía es una propiedad conservada y no se sabe de ningún proceso que viole la primera ley de la termodinámica. Por lo tanto, es razonable concluir que para que ocurra, un proceso debe satisfacer la primera ley. Sin embargo, como se explica aquí, satisfacerla no asegura que en realidad el proceso tenga lugar.

Una experiencia común es que una taza de café caliente que se deja en una habitación que está más fría termine por enfriarse (Fig. 6-1). Este proceso satisface la primera ley de la termodinámica porque la cantidad de energía que pierde el café es igual a la cantidad que gana el aire circundante. Considere ahora el proceso inverso: café caliente que se vuelve incluso más caliente en una habitación más fría como resultado de la transferencia de calor desde el aire. Se sabe que este proceso nunca se lleva a cabo; sin embargo, hacerlo no violaría la primera ley siempre y cuando la cantidad de energía que pierde el aire sea igual a la cantidad que gana el café.

Otro ejemplo común es el calentamiento de una habitación mediante el paso de corriente eléctrica por un resistor (Fig. 6-2). Nuevamente, la primera ley dicta que la cantidad de energía eléctrica suministrada a la resistencia sea igual a la cantidad de energía transferida al aire de la habitación como calor. Ahora se intentará invertir este proceso; es decir, se espera que transferir cierta cantidad de calor a la resistencia cause que se genere una cantidad equivalente de energía eléctrica en ella. Sin embargo, esto no ocurre.

Por último, considere un mecanismo provisto de una rueda de paletas que funciona mediante la caída de una masa (Fig. 6-3); la rueda gira cuando desciende la masa y agita un fluido dentro de un recipiente aislado. Como resultado, disminuye la energía potencial de la masa mientras que la energía interna del fluido se incrementa de acuerdo con el principio de conservación de la energía. Sin embargo, el proceso inverso de subir la masa mediante transferencia de calor desde el fluido a la rueda de paletas no ocurre en la naturaleza, aunque hacerlo no violaría la primera ley de la termodinámica.

A partir de estos argumentos resulta claro que los procesos van en *cierta dirección* y no en la dirección contraria (Fig. 6-4). La primera ley de la termodinámica no restringe la dirección de un proceso, pero satisfacerla no asegura que en realidad ocurra el proceso. Esta falta de adecuación de la primera ley para identificar si un proceso puede tener lugar se remedia introduciendo otro principio general, la *segunda ley de la termodinámica*. Más adelante se muestra que el proceso inverso analizado antes viola la segunda ley de la termodinámica. Esta violación se detecta fácilmente con la ayuda de una propiedad llamada *entropía*, definida en el capítulo 7. Un proceso no puede ocurrir a menos que satisfaga tanto la primera ley de la termodinámica como la segunda (Fig. 6-5).

Existen varios enunciados válidos de la segunda ley de la termodinámica, dos de ellos se presentan y analizan posteriormente en este capítulo, en relación con algunos dispositivos de ingeniería que operan en ciclos.

Sin embargo, el uso de la segunda ley de la termodinámica no se limita a identificar la dirección de los procesos, también afirma que la energía tiene *calidad* así como cantidad. La primera ley se relaciona con la cantidad de energía y las transformaciones de energía de una forma a otra sin considerar su calidad. Conservar la calidad de la energía es una cuestión importante para los ingenieros, y la segunda ley provee los medios necesarios para determinarla, así como el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso. Según una

explicación posterior de este capítulo, mayor cantidad de energía a alta temperatura se puede convertir en trabajo, por lo tanto tiene una calidad mayor que esa misma cantidad de energía a una temperatura menor.

La segunda ley de la termodinámica se usa también para determinar los *límites teóricos* en el desempeño de sistemas de ingeniería de uso ordinario, como máquinas térmicas y refrigeradores, así como predecir el *grado de terminación* de las reacciones químicas. La segunda ley está también estrechamente asociada con el concepto de *perfección*. De hecho, la segunda ley *define* la perfección para los procesos termodinámicos. Se puede usar para cuantificar el nivel de perfección de un proceso y señalar la dirección para eliminar eficazmente las imperfecciones.

## 6-2 ■ DEPÓSITOS DE ENERGÍA TÉRMICA

En el desarrollo de la segunda ley de la termodinámica es muy conveniente tener un cuerpo hipotético que posea una *capacidad de energía térmica* relativamente grande (masa  $\times$  calor específico) que pueda suministrar o absorber cantidades finitas de calor sin experimentar ningún cambio de temperatura. Tal cuerpo se llama **depósito de energía térmica**, o sólo depósito. En la práctica, los grandes cuerpos de agua, como océanos, lagos y ríos, así como el aire atmosférico, se pueden modelar de manera precisa como depósitos de energía térmica debido a sus grandes capacidades de almacenaje de energía o masas térmicas (Fig. 6-6). La *atmósfera*, por ejemplo, no se calienta como resultado de las pérdidas de calor ocurridas en invierno desde edificios residenciales. Del mismo modo, los megajoules de energía de desecho que las plantas de energía arrojan en grandes ríos no causan un cambio significativo en la temperatura del agua.

También es posible modelar un *sistema de dos fases* como un depósito, ya que puede absorber y liberar grandes cantidades de calor mientras permanece a temperatura constante. Otro ejemplo común de un depósito de energía térmica es el *horno industrial*. Las temperaturas de la mayor parte de los hornos se controlan con cuidado, por lo que son capaces de suministrar de una manera esencialmente isotérmica grandes cantidades de energía térmica en forma de calor. Por lo tanto, se pueden modelar como depósitos.

Un cuerpo no tiene que ser muy grande para considerarlo como un depósito; cualquier cuerpo físico cuya capacidad de energía térmica es grande con respecto a la cantidad de energía que suministra o absorbe se puede modelar como depósito. El aire en una habitación, por ejemplo, se puede considerar un depósito en el análisis de la disipación de calor desde un aparato de televisión que se encuentra en la habitación, puesto que la cantidad de transferencia de energía del aparato hacia la habitación no es tan grande como para tener un efecto notable en la temperatura del aire de la habitación.

Un depósito que suministra energía en la forma de calor se llama **fuelle**, y otro que absorbe energía en la forma de calor se llama **sumidero** (Fig. 6-7). Los depósitos de energía térmica suelen denominarse **depósitos de calor** porque proveen o absorben energía en forma de calor.

La transferencia de calor desde fuentes industriales hacia el ambiente es de interés primordial para los ambientalistas, así como para los ingenieros. El manejo irresponsable de la energía de desecho puede incrementar de manera importante la temperatura del ambiente en algunas de sus porciones, lo cual causa la llamada *contaminación térmica*. Si no se controla con cuidado, este tipo de contaminación puede perturbar seriamente la vida marina en lagos y ríos. Sin embargo, mediante diseños y manejos cuidadosos, la energía de desecho arrojada a los grandes cuerpos de agua se puede usar para mejorar la calidad de la

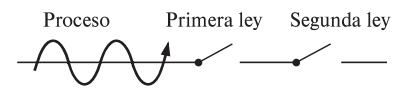


FIGURA 6-5

Un proceso debe satisfacer tanto la primera como la segunda leyes de la termodinámica para que se pueda llevar a cabo.

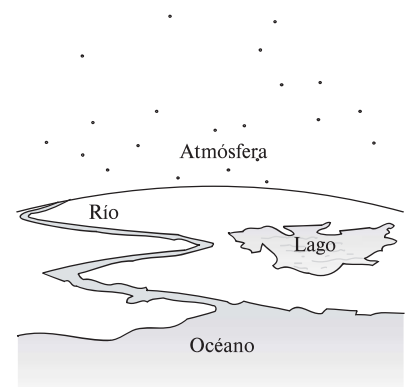


FIGURA 6-6

Los cuerpos con masas térmicas relativamente grandes se pueden modelar como depósitos de energía térmica.

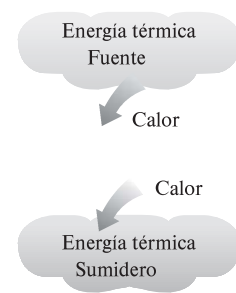


FIGURA 6-7

Una fuente suministra energía en forma de calor y un sumidero la absorbe.

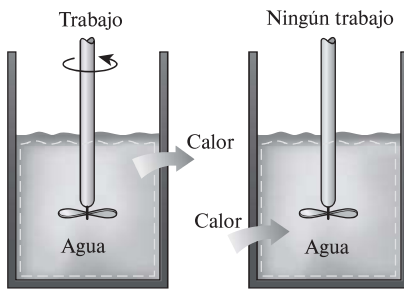


FIGURA 6-8

El trabajo se puede convertir en calor de forma directa y completamente, pero lo contrario no es posible.

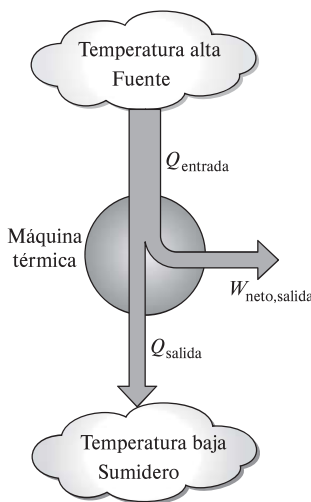


FIGURA 6-9

Parte del calor que recibe una máquina térmica se convierte en trabajo, mientras que el resto es rechazado a un sumidero.

vida marina al mantener dentro de los niveles seguros y deseables los incrementos de temperatura locales.

### 6-3 ■ MÁQUINAS TÉRMICAS

Como se señaló antes, el trabajo se puede convertir fácilmente en otras formas de energía, pero convertir éstas en trabajo no es fácil. El trabajo mecánico que realiza la flecha mostrada en la figura 6-8, por ejemplo, se convierte primero en la energía interna del agua, que puede entonces salir del agua como calor. Se sabe por experiencia que cualquier intento por revertir este proceso fallará, es decir, transferir calor al agua no causa que la flecha gire. De ésta y otras observaciones se concluye que el trabajo se puede convertir en calor de manera directa y por completo, pero convertir el calor en trabajo requiere usar algunos dispositivos especiales. Estos dispositivos se llaman **máquinas térmicas**.

Las máquinas térmicas difieren bastante entre sí, pero es posible caracterizarlas a todas de la siguiente manera (Fig. 6-9):

1. Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear, etcétera).
2. Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
3. Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos, etcétera).
4. Operan en un ciclo.

Las máquinas térmicas y otros dispositivos cíclicos por lo común requieren un fluido hacia y desde el cual se transfiere calor mientras experimenta un ciclo. Al fluido se le conoce como **fluido de trabajo**.

El término *máquina térmica* se usa con frecuencia en un sentido más amplio que incluye dispositivos que producen trabajo que no operan en un ciclo termodinámico. Las máquinas relacionadas con la combustión interna, como las turbinas de gas y los motores de automóviles, entran en esta categoría. Estos dispositivos operan en un ciclo mecánico pero no en un ciclo termodinámico, porque el fluido de trabajo (los gases de combustión) no experimenta un ciclo completo. En lugar de ser enfriados a la temperatura inicial, los gases de escape se purgan y se reemplazan por una mezcla fresca de aire y combustible al final del ciclo.

El dispositivo productor de trabajo que mejor se ajusta a la definición de una máquina térmica es la *central eléctrica de vapor*, la cual es una máquina de combustión externa, es decir, la combustión se lleva a cabo fuera de la máquina y la energía térmica liberada durante este proceso se transfiere al vapor como calor. El esquema de una central eléctrica de vapor se muestra en la figura 6-10. Éste es un diagrama bastante simplificado y el análisis de la central eléctrica de vapor real se da en capítulos posteriores. Las distintas cantidades mostradas en esta figura son:

$Q_{\text{entrada}}$  = cantidad de calor suministrada al vapor en una caldera desde una fuente de temperatura alta (horno)

$Q_{\text{salida}}$  = cantidad de calor rechazada del vapor en el condensador hacia un sumidero de temperatura baja (atmósfera, río, etcétera)

$W_{\text{salida}}$  = cantidad de trabajo que entrega el vapor cuando se expande en una turbina

$W_{\text{entrada}}$  = cantidad de trabajo requerida para comprimir agua a la presión de la caldera

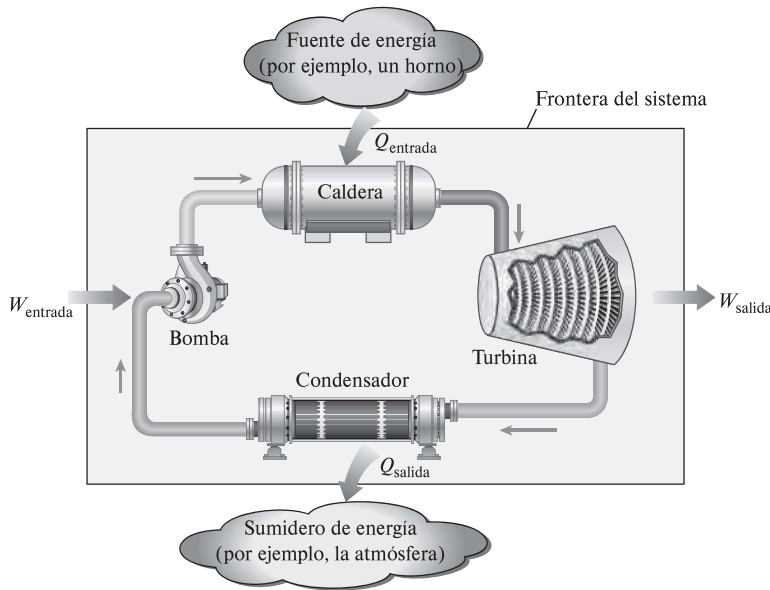


FIGURA 6-10

Esquema de una central eléctrica de vapor.

Observe que las direcciones de las interacciones de calor y trabajo se indican mediante los subíndices *entrada* y *salida*. Por lo tanto, las cuatro cantidades descritas son *positivas* siempre.

La salida de trabajo neto de esta central eléctrica de vapor es la diferencia entre su salida de trabajo total y su entrada de trabajo total (Fig. 6-11):

$$W_{\text{neto,salida}} = W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}} \quad (6-1)$$

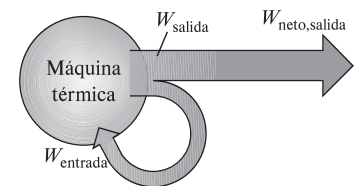


FIGURA 6-11

Una porción de la salida de trabajo de una máquina térmica se consume internamente para mantenerla en operación continua.

El trabajo neto también se puede determinar de los datos de transferencia de calor solamente. Los cuatro componentes de la central eléctrica de vapor tienen que ver con flujo másico que entra y sale, por lo tanto se deben considerar como sistemas abiertos. Sin embargo, estos componentes junto con las tuberías de conexión siempre contienen el mismo fluido (sin contar el vapor que pudiera escapar, por supuesto). No entra ni sale masa de este sistema de combinación, lo cual se indica por medio del área sombreada en la figura 6-10; así, se puede analizar como un sistema cerrado. Recuerde que para que un sistema cerrado experimente un ciclo, el cambio de energía interna  $\Delta U$  es cero y, en consecuencia, la salida de trabajo neto del sistema también es igual a la transferencia neta de calor hacia el sistema:

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} \quad (6-2)$$

### Eficiencia térmica

En la ecuación 6-2,  $Q_{\text{salida}}$  representa la magnitud de la energía que se desperdicia con la finalidad de completar el ciclo. Pero  $Q_{\text{salida}}$  nunca es cero; de esta manera, la salida neta de trabajo de una máquina térmica es siempre menor que la cantidad de entrada de calor. Es decir, sólo parte del calor transferido a la máquina térmica se convierte en trabajo. La fracción de la entrada de calor que se convierte en salida de trabajo neto es una medida del desempeño de una máquina térmica y se llama **eficiencia térmica**  $\eta_{\text{ter}}$  (Fig. 6-12).

Para las máquinas térmicas, la salida deseada es la de trabajo neto, mientras que la entrada que requieren es la cantidad de calor suministrado al fluido de trabajo. Entonces la eficiencia térmica de una máquina térmica se puede expresar como

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Salida de trabajo neto}}{\text{Entrada de calor total}} \quad (6-3)$$

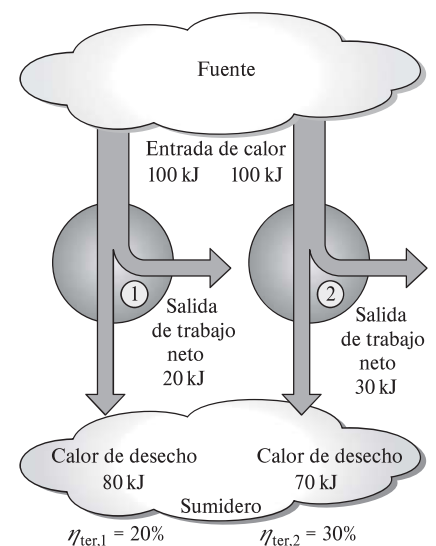


FIGURA 6-12

Algunas máquinas térmicas se desempeñan mejor que otras (convierten más trabajo a partir del calor que reciben).

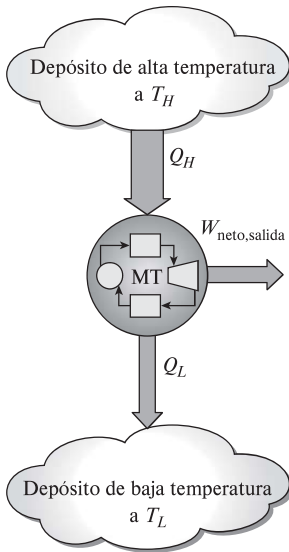


FIGURA 6-13

Esquema de una máquina térmica.

o bien,

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto,salida}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (6-4)$$

También es posible expresarla como

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (6-5)$$

dato que  $W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}$ .

Los dispositivos cíclicos de interés práctico como las máquinas térmicas, los refrigeradores y las bombas de calor operan entre un medio de alta temperatura (o depósito) a temperatura  $T_H$  y otro de baja temperatura (o depósito) a temperatura  $T_L$ . Para uniformar el tratamiento de máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor, se definen estas dos cantidades:

$Q_H$  = magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de alta temperatura a temperatura  $T_H$

$Q_L$  = magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de baja temperatura a temperatura  $T_L$

Observe que  $Q_L$  y  $Q_H$  están definidas como *magnitudes*, por lo tanto son cantidades positivas. La dirección de  $Q_H$  y  $Q_L$  se determina fácilmente mediante inspección. Entonces, el trabajo neto y las relaciones de eficiencia térmica para cualquier máquina térmica (mostrada en la figura 6-13) también se pueden expresar como

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_H - Q_L$$

y

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto,salida}}}{Q_H}$$

o bien,

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (6-6)$$

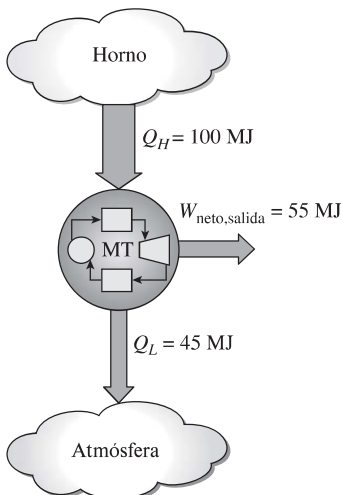


FIGURA 6-14

Incluso las máquinas térmicas más eficientes rechazan casi la mitad de la energía que reciben como calor de desecho.

La eficiencia térmica de una máquina térmica siempre es menor a la unidad porque  $Q_L$  y  $Q_H$  se definen como cantidades positivas.

La eficiencia térmica es una medida de qué tan eficientemente una máquina térmica convierte el calor que recibe en trabajo. Las máquinas térmicas se construyen con el propósito de convertir el calor en trabajo, de ahí que los ingenieros traten constantemente de mejorar las eficiencias de estos dispositivos dado que mayor eficiencia significa menos consumo de combustible y por lo tanto menores costos y menos contaminación.

Las eficiencias térmicas de dispositivos que producen trabajo son relativamente bajas. Los motores ordinarios de automóviles de ignición por chispa tienen una eficiencia térmica de alrededor de 25 por ciento. Es decir, un motor de automóvil convierte cerca de 25 por ciento de la energía química de la gasolina en trabajo mecánico. Este número es tan alto como 40 por ciento de los motores diésel y las grandes centrales de turbinas de gas, y tan alto como 60 por ciento de las grandes centrales eléctricas que funcionan con gas y vapor. Así, incluso con las máquinas térmicas más eficientes disponibles en la actualidad, casi la mitad de la energía suministrada termina en ríos, lagos o en la atmósfera como energía de desecho o inútil (Fig. 6-14).

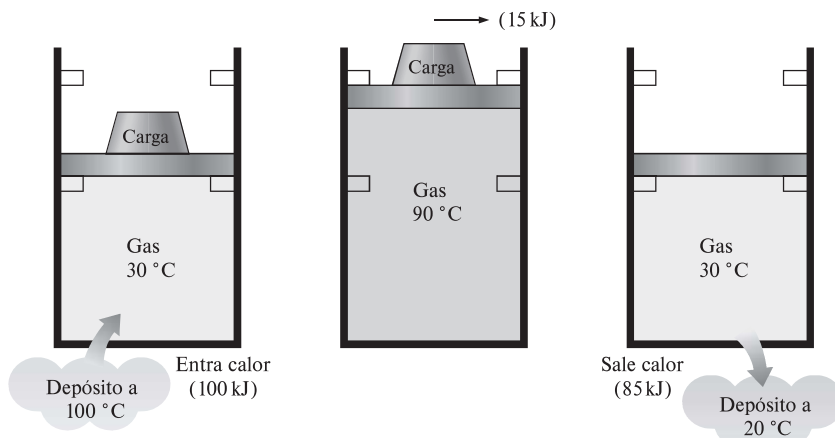
## ¿Es posible ahorrar $Q_{\text{salida}}$ ?

En una central eléctrica de vapor, el condensador es el dispositivo donde grandes cantidades de calor de desecho se rechaza hacia ríos, lagos o la atmósfera. Entonces surge la pregunta: ¿es posible sacar el condensador de la central y ahorrar toda esa energía de desecho? Desafortunadamente, la respuesta a esta pregunta es un *no* contundente por la simple razón de que sin un proceso de rechazo de calor en un condensador, el ciclo no estaría completo (los dispositivos cíclicos como las centrales eléctricas de vapor no pueden funcionar de forma continua a menos que se complete el ciclo). Esto se demuestra a continuación con la ayuda de una máquina térmica simple.

Se tiene la máquina térmica simple mostrada en la figura 6-15, la cual se usa para elevar el peso. Consta de un dispositivo de cilindro-émbolo con dos conjuntos de topes. El fluido de trabajo es el gas contenido dentro del cilindro. Al inicio, la temperatura del gas es  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El émbolo, que se carga con los pesos, descansa sobre la parte superior de los topes inferiores. Después se transfieren  $100\text{ kJ}$  de calor al gas en el cilindro desde una fuente a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que provoca que el gas se expanda y eleve el émbolo con carga hasta que llega a los topes superiores, como se ilustra en la figura. En este punto se retira la carga y se observa que la temperatura del gas es de  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El trabajo realizado sobre la carga durante este proceso de expansión es igual al incremento en su energía potencial, por ejemplo  $15\text{ kJ}$ . Incluso en condiciones ideales (émbolo sin peso, sin fricción, ninguna pérdida de calor y expansión en cuasiequilibrio), la cantidad de calor suministrado al gas es mayor que el trabajo hecho ya que parte del calor suministrado se usa para elevar la temperatura del gas.

Ahora se intentará contestar esta pregunta: ¿es posible transferir de nuevo, para usarlos posteriormente, los  $85\text{ kJ}$  de calor excedentes a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  hacia el depósito a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Si esto es posible, entonces se tendrá una máquina térmica con una eficiencia térmica de 100 por ciento en condiciones ideales. La respuesta a esta pregunta nuevamente es *no*, por el simple hecho de que el calor se transfiere siempre de un medio de alta temperatura a otro de baja, y nunca al contrario. Por lo tanto, no se puede enfriar este gas de  $90$  a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  transfiriendo calor hacia un depósito a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En cambio, se tiene que poner al sistema en contacto con un depósito de baja temperatura, por ejemplo a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de modo que el gas pueda volver a su estado inicial al rechazar sus excedentes  $85\text{ kJ}$  de energía como calor hacia este depósito. Esta energía no se puede reciclar, y se denomina de modo adecuado *energía de desecho*.



**FIGURA 6-15**

Un ciclo de máquina térmica no se puede completar sin rechazar cierta cantidad de calor a un sumidero de baja temperatura.

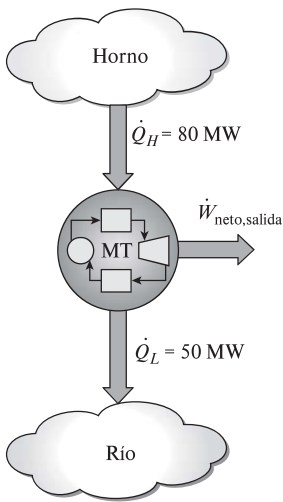


FIGURA 6-16

Esquema para el ejemplo 6-1.

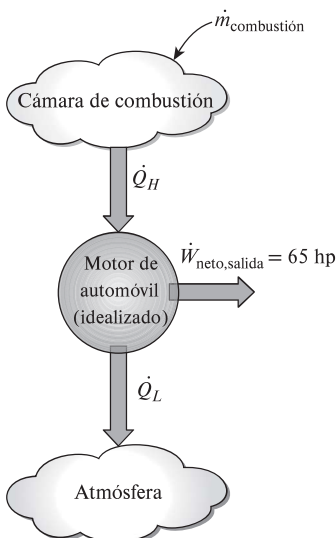


FIGURA 6-17

Esquema para el ejemplo 6-2.

De esta explicación se concluye que toda máquina térmica debe *desperdiciar* cierta cantidad de energía transfiriéndola a un depósito de baja temperatura a fin de completar el ciclo, incluso en condiciones idealizadas. El requerimiento de que una máquina térmica intercambie calor con al menos dos depósitos para operación continua conforma el fundamento para la expresión de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica, la cual será analizada posteriormente en esta sección.

### EJEMPLO 6-1 Producción de potencia neta de una máquina térmica

Se transfiere calor a una máquina térmica desde un horno a una tasa de 80 MW. Si la tasa de rechazo de calor hacia un río cercano es 50 MW, determine la salida de potencia neta y la eficiencia térmica para esta máquina térmica.

**SOLUCIÓN** Se cuenta con las tasas de transferencia de calor hacia y desde una máquina térmica. Se determinará la salida de potencia neta y la eficiencia térmica.

**Suposición** Las pérdidas de calor a través de las tuberías y otros componentes son insignificantes.

**Análisis** En la figura 6-16 se ofrece un esquema de la máquina térmica. El horno sirve como un depósito de alta temperatura para la máquina y el río como un depósito de temperatura baja. Las cantidades dadas se pueden expresar como

$$\dot{Q}_H = 80 \text{ MW} \quad \text{y} \quad \dot{Q}_L = 50 \text{ MW}$$

La salida de potencia neta para esta máquina térmica es

$$\dot{W}_{\text{neto, salida}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = (80 - 50) \text{ MW} = 30 \text{ MW}$$

La eficiencia térmica se determina sin dificultad como

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto, salida}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} = 0.375 \quad (\text{o bien, } 37.5 \text{ por ciento})$$

**Comentario** La máquina térmica convierte en trabajo 37.5 por ciento del calor que recibe.

### EJEMPLO 6-2 Tasa de consumo de combustible de un automóvil

Un motor de automóvil con una salida de potencia de 65 hp tiene una eficiencia térmica de 24 por ciento. Determine la tasa de consumo de combustible de este automóvil si el combustible tiene un poder calórico de 19 000 Btu/lbm (es decir, 19 000 Btu de energía se liberan por cada lbm de combustible quemado).

**SOLUCIÓN** Se cuenta con los datos de la salida de potencia y la eficiencia de un motor de automóvil. Se determinará la tasa de consumo de combustible del automóvil.

**Suposición** La salida de potencia del automóvil es constante.

**Análisis** En la figura 6-17 se ofrece el esquema de un motor de automóvil, el cual es propulsado convirtiendo en trabajo 24 por ciento de la energía química liberada durante el proceso de combustión. La cantidad de entrada de energía requerida para producir una salida de potencia de 65 hp se determina a partir de la definición de eficiencia térmica como

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{\text{neto, salida}}}{\eta_{\text{ter}}} = \frac{65 \text{ hp}}{0.24} \left( \frac{2545 \text{ Btu/h}}{1 \text{ hp}} \right) = 689\,270 \text{ Btu/h}$$

Para suministrar energía a esta tasa, la máquina debe quemar combustible a una tasa de

$$\dot{m}_{\text{combustible}} = \frac{689\,270 \text{ Btu/h}}{19\,000 \text{ Btu/lbm}} = 36.3 \text{ lbm/h}$$

ya que se liberan 19 000 Btu de energía térmica por cada lbm de combustible quemado.

**Comentario** Si se pudiera duplicar la eficiencia térmica del automóvil, la tasa de consumo de combustible se reduciría a la mitad.

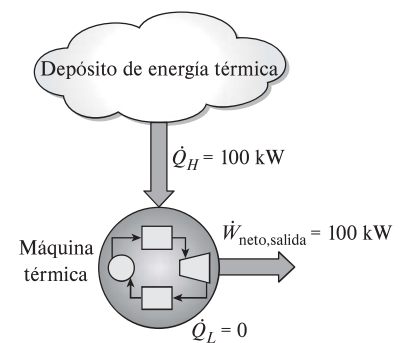
## La segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck

Respecto a la máquina térmica mostrada en la figura 6-15 se demostró que incluso bajo condiciones ideales una máquina de este tipo debe rechazar algo de calor hacia un depósito que se encuentra a baja temperatura con la finalidad de completar el ciclo. Es decir, ninguna máquina térmica puede convertir todo el calor que recibe en trabajo útil. Esta limitación de la eficiencia térmica de las máquinas térmicas forma la base para el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica, que se expresa como sigue:

Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una cantidad neta de trabajo.

Es decir, una máquina térmica debe intercambiar calor con un sumidero de baja temperatura así como con una fuente de temperatura alta para seguir funcionando. El enunciado de Kelvin-Planck se puede expresar también como: *ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia térmica de 100 por ciento* (Fig. 6-18), o bien: *para que una central eléctrica opere, el fluido de trabajo debe intercambiar calor con el ambiente, así como con el horno*.

Observe que la imposibilidad de tener una máquina térmica con 100 por ciento de eficiencia no se debe a la fricción o a otros efectos de disipación, es una limitación que se aplica a las máquinas térmicas ideales y reales. Después en este capítulo, se desarrolla una relación para la eficiencia térmica máxima de una máquina térmica. Asimismo, se demuestra que este valor máximo depende sólo de la temperatura del depósito.



**FIGURA 6-18**

Ésta es una máquina térmica que viola el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley.

## 6-4 ■ REFRIGERADORES Y BOMBAS DE CALOR

Se sabe por experiencia que el calor se transfiere en la dirección de temperatura decreciente, es decir, desde medios a temperatura alta hacia los de temperatura baja. Este proceso de transferencia de calor ocurre en la naturaleza sin requerir ningún dispositivo. Sin embargo, el proceso inverso no puede ocurrir por sí mismo. La transferencia de calor de un medio que se encuentra a baja temperatura hacia otro de temperatura alta requiere dispositivos especiales llamados **refrigeradores**.

Los refrigeradores, como las bombas de calor, son dispositivos cíclicos. El fluido de trabajo utilizado en el ciclo de refrigeración se denomina **refrigerante**. El ciclo de refrigeración que se utiliza con mayor frecuencia es el *ciclo de refrigeración por compresión por vapor*, en el que intervienen cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador, como se ilustra en la figura 6-19.

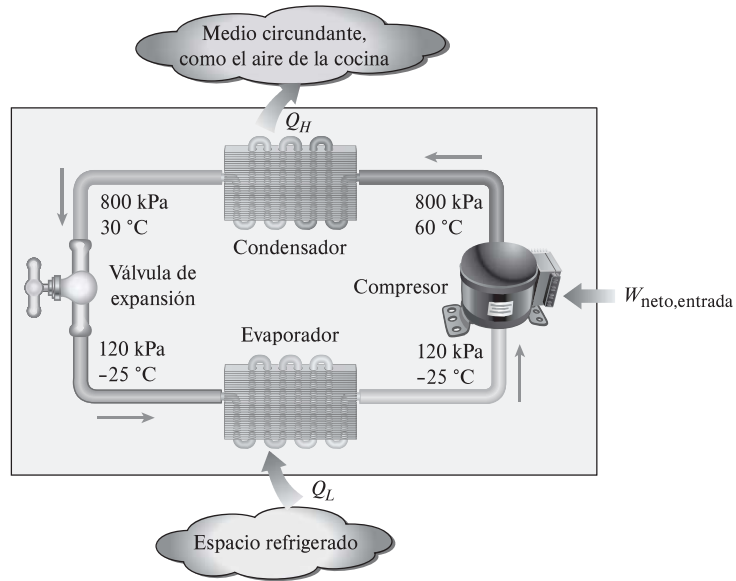


FIGURA 6-19

Componentes básicos de un sistema de refrigeración y sus condiciones de operación características.

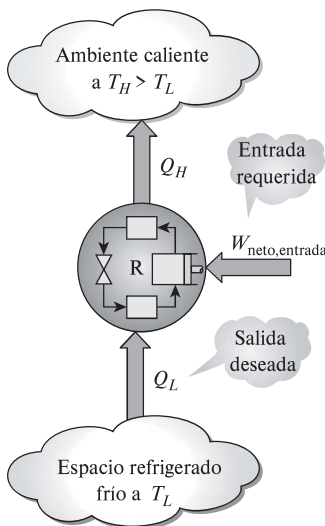


FIGURA 6-20

El objetivo de un refrigerador es eliminar  $Q_L$  de un espacio enfriado.

El refrigerante entra al compresor como vapor y se comprime hasta la presión del condensador, posteriormente sale del compresor a una temperatura relativamente alta y se enfría y condensa a medida que fluye por los serpentines del condensador rechazando calor al medio circundante. Después entra al tubo capilar donde su presión y temperatura caen de forma drástica debido al efecto de estrangulamiento. Luego, el refrigerante a temperatura baja entra al evaporador, donde se evapora absorbiendo calor del espacio refrigerado. El ciclo se completa cuando el refrigerante sale del evaporador y vuelve a entrar al compresor.

En un refrigerador doméstico, el compartimento del congelador donde el refrigerante absorbe calor sirve como evaporador, mientras que el serpentín situado comúnmente detrás del refrigerador, donde el calor se disipa hacia el aire de la cocina, sirve como condensador.

El esquema de un refrigerador se muestra en la figura 6-20. Aquí,  $Q_L$  es la magnitud del calor eliminado del espacio refrigerado a temperatura  $T_L$ ,  $Q_H$  es la magnitud del calor rechazado hacia el medio caliente a temperatura  $T_H$  y  $W_{\text{neto,entrada}}$  es la entrada de trabajo neto al refrigerador. Como se explicó,  $Q_L$  y  $Q_H$  representan magnitudes, por lo tanto son cantidades positivas.

### Coefficiente de desempeño

La *eficiencia* de un refrigerador se expresa en términos del **coeficiente de desempeño** (COP, siglas de *coefficient of performance*), el cual se denota mediante  $\text{COP}_R$ . El objetivo de un refrigerador es remover calor ( $Q_L$ ) del espacio refrigerado. Para lograr este objetivo se requiere una entrada de trabajo de  $W_{\text{neto,entrada}}$ . Entonces, el COP de un refrigerador se puede expresar como

$$\text{COP}_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}} \quad (6-7)$$

Esta relación también se puede expresar en forma de tasa reemplazando  $Q_L$  por  $\dot{Q}_L$  y  $W_{\text{neto,entrada}}$  por  $\dot{W}_{\text{neto,entrada}}$ .

El principio de conservación de la energía para un dispositivo cíclico requiere que

$$W_{\text{neto, entrada}} = Q_H - Q_L \quad (\text{kJ}) \quad (6-8)$$

Entonces, la relación del COP se convierte en

$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (6-9)$$

Observe que el valor del  $\text{COP}_R$  puede ser *mayor que la unidad*. Es decir, la cantidad de calor eliminada del espacio refrigerado puede ser mayor que la cantidad de entrada de trabajo. Esto contrasta con la eficiencia térmica, la cual nunca puede ser mayor que 1. De hecho, una razón para expresar la eficiencia de un refrigerador con otro término, el coeficiente de desempeño, es el deseo de evitar la rareza de tener eficiencias mayores que la unidad.

### Bombas de calor

Otro dispositivo que transfiere calor desde un medio de baja temperatura a otro de alta es la **bomba de calor**, mostrada esquemáticamente en la figura 6-21. Los refrigeradores y las bombas de calor operan en el mismo ciclo, pero difieren en sus objetivos.

El propósito de un refrigerador es mantener el espacio refrigerado a una temperatura baja eliminando calor de éste. Descargar este calor hacia un medio que está a temperatura mayor es solamente una parte necesaria de la operación, no el propósito. El objetivo de una bomba de calor, sin embargo, es mantener un espacio calentado a una temperatura alta. Esto se logra absorbiendo calor desde una fuente que se encuentra a temperatura baja, por ejemplo, agua de pozo o aire frío exterior en invierno, y suministrando este calor a un medio de temperatura alta como una casa (Fig. 6-22).

Un refrigerador ordinario que se coloca en la ventana de una casa con la puerta abierta hacia el frío aire exterior en invierno funcionará como una bomba de calor porque tratará de enfriar el exterior absorbiendo calor de él y rechazándolo hacia la casa a través de los serpentines situados detrás.

La medida de desempeño de una bomba de calor también se expresa en términos del **coeficiente de desempeño**  $\text{COP}_{\text{HP}}$ , definido como

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}} \quad (6-10)$$

que también se puede expresar como

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (6-11)$$

Una comparación de las ecuaciones 6-7 y 6-10 revela que

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_R + 1 \quad (6-12)$$

para valores fijos de  $Q_L$  y  $Q_H$ . Esta relación indica que el coeficiente de desempeño de una bomba de calor siempre es mayor que la unidad puesto que  $\text{COP}_R$  es una cantidad positiva. Es decir, una bomba de calor funcionará, en el peor de los casos, como un calentador de resistencia al suministrar tanta energía como requiera la casa. Sin embargo, en realidad parte de  $Q_H$  se va al aire exterior a través de la tubería y otros dispositivos, por lo que el  $\text{COP}_{\text{HP}}$  podría ser menor que la unidad cuando la temperatura del aire exterior es demasiado baja. Cuando esto sucede, el sistema cambia comúnmente a un modo de calentamiento de resistencia. La mayor parte de las bombas de calor que operan en la actualidad tienen un COP promedio para las estaciones del año de entre 2 y 3.

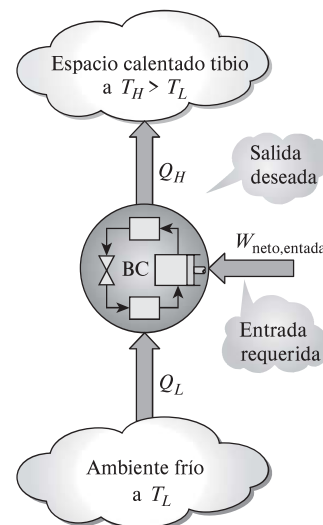


FIGURA 6-21

El objetivo de una bomba de calor es suministrar calor  $Q_H$  hacia el espacio más caliente.

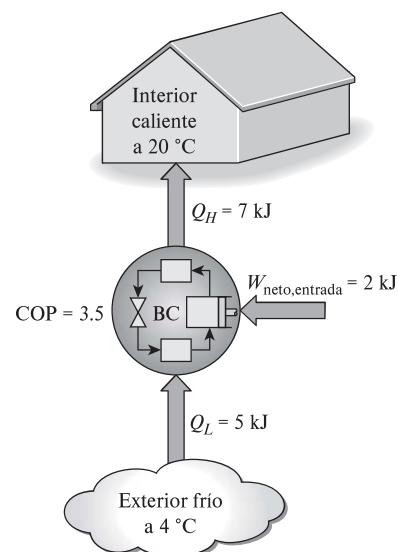


FIGURA 6-22

El trabajo suministrado a una bomba de calor se usa para extraer energía del exterior frío y llevarla al interior caliente.

La mayor parte de las bombas de calor utilizan el aire frío exterior como fuente de calor en invierno, y se conocen como *bombas de calor de fuente de aire*. El COP de esta clase de bombas de calor es de alrededor de 3.0 en las condiciones especificadas por el diseño. Las bombas de calor de fuente de aire no son apropiadas para climas fríos porque su eficacia disminuye en forma considerable cuando las temperaturas están por debajo del punto de congelación. En esos casos se pueden emplear las bombas de calor geotérmicas (conocidas también como de fuente de tierra) que usan el suelo como fuente de calor. Estas bombas requieren tuberías enterradas a una profundidad de entre 1 y 2 m, y su instalación es más cara, pero también son más eficientes (hasta 45 por ciento más que las bombas de calor de fuente de aire). El COP de las bombas de calor de fuente de tierra puede ser tan alto como 6.

Los **acondicionadores de aire** son básicamente refrigeradores cuyo espacio refrigerado es una habitación o un edificio en lugar de un compartimiento de alimentos. Una unidad de acondicionador de aire tipo ventana enfría una habitación al absorber calor del aire de la habitación y descargarlo hacia el exterior. Esta misma unidad puede usarse como bomba de calor en invierno instalándola hacia atrás. De este modo, la unidad absorbe calor desde el exterior frío y lo entrega a la habitación. Los sistemas de aire acondicionado equipados con controles adecuados y una válvula de inversión operan como acondicionadores de aire en verano y como bombas de calor en invierno.

## Desempeño de refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor

El desempeño de acondicionadores de aire y bombas de calor se expresa con frecuencia en términos del **índice de eficiencia de la energía** (EER, por sus siglas en inglés) o el **índice estacional de eficiencia energética** (SEER, por sus siglas en inglés), determinada por las siguientes normas de prueba. La SEER es la relación de la cantidad total del calor disipado por un acondicionador de aire o por una bomba térmica durante una estación normal de enfriamiento (en Btu) con respecto a la cantidad total de electricidad consumida (en watt-horas, Wh), y es una medida del desempeño estacional del equipo de enfriamiento. La EER, por otro lado, es una medida de la eficiencia energética instantánea, y se define como la relación de la tasa de remoción de calor del espacio enfriado por el equipo de enfriamiento con respecto a la tasa de consumo de electricidad en operación uniforme. Así, tanto la EER como la SEER tienen la unidad Btu/Wh. Si se considera que  $1 \text{ kWh} = 3\,412 \text{ Btu}$  y por ende que  $1 \text{ Wh} = 3.412 \text{ Btu}$ , una unidad que elimina  $1 \text{ kWh}$  de calor del espacio frío por cada kWh de electricidad que consume ( $\text{COP} = 1$ ), tendrá un EER de 3.412. Por lo tanto, la relación entre EER (o SEER) y COP es

$$\text{EER} = 3.1412 \text{ COP}_R$$

Para promover el uso eficiente de energía, los gobiernos de todo el mundo han decretado normas mínimas para el desempeño de equipo que consume energía. La mayor parte de los acondicionadores de aire o bombas de calor en el mercado tienen valores SEER de 13 a 21, lo cual corresponde a valores COP de 3.8 a 6.2. El mejor desempeño se logra usando unidades provistas de unidades motrices de velocidad variable (que también se conocen como “inversores”). Mediante un microprocesador, los compresores y ventiladores de velocidad variable permiten que la unidad opere a su máxima eficiencia para distintas necesidades de calentamiento y enfriamiento en determinadas condiciones climáticas. Por ejemplo, en el modo de acondicionamiento de aire operan a velocidades

mayores en días cálidos y a velocidades menores en días más fríos, así que se mejoran la eficiencia y el confort.

El EER o COP de un refrigerador disminuye con la decreciente temperatura de refrigeración, por lo tanto no es económico refrigerar a una temperatura menor a la necesaria. Los valores de COP para los refrigeradores están en el intervalo de 2.6 a 3.0 para áreas de edición y preparación; 2.3 a 2.6 para carne, embutidos, lácteos y frutas; 1.2 a 1.5 para alimentos congelados, y 1.0 a 1.2 para unidades de helados. Observe que el COP de los congeladores es casi la mitad del de los refrigeradores para carne, por lo tanto cuesta el doble enfriar productos a base de carne con aire refrigerado que está lo suficientemente frío para alimentos congelados. Una buena práctica de conservación de energía es usar sistemas de refrigeración separados para satisfacer diferentes necesidades de refrigeración.

**EJEMPLO 6-3 Análisis de un refrigerador doméstico**

Un refrigerador doméstico con un COP de 1.2 extrae calor del espacio refrigerado a razón de 60 kJ/min (Fig. 6-23). Determine *a*) la potencia eléctrica consumida por el refrigerador y *b*) la tasa de transferencia de calor hacia el aire de la cocina.

**SOLUCIÓN** Se da el COP y la tasa de refrigeración de un refrigerador, y se va a determinar el consumo de potencia y la tasa de rechazo de calor.

**Suposiciones** El refrigerador opera de manera continua.

**Análisis** *a*) Utilizando la definición de coeficiente de desempeño, la entrada de potencia se determina como

$$\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_R} = \frac{60 \text{ kJ/min}}{1.2} = 50 \text{ kJ/min} = 0.833 \text{ kW}$$

*b*) La transferencia de calor hacia la cocina se determina a partir del balance de energía,

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{neto,entrada}} = 60 + 50 = 110 \text{ kJ/min}$$

**Comentario** Observe que la energía removida del espacio refrigerado como calor y la energía suministrada al refrigerador como trabajo eléctrico, al final se manifiestan en el aire de la habitación y se vuelven parte de la energía interna del aire. Esto demuestra que la energía interna puede cambiar de una forma a otra, y moverse de un lugar a otro, pero nunca se destruye durante un proceso.

**EJEMPLO 6-4 Calentamiento de una casa mediante una bomba de calor**

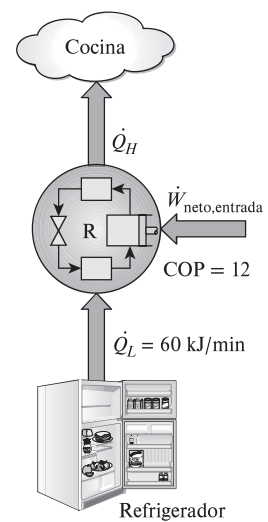
Se utiliza una bomba de calor para satisfacer los requerimientos de calefacción de una casa y mantenerla a 20 °C. Se estima que la casa pierde calor a una tasa de 80 000 kJ/h en un día en el que la temperatura del aire exterior desciende a -2 °C. Si la bomba de calor en estas condiciones tiene un COP de 2.5, determine *a*) la potencia consumida por la bomba de calor y *b*) la tasa a la que se extrae calor del aire frío exterior.

**SOLUCIÓN** Se conoce el COP de una bomba de calor. Se determinará el consumo de potencia y la tasa de absorción de calor.

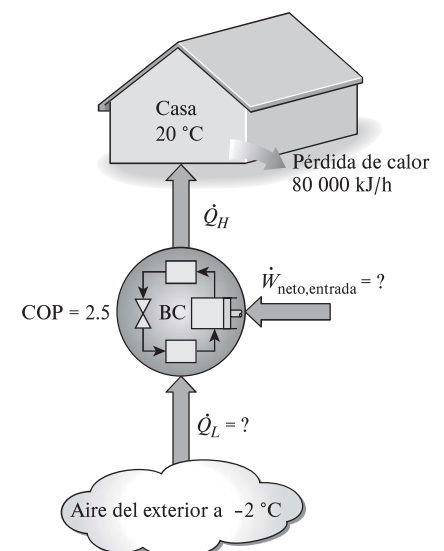
**Suposición** Existen condiciones operativas estacionarias.

**Análisis** *a*) El consumo de potencia de esta bomba de calor, mostrado en la figura 6-24, se determina a partir de la definición del coeficiente de desempeño como

$$\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{80\,000 \text{ kJ/h}}{2.5} = 32\,000 \text{ kJ/h} \text{ (u } 8.9 \text{ kW)}$$



**FIGURA 6-23**  
Esquema para el ejemplo 6-3.



**FIGURA 6-24**  
Esquema para el ejemplo 6-4.

b) La casa pierde calor a una tasa de 80 000 kJ/h, pero si se va a mantener a una temperatura constante de 20 °C, la bomba de calor debe entregarle calor a la misma tasa, es decir, a una de 80 000 kJ/h. Entonces la tasa de transferencia de calor desde el exterior se convierte en

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{neto, entrada}} = (80\,000 - 32\,000) \text{ kJ/h} = 48\,000 \text{ kJ/h}$$

**Comentario** Como en realidad 48 000 de los 80 000 kJ/h entregados a la casa se extraen del aire frío exterior, por lo tanto sólo se cuestan los 32 000 kJ/h suministrados como trabajo eléctrico a la bomba de calor. Si en cambio se usara un calentador de resistencia eléctrica, sería necesario suministrar los 80 000 kJ/h al calentador de resistencia como energía eléctrica. Esto significaría un costo por calefacción 2.5 veces mayor, lo cual explica la popularidad de las bombas de calor como sistemas de calefacción y por qué se prefieren en lugar de los calentadores de resistencia eléctrica a pesar de su costo inicial considerablemente mayor.

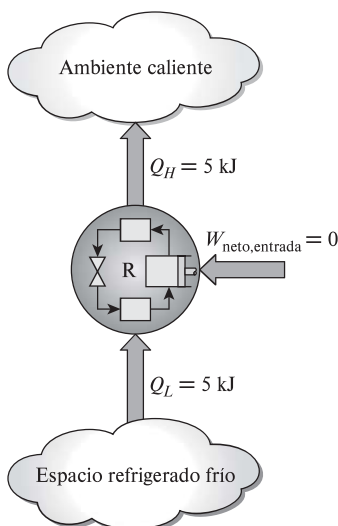
## La segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius

Hay dos enunciados clásicos de la segunda ley, el de Kelvin-Planck que se relaciona con las máquinas térmicas y analizado en la sección precedente, y el de Clausius, relacionado con refrigeradores o bombas de calor. El enunciado de Clausius se expresa como sigue:

Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.

Se sabe bien que el calor, por sí solo, no se transfiere de un medio frío a uno más caliente. El enunciado de Clausius no significa que sea imposible construir un dispositivo cíclico que transfiera calor de un medio frío a otro más caliente. De hecho, esto es en realidad lo que hace un refrigerador doméstico común. El enunciado establece simplemente que un refrigerador no puede operar a menos que su compresor sea propulsado mediante una fuente de energía externa, como un motor eléctrico (Fig. 6-25). De este modo, el efecto neto sobre los alrededores tiene que ver con el consumo de cierta energía en la forma de trabajo, además de la transferencia de calor de un cuerpo más frío a otro más caliente; es decir, deja un rastro en los alrededores. Por lo tanto, un refrigerador doméstico concuerda por completo con el enunciado de Clausius de la segunda ley.

Ambos enunciados de la segunda ley, el de Kelvin-Planck y el de Clausius, son negativos, y un enunciado de este tipo no se puede comprobar. Como cualquier otra ley física, la segunda ley de la termodinámica está basada en observaciones experimentales. A la fecha, no se ha realizado ningún experimento que contradiga la segunda ley y esto se debe tomar como prueba suficiente de su validez.



**FIGURA 6-25**

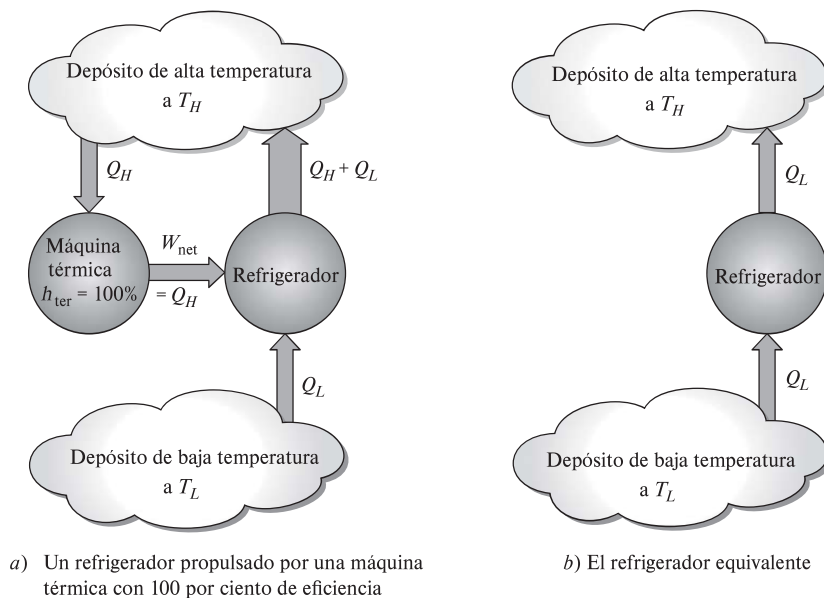
Éste es un refrigerador que viola el enunciado de Clausius de la segunda ley.

## Equivalencia de los dos enunciados

Los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius son equivalentes en sus consecuencias, y se puede usar cualquiera como expresión de la segunda ley de la termodinámica. Cualquier dispositivo que viole el enunciado de Kelvin-Planck también viola el de Clausius, y viceversa. Esto se puede demostrar como sigue.

Se tiene la combinación, mostrada en la figura 6-26a), de dos dispositivos: una máquina térmica y un refrigerador, combinación que opera entre los mismos dos depósitos. Se supone que la máquina térmica tiene, violando el enunciado de Kelvin-Planck, una eficiencia térmica de 100 por ciento y en consecuencia convierte todo el calor  $Q_H$  que recibe en trabajo  $W$ . Este trabajo se suministra ahora a un refrigerador que elimina calor en la cantidad  $Q_L$  del depósito de baja temperatura y rechaza calor en la cantidad de  $Q_L + Q_H$  hacia el depósito de alta temperatura. Durante este proceso, el depósito a alta temperatura recibe una cantidad neta de calor  $Q_L$  (la diferencia entre  $Q_L + Q_H$  y  $Q_H$ ). Así, la combinación de estos dos dispositivos se puede considerar como un refrigerador, como se ilustra en la figura 6-26b), que transfiere calor en una cantidad  $Q_L$  desde un cuerpo más frío hacia otro más caliente sin requerir ninguna entrada desde el exterior. Esto es una violación clara del enunciado de Clausius. Por lo tanto, se puede concluir que una violación del enunciado de Kelvin-Planck da como resultado una violación del enunciado de Clausius.

De una manera similar también se puede demostrar que una violación del enunciado de Clausius origina la violación del de Kelvin-Planck. Entonces, los enunciados de Clausius y Kelvin-Planck son dos expresiones equivalentes de la segunda ley de la termodinámica.



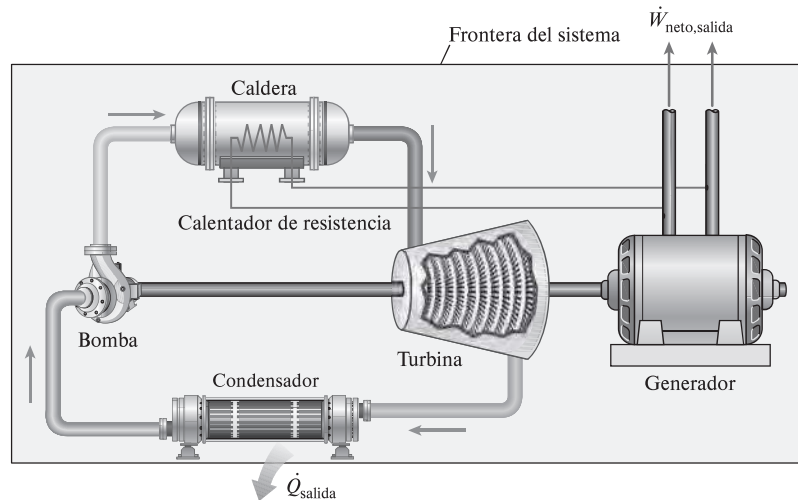
**FIGURA 6-26**  
Comprobación de que la violación del enunciado de Kelvin-Planck da lugar a la violación del enunciado de Clausius.

## 6-5 ■ MÁQUINAS DE MOVIMIENTO PERPETUO

Se ha expresado varias veces que un proceso no se puede llevar a cabo a menos que cumpla con la primera y la segunda ley de la termodinámica. Cualquier dispositivo que viola alguna de las dos leyes se llama **máquina de movimiento perpetuo** y, a pesar de numerosos intentos, no se sabe de alguna máquina de este tipo que haya funcionado. Pero esto no ha impedido que los inventores intenten crear nuevas.

Un dispositivo que viola la primera ley de la termodinámica (al *crear* energía) se llama **máquina de movimiento perpetuo de primera clase** (MMP1) y otro que viola la segunda ley se llama **máquina de movimiento perpetuo de segunda clase** (MMP2).

Considere la central eléctrica de vapor mostrada en la figura 6-27. Se propone calentar vapor mediante calentadores de resistencia colocados dentro de una caldera, en lugar de usar la energía que proporcionan los combustibles fósiles o nucleares. Parte de la electricidad generada en la planta se usará para alimentar los calentadores así como la bomba, mientras que el resto se suministrará a la red eléctrica como salida neta de trabajo. El inventor afirma que una vez encendido el sistema, esta central de energía producirá electricidad de forma indefinida sin requerir ninguna entrada de energía del exterior.



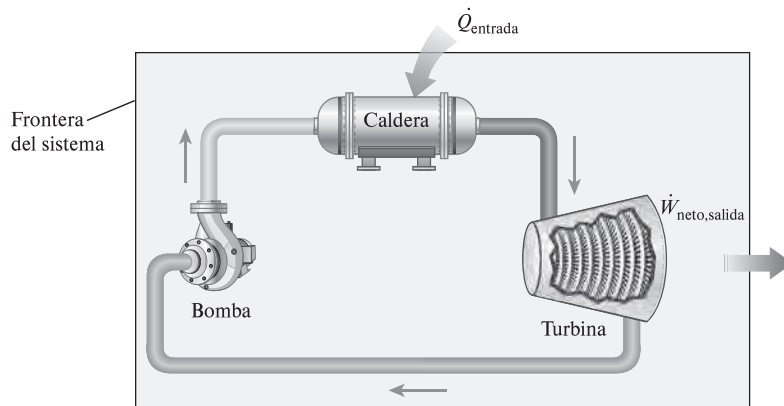
**FIGURA 6-27**

Máquina de movimiento perpetuo que viola la primera ley de la termodinámica (MMP1).

Pues bien, se tiene un invento que resolvería el problema mundial de energía, si funciona, por supuesto. Un examen cuidadoso de este invento revela que el sistema delimitado por el área sombreada suministra energía hacia el exterior en forma constante a una tasa de  $\dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{neto,salida}$  sin recibir ninguna energía. Es decir, este sistema crea energía a una tasa de  $\dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{neto,salida}$ , lo que es claramente una violación de la primera ley. Por lo tanto, este maravilloso dispositivo no es otra cosa que una MMP1 y no merece más consideración.

Ahora se toma en cuenta otra novedosa idea del mismo inventor. Convencido de que la energía no se puede crear, el inventor sugiere las siguientes modificaciones que mejorarán en gran medida la eficiencia térmica de esa central eléctrica sin violar la primera ley. Consciente de que más de la mitad del calor transferido al vapor en el horno se desecha en el condensador hacia el ambiente, el inventor sugiere deshacerse de este componente despilfarrador y enviar el vapor a la bomba tan pronto como sale de la turbina, como se muestra en la figura 6-28. De este modo, todo el calor transferido al vapor en la caldera se convertirá en trabajo y por lo tanto la planta tendrá una eficiencia teórica de 100 por ciento. El inventor comprende que ciertas pérdidas de calor y la fricción entre los componentes móviles son inevitables y que estos efectos dañarán un poco la eficiencia, pero aún espera que la eficiencia no sea menor a 80 por ciento (en oposición a 40 por ciento de la mayor parte de las centrales de energía reales) para un sistema diseñado con cuidado.

Pues bien, la posibilidad de duplicar la eficiencia sería realmente tentadora para los administradores de la central, y si no tuvieran la capacitación adecuada probablemente darían a esta idea una oportunidad, porque desde el punto de vista intuitivo no ven nada malo en esto. Sin embargo, un estudiante de termodinámica de inmediato identifica a este dispositivo como una MMP2, ya que funciona en un ciclo y realiza una cantidad neta de trabajo mientras

**FIGURA 6-28**

Máquina de movimiento perpetuo que viola la segunda ley de la termodinámica (MMP2).

intercambia calor con un solo depósito (el horno). Satisface la primera ley pero viola la segunda y, por lo tanto, no funcionará.

Incontables máquinas de movimiento perpetuo han sido propuestas a lo largo de la historia, y habrá muchas más. Algunos incluso han patentado sus inventos, sólo para encontrar que lo que en realidad tienen en sus manos es un trozo de papel sin valor.

Algunos inventores de máquinas de movimiento perpetuo tuvieron éxito en conseguir fondos. Por ejemplo, un carpintero de Filadelfia de nombre J. W. Kelly reunió millones de dólares de inversionistas entre 1874 y 1898 para su *máquina de vacío pulsante hidroneumática*, que supuestamente podía mover 3 000 millas a un tren con 1 L de agua. Por supuesto, nunca lo logró. Después de su muerte en 1898, los investigadores descubrieron que la máquina de demostración era propulsada mediante un motor oculto. En fechas recientes, a un grupo de inversionistas se le propuso invertir 2.5 millones de dólares en un misterioso *incrementador de energía* que multiplicaba cualquier energía que utilizara, pero el abogado de los inversionistas quería primero la opinión de un experto. Confrontado por los científicos, el “inventor” abandonó la escena sin incluso intentar poner en funcionamiento su máquina de demostración.

Cansada de las aplicaciones que proponían máquinas de movimiento perpetuo, la Oficina de Patentes de Estados Unidos decretó en 1918 que ya no consideraría ninguna de éstas. Sin embargo, todavía se archivaron varias aplicaciones patentadas de esta clase y muchas pasaron inadvertidas por la oficina de patentes. Algunos aspirantes cuyas aplicaciones patentadas fueron refutadas recurrieron a la justicia; por ejemplo, en 1982 la Oficina de Patentes estadounidense descartó como otra máquina de movimiento perpetuo a un enorme dispositivo provisto de varios cientos de kilogramos de imanes giratorios y kilómetros de alambre de cobre que se supone genera más electricidad que la consumida a partir de un paquete de baterías. Sin embargo, el inventor impugnó la decisión y en 1985 la Oficina Nacional de Estándares probó finalmente la máquina sólo para certificar que funciona con baterías. No obstante, esto no convenció al inventor de que su máquina no funcionará.

Las personas que proponen máquinas de movimiento perpetuo por lo común tienen mentes innovadoras, pero carecen de capacitación en ingeniería formal, lo cual es muy desafortunado. Nadie está exento de ser defraudado por una máquina de movimiento perpetuo, sin embargo, como reza el refrán: “Si algo suena demasiado bueno para ser verdad, es poco probable que lo sea”.

## 6-6 ■ PROCESOS REVERSIBLES E IRREVERSIBLES ▶

La segunda ley de la termodinámica establece que ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia de 100 por ciento. Entonces cabe preguntar, ¿cuál es la eficiencia más alta que pudiera tener una máquina térmica? Antes de contestarla es necesario definir primero un proceso idealizado, llamado *proceso reversible*.

Los procesos que se estudiaron al comienzo de este capítulo ocurrieron en cierta dirección, y una vez ocurridos, no se pueden revertir por sí mismos de forma espontánea y restablecer el sistema a su estado inicial. Por esta razón se clasifican como *procesos irreversibles*. Una vez que se enfría una taza de café, no se calentará al recuperar de los alrededores el calor que perdió. Si eso fuera posible, tanto los alrededores como el sistema (café) volverían a su condición original, y esto sería un proceso reversible.

Un **proceso reversible** se define como un *proceso que se puede invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores* (Fig. 6-29). Es decir, tanto el sistema como los alrededores vuelven a sus estados iniciales una vez finalizado el proceso inverso. Esto es posible sólo si el intercambio de calor y trabajo netos entre el sistema y los alrededores es cero para el proceso combinado (original e inverso). Los procesos que no son reversibles se denominan **procesos irreversibles**.

Se debe señalar que es posible volver un sistema a su estado original siguiendo un proceso, sin importar si éste es reversible o irreversible. Pero para procesos reversibles, esta restauración se hace sin dejar ningún cambio neto en los alrededores, mientras que para procesos irreversibles los alrededores normalmente hacen algún trabajo sobre el sistema, por lo tanto no vuelven a su estado original.

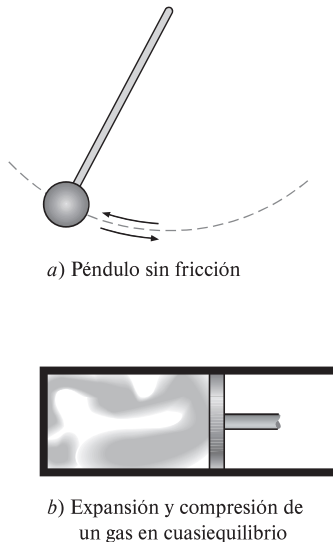
Los procesos reversibles en realidad no ocurren en la naturaleza, sólo son *idealizaciones* de procesos reales. Los reversibles se pueden aproximar mediante dispositivos reales, pero nunca se pueden lograr; es decir, todos los procesos que ocurren en la naturaleza son irreversibles. Entonces, quizá se pregunte *por qué* preocuparse de esta clase de procesos ficticios. Hay dos razones: una es que son fáciles de analizar, puesto que un sistema pasa por una serie de estados de equilibrio durante un proceso reversible; y otra es que sirven como modelos idealizados con los que es posible comparar los procesos reales.

En la vida diaria, el concepto de una “persona correcta” es también una idealización, tal como el concepto de un proceso reversible (perfecto). Quienes insisten en hallar a esa persona correcta para establecerse están condenados a permanecer solos el resto de sus vidas. La posibilidad de hallar la pareja ideal no es mayor que la de hallar un proceso perfecto (reversible). Del mismo modo, una persona que insiste en tener amigos perfectos seguramente no tiene amigos.

Los ingenieros están interesados en procesos reversibles porque los dispositivos que producen trabajo, como motores de automóviles y turbinas de gas o vapor, *entregan el máximo de trabajo*, y los dispositivos que consumen trabajo, como compresores, ventiladores y bombas, *consumen el mínimo de trabajo* cuando se usan procesos reversibles en lugar de irreversibles (Fig. 6-30).

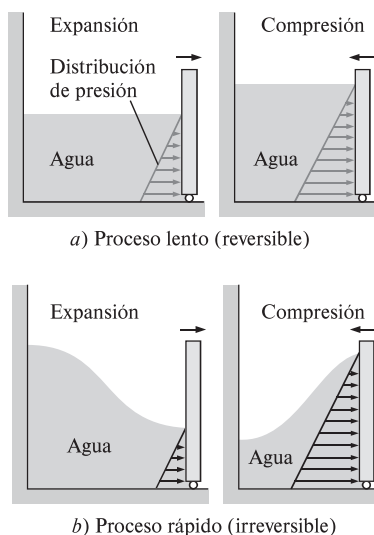
Los procesos reversibles pueden ser considerados como *límites teóricos* para los irreversibles correspondientes. Algunos procesos son más irreversibles que otros. Quizá nunca se tenga un proceso reversible, pero es posible aproximarse. A medida que se tiende hacia un proceso reversible, un dispositivo entrega más trabajo o requiere menos trabajo.

El concepto de proceso reversible conduce a la definición de **eficiencia según la segunda ley** para procesos reales, que es el grado de aproximación al



**FIGURA 6-29**

Dos procesos reversibles comunes.



**FIGURA 6-30**

Los procesos reversibles entregan el mayor trabajo posible y consumen el menor.

proceso reversible correspondiente. Esto permite comparar el desempeño de diferentes dispositivos diseñados para hacer la misma tarea con base en sus eficiencias. Mientras mejor sea el diseño, menores son las irreversibilidades y mayor es la eficiencia según la segunda ley.

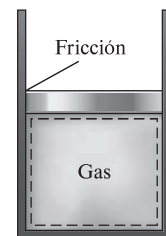
## Irreversibilidades

Los factores que causan que un proceso sea irreversible se llaman **irreversibilidades**, las cuales son la fricción, la expansión libre, el mezclado de dos fluidos, la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita, la resistencia eléctrica, la deformación inelástica de sólidos y las reacciones químicas. La presencia de cualquiera de estos efectos hace que un proceso sea irreversible. Un proceso reversible no incluye ninguno de ellos. Algunas de las irreversibilidades encontradas con mayor frecuencia se analizan brevemente a continuación.

La **fricción** es una forma familiar de irreversibilidad relacionada con cuerpos en movimiento. Cuando dos cuerpos en contacto son forzados a moverse uno respecto al otro (un émbolo en un cilindro, por ejemplo, como se ilustra en la figura 6-31), en la interfaz de ambos se desarrolla una fuerza de fricción que se opone al movimiento, por lo que se requiere algo de trabajo para vencer esta fuerza de fricción. La energía suministrada como trabajo se convierte finalmente en calor durante el proceso y se transfiere hacia los cuerpos en contacto, como lo evidencia un aumento de temperatura en la interfaz. Cuando se invierte la dirección del movimiento, los cuerpos se restablecen a su posición original, pero la interfaz no se enfría y el calor no se convierte de nuevo en trabajo. En cambio, algo más del trabajo se convierte en calor mientras se vencen las fuerzas de fricción que también se oponen al movimiento inverso. Dado que el sistema (los cuerpos en movimiento) y los alrededores no pueden ser regresados a sus estados originales, este proceso es irreversible. Mientras más grandes sean las fuerzas de fricción, más irreversible es el proceso.

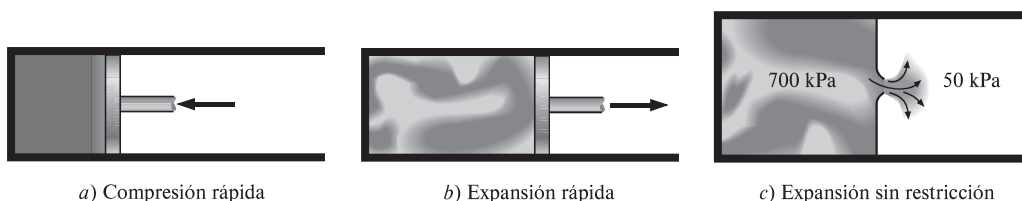
La fricción no siempre tiene relación con dos cuerpos sólidos en contacto. También se encuentra entre un fluido y un sólido e incluso entre las capas de un fluido que se mueven a distintas velocidades. Una fricción considerable de la potencia que produce el motor de un automóvil se emplea para vencer la fricción (la fuerza aerodinámica) entre el aire y las superficies externas del automóvil, fricción que en algún momento se vuelve parte de la energía interna del aire. No es posible invertir este proceso y recuperar la energía perdida, aunque hacerlo no violaría el principio de conservación de la energía.

Otro ejemplo de irreversibilidad es la **expansión libre de un gas**, el cual se halla separado de un vacío mediante una membrana, como se ilustra en la figura 6-32. Cuando se rompe la membrana, el gas llena todo el recipiente y la única forma de restaurar el sistema a su estado original es comprimirlo a su volumen inicial, transfiriendo calor del gas hasta que alcance su temperatura inicial. De las consideraciones de conservación de la energía, se puede demostrar sin dificultad que la cantidad de calor transferida del gas es igual a la cantidad de trabajo que los



**FIGURA 6-31**

La fricción hace que un proceso sea irreversible.



**FIGURA 6-32**

Procesos de compresión y expansión irreversibles.

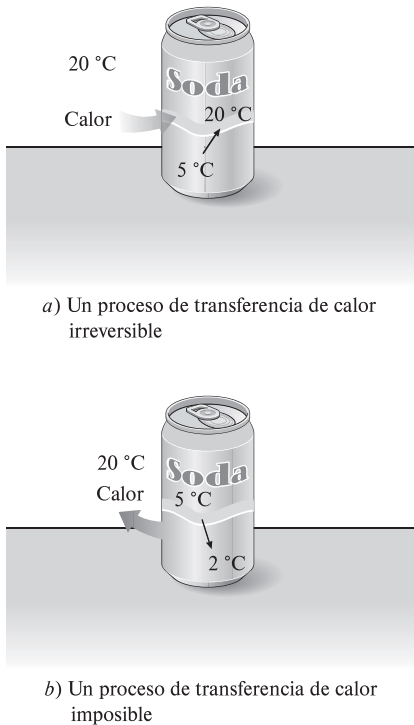


FIGURA 6-33

a) La transferencia de calor debida a una diferencia de temperatura es irreversible y b) el proceso inverso es imposible.

alrededores realizan sobre el gas. La restauración de los alrededores requiere convertir por completo este calor en trabajo, lo cual violaría la segunda ley. Por lo tanto, la expansión libre de un gas es un proceso irreversible.

Una tercera forma de irreversibilidad conocida es la **transferencia de calor** debida a una diferencia finita de temperatura. Considere una lata de bebida carbonatada fría que se deja en un espacio caliente (Fig. 6-33). El calor se transfiere desde el aire de la habitación que se encuentra a mayor temperatura hacia la lata que está más fría. La única forma de invertir este proceso y restablecer la temperatura original de la lata de soda es proporcionarle refrigeración, lo cual requiere algo de entrada de trabajo. Al final del proceso inverso, la soda vuelve a su estado original, pero no los alrededores. La energía interna de éstos se incrementa en una cantidad igual en magnitud al trabajo suministrado al refrigerador. Restablecer los alrededores a su estado inicial sólo es posible si se convierte este exceso de energía interna completamente en trabajo, lo cual es imposible sin violar la segunda ley. Como sólo el sistema, no el sistema y los alrededores, puede ser restablecido a su condición inicial, la transferencia de calor ocasionada por una diferencia finita de temperatura es un proceso irreversible.

La transferencia de calor puede ocurrir sólo cuando hay una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores, por lo tanto es físicamente imposible tener un proceso de transferencia de calor reversible. Pero un proceso de transferencia de calor se vuelve cada vez menos reversible a medida que la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos se aproxima a cero. Entonces, la transferencia de calor por una diferencia de temperatura diferencial  $dT$  se puede considerar como reversible. Cuando  $dT$  se aproxima a cero, el proceso puede cambiar de dirección (por lo menos en teoría) sin requerir ninguna refrigeración. Observe que la transferencia de calor irreversible es un proceso conceptual y no es posible reproducirlo en el mundo real.

Mientras más pequeña sea la diferencia de temperatura entre dos cuerpos, más pequeña será la tasa de transferencia de calor. Cualquier transferencia de calor importante debida a una diferencia de temperatura pequeña requiere un área superficial muy grande y un tiempo muy largo. Por lo tanto, aunque desde un punto de vista termodinámico es deseable aproximarse a la transferencia de calor reversible, es impráctico y no factible económicamente.

## Procesos interna y externamente reversibles

Un proceso representativo tiene que ver con interacciones entre un sistema y sus alrededores, y uno reversible no conlleva irreversibilidades relacionadas con cualquiera de ellos.

Un proceso se denomina **internamente reversible** si no ocurren irreversibilidades dentro de las fronteras del sistema durante el proceso. Durante un proceso internamente reversible, un sistema pasa por una serie de estados de equilibrio, y cuando se invierte el proceso, el sistema pasa por los mismos estados de equilibrio mientras vuelve a su estado inicial. Es decir, las trayectorias de los procesos inverso y directo coinciden para un proceso internamente reversible. El proceso de cuasiequilibrio es un ejemplo de un proceso internamente reversible.

Un proceso es denominado **externamente reversible** si no ocurren irreversibilidades fuera de las fronteras del sistema durante el proceso. La transferencia de calor entre un depósito y un sistema es un proceso externamente reversible si la superficie exterior del sistema está a la temperatura del depósito.

Se le denomina a un proceso **totalmente reversible**, o nada más **reversible**, si no tiene que ver con irreversibilidades dentro del sistema o sus alrededores (Fig. 6-34). En un proceso de este tipo no hay transferencia de calor debida a

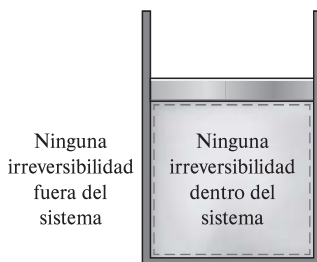


FIGURA 6-34

Un proceso reversible no involucra irreversibilidades internas y externas.

una diferencia finita de temperatura, ni cambios de no cuasiequilibrio y tampoco fricción u otros efectos disipadores.

Como ejemplo, considere la transferencia de calor de dos sistemas idénticos que experimentan un proceso de cambio de fase a presión constante (y por ende, a temperatura constante), como se muestra en la figura 6-35. Ambos procesos son internamente reversibles, porque se llevan a cabo de forma isotérmica y ambos pasan por exactamente los mismos estados de equilibrio. El primer proceso mostrado es también externamente reversible, ya que la transferencia de calor para este proceso tiene lugar debido a una diferencia de temperatura infinitesimal  $dT$ . Sin embargo, el segundo proceso es externamente irreversible, ya que hay transferencia de calor ocasionada por una diferencia finita de temperatura  $\Delta T$ .

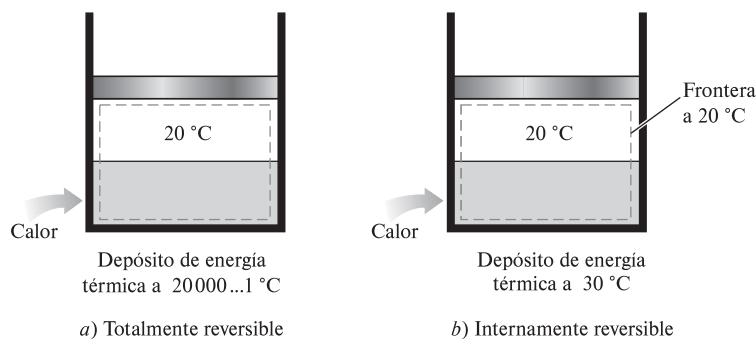


FIGURA 6-35

Procesos de transferencia de calor total e internamente reversibles.

## 6-7 ■ EL CICLO DE CARNOT

Se mencionó anteriormente que las máquinas térmicas son dispositivos cíclicos y que el fluido de trabajo de una de estas máquinas vuelve a su estado inicial al final de cada ciclo. Durante una parte del ciclo el fluido realiza trabajo y durante otra se hace trabajo sobre el fluido. La diferencia entre estos dos trabajos es el trabajo neto que entrega la máquina térmica. La eficiencia del ciclo de una máquina térmica depende en gran medida de cómo se ejecute cada uno de los procesos que constituyen el ciclo. El trabajo neto y, por lo tanto, la eficiencia del ciclo, se pueden maximizar mediante procesos que requieren la mínima cantidad de trabajo y entregan lo más posible, es decir, mediante *procesos reversibles*. Por lo tanto, no es sorprendente que los ciclos más eficientes sean los reversibles, o sea, ciclos que consisten por completo en procesos reversibles.

En la práctica no es posible lograr ciclos reversibles porque no se pueden eliminar las irreversibilidades relacionadas con cada proceso. Sin embargo, los ciclos reversibles proporcionan límites superiores al desempeño de los ciclos reales. Las máquinas térmicas y los refrigeradores que funcionan en ciclos reversibles sirven como modelos con los cuales podemos comparar las máquinas térmicas y los refrigeradores reales. Los ciclos reversibles también sirven como puntos de partida en el desarrollo de ciclos reales y se modifican según sea necesario para satisfacer ciertos requerimientos.

Es probable que el ciclo reversible más conocido sea el **ciclo de Carnot**, propuesto en 1824 por el ingeniero francés Sadi Carnot. La máquina térmica teórica que opera en el ciclo de Carnot se llama **máquina térmica de Carnot**, cuyo ciclo se compone de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos, y que es posible llevar a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario.

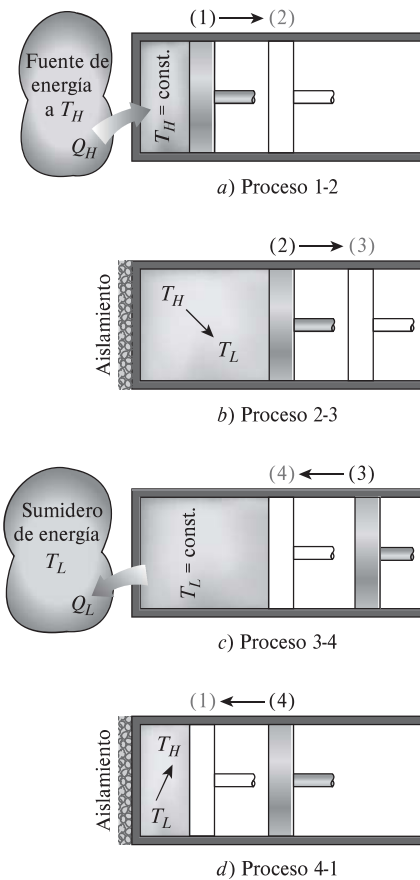


FIGURA 6-36

Ejecución de un ciclo de Carnot en un sistema cerrado.

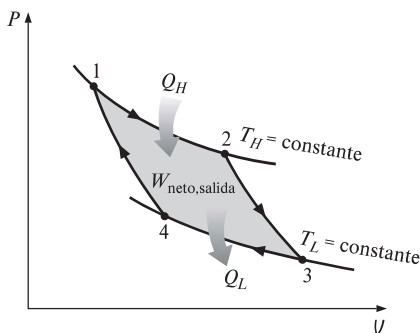


FIGURA 6-37

Diagrama  $P$ - $V$  de un ciclo de Carnot.

Considere un sistema cerrado conformado por un gas contenido en un dispositivo de cilindro-émbolo adiabático, como se ilustra en la figura 6-36. El aislamiento de la cabeza del cilindro es tal que puede ser eliminado para poner al cilindro en contacto con depósitos que proporcionan transferencia de calor. Los cuatro procesos reversibles que conforman el ciclo de Carnot son los siguientes:

**Expansión isotérmica reversible** (proceso 1-2,  $T_H = \text{constante}$ ). Inicialmente (estado 1), la temperatura del gas es  $T_H$  y la cabeza del cilindro está en contacto estrecho con una fuente a temperatura  $T_H$ . Se permite que el gas se expanda lentamente y que realice trabajo sobre los alrededores. Cuando el gas se expande su temperatura tiende a disminuir, pero tan pronto como disminuye la temperatura en una cantidad infinitesimal  $dT$ , cierta cantidad de calor se transfiere del depósito hacia el gas, de modo que la temperatura de éste se eleva a  $T_H$ . Así, la temperatura del gas se mantiene constante en  $T_H$ . Como la diferencia de temperatura entre el gas y el depósito nunca excede una cantidad diferencial  $dT$ , éste es un proceso reversible de transferencia de calor. El proceso continúa hasta que el émbolo alcanza la posición 2. La cantidad de calor total transferido al gas durante este proceso es  $Q_H$ .

**Expansión adiabática reversible** (proceso 2-3, la temperatura disminuye de  $T_H$  a  $T_L$ ). En el estado 2, el depósito que estuvo en contacto con la cabeza del cilindro se elimina y se reemplaza por aislamiento para que el sistema se vuelva adiabático. El gas continúa expandiéndose lentamente y realiza trabajo sobre los alrededores hasta que su temperatura disminuye de  $T_H$  a  $T_L$  (estado 3). Se supone que el émbolo no experimenta fricción y el proceso está en cuasiequilibrio, de modo que el proceso es reversible así como adiabático.

**Compresión isotérmica reversible** (proceso 3-4,  $T_L = \text{constante}$ ). En el estado 3, se retira el aislamiento de la cabeza del cilindro y se pone a éste en contacto con un sumidero a temperatura  $T_L$ . Después, una fuerza externa empuja al cilindro hacia el interior, de modo que se realiza trabajo sobre el gas. A medida que el gas se comprime, su temperatura tiende a incrementarse, pero tan pronto como aumenta una cantidad infinitesimal  $dT$ , el calor se transfiere desde el gas hacia el sumidero, lo que causa que la temperatura del gas descienda a  $T_L$ . Así, la temperatura del gas permanece constante en  $T_L$ . Como la diferencia de temperatura entre el gas y el sumidero nunca excede una cantidad diferencial  $dT$ , éste es un proceso de transferencia de calor reversible, el cual continúa hasta que el émbolo alcanza el estado 4. La cantidad de calor rechazado del gas durante este proceso es  $Q_L$ .

**Compresión adiabática reversible** (proceso 4-1, la temperatura sube de  $T_L$  a  $T_H$ ).

El estado 4 es tal que cuando se elimina el depósito de baja temperatura, se coloca el aislamiento de nuevo en la cabeza del cilindro y se comprime el gas de manera reversible, entonces el gas vuelve a su estado inicial (estado 1). La temperatura sube de  $T_L$  a  $T_H$  durante este proceso de compresión adiabático reversible, que completa el ciclo.

El diagrama  $P$ - $V$  de este ciclo se muestra en la figura 6-37. Recuerde que en un diagrama de este tipo el área bajo la curva del proceso representa el trabajo de frontera para procesos en cuasiequilibrio (internamente reversible); se observa entonces que para este caso el área bajo la curva 1-2-3 es el trabajo que realiza el gas durante la parte de expansión del ciclo, y el área bajo la curva 3-4-1 es el trabajo realizado sobre el gas durante la parte de compresión del ciclo. El área que encierra la trayectoria del ciclo (área 1-2-3-4-1) es la diferencia entre estas dos y representa el trabajo neto hecho durante el ciclo.

Observe que si se actuara de manera poco generosa y, en un esfuerzo por ahorrar  $Q_L$ , comprimiéndose el gas de forma adiabática en el estado 3 en lugar de hacerlo de modo isotérmico, se terminaría de nuevo en el estado 2, de manera que se volvería a trazar la trayectoria de proceso 3-2. De este modo se ahorraría  $Q_L$  pero no se podría obtener ninguna salida de trabajo neto de esta máquina. Esto ilustra una vez más la necesidad de que una máquina térmica intercambie calor con al menos dos depósitos a diferentes temperaturas para operar en un ciclo y producir una cantidad neta de trabajo.

El ciclo de Carnot también se puede aplicar en un sistema de flujo estacionario. En capítulos posteriores se analiza esta posibilidad junto con otros ciclos de potencia.

Por ser un ciclo reversible, el de Carnot es el más eficiente que opera entre dos límites de temperatura especificados. Aun cuando el ciclo de Carnot no se puede lograr en la realidad, la eficiencia de los ciclos reales se mejora al intentar aproximarse lo más posible al de Carnot.

### Ciclo de Carnot inverso

El ciclo de la máquina térmica de Carnot recién descrito es totalmente reversible, por lo tanto todos los procesos que abarca se pueden *invertir*, en cuyo caso se convierte en el **ciclo de refrigeración de Carnot**. Esta vez, el ciclo es exactamente el mismo excepto que las direcciones de las interacciones de calor y trabajo están invertidas: el calor en la cantidad  $Q_L$  se absorbe de un depósito a baja temperatura, el calor en la cantidad  $Q_H$  se rechaza hacia un depósito a alta temperatura, y se requiere una cantidad de trabajo  $W_{\text{neto,entrada}}$  para completar todo esto.

El diagrama  $P$ - $V$  del ciclo de Carnot invertido es el mismo que corresponde al ciclo de Carnot, excepto que se invierten las direcciones de los procesos, como se muestra en la figura 6-38.

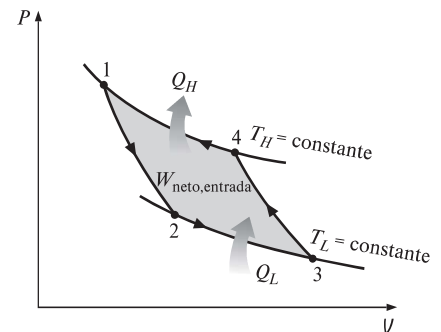


FIGURA 6-38

Diagrama  $P$ - $V$  de un ciclo inverso de Carnot.

## 6-8 ■ PRINCIPIOS DE CARNOT

La segunda ley de la termodinámica restringe la operación de dispositivos cíclicos según se expresa mediante los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius. Una máquina térmica no puede operar intercambiando calor con un solo depósito, y un refrigerador no llega a funcionar sin una entrada neta de energía de una fuente externa.

Se pueden obtener valiosas conclusiones a partir de estos enunciados; dos de éstas son sobre la eficiencia térmica de máquinas reversibles e irreversibles (es decir, reales) y se conocen como **principios de Carnot** (Fig. 6-39), los cuales se expresan como:

1. La eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia de una reversible que opera entre los mismos dos depósitos.
2. Las eficiencias de las máquinas térmicas reversibles que operan entre los mismos dos depósitos son las mismas.

Estos dos enunciados se pueden comprobar mediante la demostración de que la violación de cualquiera de éstos da como resultado la violación de la segunda ley de la termodinámica.

Para comprobar el primer enunciado, considere dos máquinas térmicas que operan entre los mismos depósitos, como se ilustra en la figura 6-40; una es reversible y la otra irreversible. Después a cada máquina se le suministra la

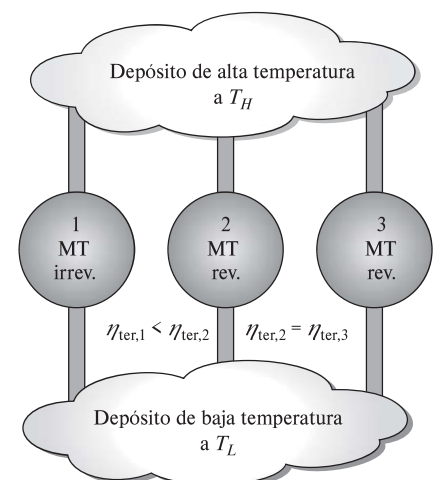


FIGURA 6-39

Principios de Carnot.

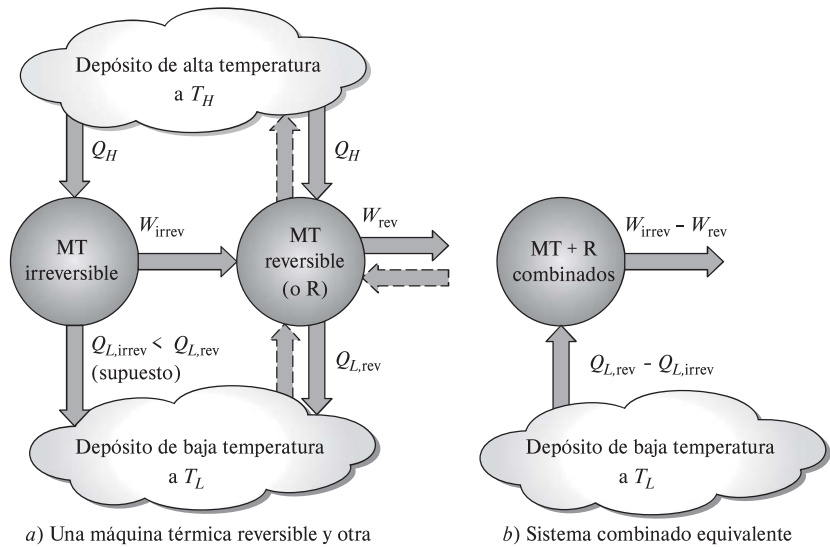


FIGURA 6-40

Comprobación del primer principio de Carnot.

a) Una máquina térmica reversible y otra irreversible entre los mismos dos depósitos (la máquina térmica reversible se invierte para que funcione como refrigerador)

b) Sistema combinado equivalente

misma cantidad de calor  $Q_H$ . La cantidad de trabajo producida por la máquina térmica reversible es  $W_{rev}$  y la que produce la irreversible es  $W_{irrev}$ .

Violando el primer principio de Carnot, se supone que la máquina térmica irreversible es más eficiente que la reversible (es decir,  $\eta_{ter,irrev} > \eta_{ter,rev}$ ), por lo tanto entrega más trabajo que la reversible. Ahora se invierte la máquina térmica reversible y opera como refrigerador, el cual recibirá una entrada de trabajo de  $W_{rev}$  y rechazará calor hacia el depósito de alta temperatura. Como el refrigerador está rechazando calor en la cantidad de  $Q_H$  hacia el depósito de temperatura alta y la máquina térmica irreversible está recibiendo la misma cantidad de calor desde este depósito, el intercambio de calor neto para este depósito es cero. Así, éste se podría eliminar si la descarga  $Q_H$  del refrigerador va directamente a la máquina térmica irreversible.

Ahora, si se consideran juntos el refrigerador y la máquina irreversible, se tiene una máquina que produce un trabajo neto en la cantidad de  $W_{irrev} - W_{rev}$  mientras intercambia calor con un solo depósito, lo cual viola el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley. Por lo tanto, la suposición inicial de que  $\eta_{ter,irrev} > \eta_{ter,rev}$  es incorrecta. Entonces, se concluye que ninguna máquina térmica puede ser más eficiente que una máquina térmica reversible que opera entre los mismos depósitos.

También es posible comprobar de manera similar el segundo principio de Carnot. Esta vez, se reemplaza la máquina irreversible por otra reversible que es más eficiente, por lo tanto entrega más trabajo que la primera máquina reversible. Siguiendo el mismo razonamiento, se tiene al final una máquina que produce una cantidad neta de trabajo mientras se intercambia calor con un solo depósito, lo cual viola la segunda ley. Así, se concluye que ninguna máquina térmica reversible puede ser más eficiente que otra que opera entre los mismos dos depósitos, sin importar cómo se completa el ciclo o la clase de fluido utilizado.

## 6-9 ■ ESCALA TERMODINÁMICA DE TEMPERATURA

Una escala de temperatura que es independiente de las propiedades de las sustancias utilizadas para medir la temperatura se denomina **escala termodinámica de temperatura**, la cual ofrece grandes ventajas en los cálculos termodinámicos,

y su derivación se da a continuación por medio de algunas máquinas térmicas reversibles.

El segundo principio de Carnot, analizado en la sección 6-8, establece que todas las máquinas térmicas reversibles tienen la misma eficiencia térmica cuando operan entre los mismos dos depósitos (Fig. 6-41). Es decir, la eficiencia de una máquina reversible es independiente del fluido de trabajo utilizado y las propiedades de éste, así como del modo de ejecutar el ciclo o el tipo de máquina reversible usada. Como los depósitos de energía se caracterizan por sus temperaturas, la eficiencia térmica de las máquinas térmicas reversibles está en función únicamente de las temperaturas del depósito; es decir,

$$\eta_{\text{ter,rev}} = g(T_H, T_L)$$

o bien,

$$\frac{Q_H}{Q_L} = f(T_H, T_L) \quad (6-13)$$

ya que  $\eta_{\text{ter}} = 1 - Q_L/Q_H$ . En estas relaciones,  $T_H$  y  $T_L$  son las temperaturas de los depósitos de alta y baja temperatura, respectivamente.

La forma funcional de  $f(T_H, T_L)$  se puede desarrollar con la ayuda de las tres máquinas térmicas reversibles mostradas en la figura 6-42. Las máquinas A y C reciben la misma cantidad de calor  $Q_1$  del depósito de alta temperatura a  $T_1$ , la C rechaza  $Q_3$  hacia el depósito de baja temperatura a  $T_3$ , la B recibe el calor  $Q_2$  rechazado por la máquina A a la temperatura  $T_2$  y rechaza calor en la cantidad de  $Q_3$  hacia el depósito a  $T_3$ .

Las cantidades de calor que rechazan las máquinas B y C deben ser las mismas porque las máquinas A y B se pueden combinar en otra reversible que opera entre los mismos depósitos en que lo hace la máquina C, por lo tanto la máquina combinada tendrá la misma eficiencia de la máquina C. Como la entrada de calor a la máquina C es la misma que la entrada de calor a las combinadas A y B, ambos sistemas deben rechazar la misma cantidad de calor.

Al aplicar la ecuación 6-13 a las tres máquinas por separado se obtiene

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2), \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3) \quad \text{y} \quad \frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3)$$

Ahora considere la identidad

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{Q_2}{Q_3}$$

la cual corresponde a

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \cdot f(T_2, T_3)$$

Un cuidadoso análisis de esta ecuación revela que el lado izquierdo es una función de  $T_1$  y  $T_3$  y, por lo tanto, el derecho debe ser también solamente una función de  $T_1$  y  $T_3$ , y no de  $T_2$ . Es decir, el valor del producto en el lado derecho de la ecuación es independiente del valor de  $T_2$ . Esta condición se satisfará sólo si la función  $f$  tiene la forma:

$$f(T_1, T_2) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_2)} \quad \text{y} \quad f(T_2, T_3) = \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_3)}$$

de modo que  $\phi(T_2)$  se cancelará del producto de  $f(T_1, T_2)$  y  $f(T_2, T_3)$ , lo que produce

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_3) = \frac{\phi(T_1)}{\phi(T_3)} \quad (6-14)$$

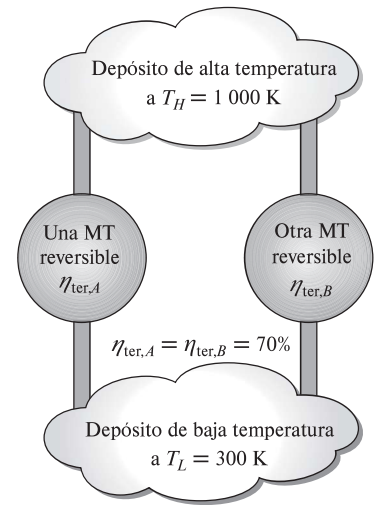


FIGURA 6-41

Las máquinas térmicas reversibles que operan entre los mismos dos depósitos tienen la misma eficiencia (segundo principio de Carnot).

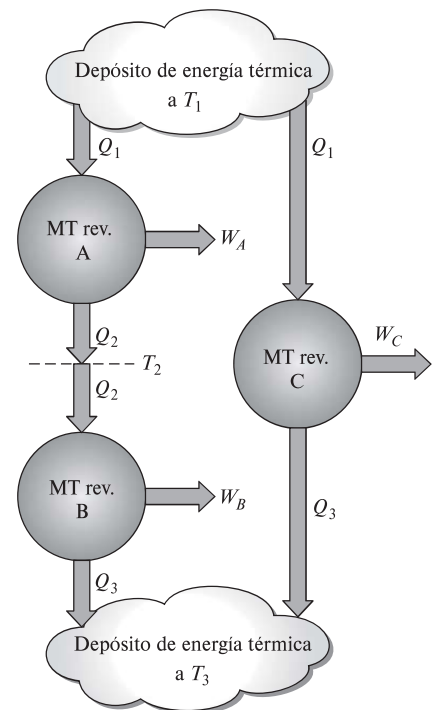


FIGURA 6-42

Configuración de máquinas térmicas utilizada para desarrollar la escala termodinámica de temperatura.

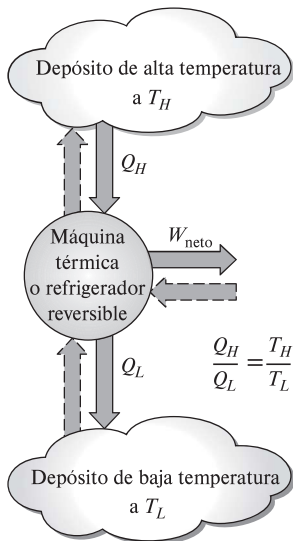


FIGURA 6-43

Para ciclos reversibles, la relación de transferencia de calor  $Q_H/Q_L$  se puede reemplazar por la relación de temperatura absoluta  $T_H/T_L$ .

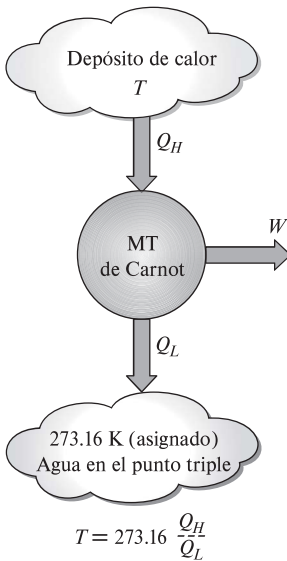


FIGURA 6-44

Planteamiento conceptual del experimento para determinar las temperaturas termodinámicas en la escala Kelvin con la medición de las transferencias de calor  $Q_H$  y  $Q_L$ .

Esta relación es mucho más específica que la ecuación 6-13 para la forma funcional de  $Q_1/Q_3$  en términos de  $T_1$  y  $T_3$ .

Para una máquina térmica reversible que opera entre dos depósitos a temperaturas  $T_H$  y  $T_L$ , la ecuación 6-14 se puede escribir como

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{\phi(T_H)}{\phi(T_L)} \quad (6-15)$$

Éste es el único requerimiento que impone la segunda ley a la relación de las transferencias de calor hacia y desde máquinas térmicas reversibles. Varias funciones  $\phi(T)$  satisfacen esta ecuación, por lo que la elección es completamente arbitraria. Lord Kelvin propuso primero tomar  $\phi(T) = T$  para definir una escala de temperatura termodinámica como (Fig. 6-43)

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L} \quad (6-16)$$

Esta escala de temperatura se llama **escala Kelvin** y las temperaturas listadas ahí se denominan **temperaturas absolutas**. En la escala Kelvin, las relaciones de temperatura dependen de las relaciones de transferencia de calor entre una máquina térmica reversible y los depósitos, y son independientes de las propiedades físicas de cualquier sustancia. En esta escala las temperaturas varían entre cero e infinito.

La escala termodinámica de temperatura no se define por completo mediante la ecuación 6-16, ya que sólo da una relación de temperaturas absolutas. También se necesita saber la magnitud de un kelvin. En la Conferencia Internacional sobre Pesos y Medidas celebrada en 1954 se asignó al punto triple del agua (el estado en el que existen en equilibrio las tres fases del agua) el valor de 273.16 K (Fig. 6-44). La *magnitud de un kelvin* se definió como  $1/273.16$  del intervalo de temperatura entre el cero absoluto y la temperatura del punto triple del agua. Las magnitudes de las unidades de temperatura en las escalas Kelvin y Celsius son idénticas ( $1 \text{ K} \equiv 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Las temperaturas en estas dos escalas difieren por una constante 273.15:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (6-17)$$

Aun cuando la escala termodinámica de temperatura se define con la ayuda de las máquinas térmicas reversibles, no es posible ni práctico operar en realidad tal máquina para determinar valores numéricos sobre la escala de temperatura absoluta. Las temperaturas absolutas se pueden medir de modo exacto por otros medios, como el termómetro de gas ideal de volumen constante junto con extrapolaciones técnicas, como se explicó en el capítulo 1. La validez de la ecuación 6-16 se puede demostrar a partir de consideraciones físicas para un ciclo reversible que usa un gas ideal como fluido de trabajo.

## 6-10 ■ LA MÁQUINA TÉRMICA DE CARNOT

La hipotética máquina térmica que opera en el ciclo reversible de Carnot se llama **máquina térmica de Carnot**. La eficiencia térmica de cualquier máquina térmica, reversible o irreversible, se determina mediante la ecuación 6-6 como

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

donde  $Q_H$  es el calor transferido hacia la máquina térmica desde un depósito a temperatura alta a  $T_H$ , y  $Q_L$  es el calor rechazado hacia un depósito de temperatura baja a  $T_L$ . Para máquinas térmicas reversibles, la relación de trans-

ferencia de calor en la relación anterior se puede reemplazar por la de temperaturas absolutas de los dos depósitos, según la expresión de la ecuación 6-16. Entonces la eficiencia de una máquina de Carnot, o de cualquier máquina térmica reversible, se convierte en

$$\eta_{\text{ter,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (6-18)$$

Esta relación se denomina **eficiencia de Carnot** porque la máquina térmica de Carnot es la máquina reversible mejor conocida. *Ésta es la eficiencia máxima que puede tener una máquina térmica que opera entre los dos depósitos de energía térmica a temperaturas  $T_L$  y  $T_H$*  (Fig. 6-45). Todas las máquinas térmicas irreversibles (es decir, reales) que operan entre estos límites de temperatura ( $T_L$  y  $T_H$ ) tienen eficiencias menores. Una máquina térmica real no puede alcanzar esta máxima eficiencia teórica porque es imposible eliminar por completo las irreversibilidades relacionadas con el ciclo real.

Observe que  $T_L$  y  $T_H$  en la ecuación 6-18 son *temperaturas absolutas*. Si se utiliza °C o °F para las temperaturas en esta relación se obtienen resultados con mucho error.

Las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se comparan (Fig. 6-46):

$$\eta_{\text{ter}} \begin{cases} < \eta_{\text{ter,rev}} & \text{máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{\text{ter,rev}} & \text{máquina térmica reversible} \\ > \eta_{\text{ter,rev}} & \text{máquina térmica imposible} \end{cases} \quad (6-19)$$

La mayor parte de los dispositivos que producen trabajo (máquinas térmicas) utilizados en la actualidad tienen eficiencias menores a 40 por ciento, lo cual parece bajo en comparación con 100 por ciento. Sin embargo, cuando se evalúa el desempeño de las máquinas térmicas reales, las eficiencias no deben compararse con 100 por ciento, sino con la eficiencia de una máquina térmica reversible que opera entre los mismos límites de temperatura, porque éste es el límite superior teórico para la eficiencia, no 100 por ciento.

La eficiencia máxima de una central eléctrica a vapor que opera entre  $T_H = 1\,000\text{ K}$  y  $T_L = 300\text{ K}$  es 70 por ciento, como se determina a partir de la ecuación 6-18. Comparada con este valor, una eficiencia real de 40 por ciento al parecer no es tan mala, aun cuando sea posible mejorarla.

De la ecuación 6-18 resulta obvio que la eficiencia de una máquina térmica de Carnot se incrementa cuando  $T_H$  aumenta o cuando  $T_L$  disminuye. Esto era de esperarse porque cuando  $T_L$  disminuye pasa lo mismo con la cantidad de calor rechazado, mientras que cuando  $T_L$  se aproxima a cero la eficiencia del ciclo de Carnot tiende a la unidad. Esto es aplicable también para máquinas térmicas reales. *La eficiencia térmica de las máquinas térmicas reales se puede maximizar al suministrar calor hacia la máquina a la temperatura máxima posible (limitada por la resistencia del material) y al rechazar calor de la máquina a la menor temperatura posible (limitada por la temperatura del medio de enfriamiento, como ríos, lagos o la atmósfera).*

### EJEMPLO 6-5 Análisis de una máquina térmica de Carnot

Una máquina térmica de Carnot, como la mostrada en la figura 6-47, recibe 500 kJ de calor por ciclo desde una fuente de alta temperatura a 652 °C y rechaza calor hacia un sumidero de baja temperatura a 30 °C. Determine a) la eficiencia térmica de esta máquina de Carnot y b) la cantidad de calor rechazada por ciclo hacia el sumidero.

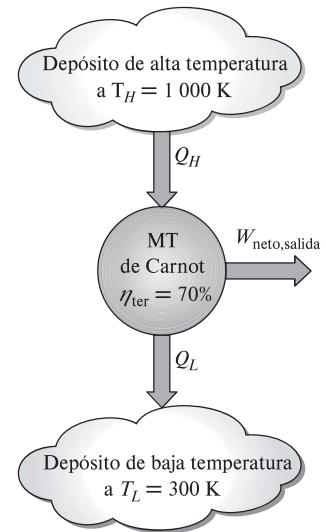


FIGURA 6-45

La máquina térmica de Carnot es la más eficiente de todas las máquinas térmicas que operan entre los mismos depósitos a temperaturas alta y baja.

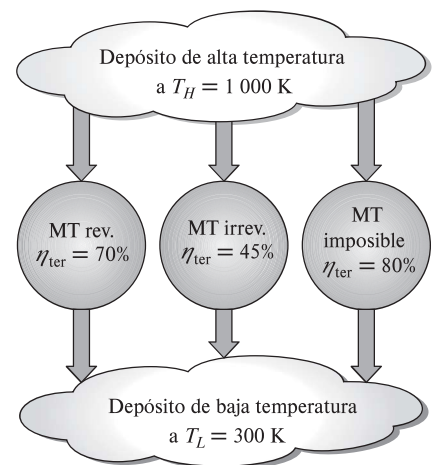


FIGURA 6-46

Ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia mayor que una máquina térmica reversible operando entre los mismos depósitos a temperaturas alta y baja.

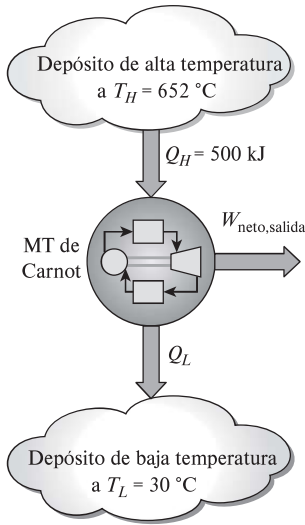


FIGURA 6-47

Esquema para el ejemplo 6-5.

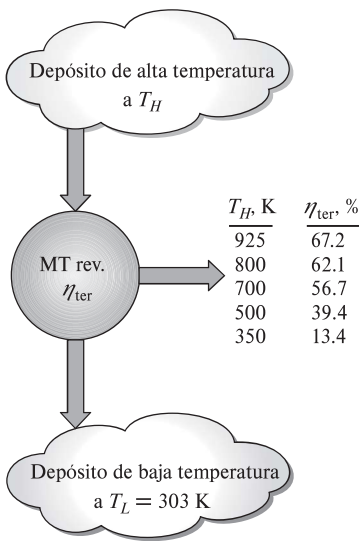
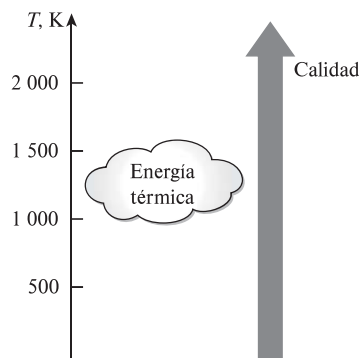


FIGURA 6-48

Fracción de calor que se puede convertir en trabajo como una función de la temperatura de la fuente (para  $T_L = 303$  K).

FIGURA 6-49

Mientras más alta sea la temperatura de la energía térmica, mayor es su calidad.



**SOLUCIÓN** Se conoce el calor suministrado a una máquina térmica de Carnot. Se determinará la eficiencia térmica y el calor rechazado.

**Análisis** a) La máquina térmica de Carnot es una máquina térmica reversible, por lo tanto su eficiencia se determina a partir de la ecuación 6-18 como

$$\eta_{ter,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = 0.672$$

Es decir, esta máquina térmica de Carnot convierte en trabajo 67.2 por ciento del calor que recibe.

b) La cantidad de calor  $Q_L$  que rechaza esta máquina térmica reversible se determina fácilmente de la ecuación 6-16 como

$$Q_{L,rev} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H,rev} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = 164 \text{ kJ}$$

**Comentario** Observe que durante cada ciclo esta máquina térmica de Carnot rechaza 164 kJ de los 500 kJ que recibe hacia un sumidero de baja temperatura.

### Calidad de la energía

La máquina térmica de Carnot del ejemplo 6-5 recibe calor de una fuente a 925 K y convierte 67.2 por ciento de éste en trabajo mientras rechaza el resto (32.8 por ciento) hacia un sumidero a 303 K. Luego se examina cómo varía la eficiencia térmica con la temperatura de la fuente cuando se mantiene constante la temperatura del sumidero.

La eficiencia térmica de una máquina térmica de Carnot que rechaza calor hacia un sumidero a 303 K se evalúa a distintas temperaturas de la fuente por medio de la ecuación 6-18 y se lista en la figura 6-48. Es evidente que la eficiencia térmica decrece cuando disminuye la temperatura de la fuente. Cuando se suministra calor a la máquina a 500 K en lugar de 925 K, por ejemplo, la eficiencia térmica decrece de 67.2 a 39.4 por ciento, es decir, la fracción del calor que se puede convertir en trabajo disminuye a 39.4 por ciento cuando la temperatura de la fuente baja a 500 K. Cuando la temperatura de la fuente es 350 K, esta fracción se convierte en un simple 13.4 por ciento.

Estos valores de eficiencia muestran que la energía tiene **calidad** así como cantidad. A partir de los valores de eficiencia térmica de la figura 6-48 resulta claro que *más de la energía térmica de alta temperatura se puede convertir en trabajo. Por lo tanto, mientras más alta sea la temperatura, mayor es la calidad de la energía* (Fig. 6-49).

Grandes cantidades de energía solar, por ejemplo, se pueden almacenar en grandes cuerpos de agua llamados *estanques solares* que se hallan en alrededor de

350 K. Esta energía almacenada se puede suministrar entonces a una máquina térmica para producir trabajo eléctrico (electricidad). Sin embargo, la eficiencia de las centrales eléctricas mediante estanques solares es muy baja (menor que 5 por ciento) como resultado de la baja calidad de la energía almacenada en la fuente, y los costos de construcción y mantenimiento son relativamente altos. Por lo tanto, no son competitivos aun cuando el suministro de energía de este tipo de centrales es gratis. La temperatura (y por ende la calidad) de la energía solar almacenada se podría elevar si se utilizan colectores concentradores, pero el costo del equipo en este caso es muy alto.

El trabajo es una forma de energía más valiosa que el calor, ya que 100 por ciento del trabajo se puede convertir en calor, pero sólo una fracción del calor se convierte en trabajo. Cuando se transfiere calor de un cuerpo de alta temperatura a otro de menor temperatura, éste se degrada porque ahora menos de él se puede convertir en trabajo. Por ejemplo, si 100 kJ de calor se transfieren desde un cuerpo a 1 000 K hacia un cuerpo a 300 K, al final se tendrán 100 kJ de energía térmica almacenados a 300 K, lo cual no tiene valor práctico. Pero si esta conversión se hace por medio de una máquina térmica, hasta  $1 - 300/1\,000 = 70$  por ciento se podría convertir en trabajo, que es una forma de energía más valiosa. Así, 70 kJ de potencial de trabajo se desperdician como resultado de esta transferencia de calor, por lo cual se degrada la energía.

## Cantidad contra calidad en la vida diaria

En tiempos de crisis energética, abundan los discursos y artículos sobre cómo “conservar” energía. Sin embargo, se sabe que la *cantidad* de energía se conserva. Lo que no se conserva es la *calidad* de la energía o el potencial de trabajo de ésta. Desperdiciar energía es sinónimo de convertirla en una forma menos útil. Una unidad de energía de alta calidad puede ser más valiosa que tres unidades de energía de menor calidad. Por ejemplo, una cantidad finita de energía térmica a temperatura alta es más atractiva para los ingenieros de una central eléctrica que una vasta cantidad de energía térmica a baja temperatura como, por ejemplo, la energía almacenada en las capas superiores de los océanos en climas tropicales.

Al parecer, como un rasgo cultural nuestro, atrae más la atención la cantidad que la calidad. Sin embargo, la cantidad sola no muestra una visión completa y es necesario considerar también la calidad. Es decir, al evaluar algo se debe examinar desde el punto de vista de la primera ley así como de la segunda, incluso en áreas no técnicas. A continuación se presentan algunos casos ordinarios y se muestra su importancia en relación con la segunda ley de la termodinámica.

Considere dos estudiantes, Andy y Wendy. Andy tiene 10 amigos que nunca se pierden sus fiestas y siempre están presentes en tiempos de diversión; sin embargo, parecen estar ocupados cuando Andy necesita su ayuda. Por otro lado, Wendy tiene cinco amigos quienes nunca están demasiado ocupados para ella, por lo que puede contar con ellos cuando los necesita. Ahora se tratará de contestar la pregunta, *¿quién tiene más amigos?* Desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica, que considera sólo la cantidad, es evidente que Andy tiene más amigos. Pero desde la perspectiva de la segunda ley, la cual también considera la calidad, no hay duda de que Wendy es la que tiene más amigos.

Otro ejemplo con el que la mayor parte de la gente puede identificarse es la multimillonaria industria de las dietas, que se basa sobre todo en la primera ley de la termodinámica. Sin embargo, si se toma en cuenta que 90 por ciento de las personas que pierden peso lo recuperan de manera rápida y con intereses, indica que la primera ley por sí sola no da una visión completa. Las personas que al parecer comen lo que quieren y cuando lo desean sin ganar peso son una prueba viviente de que la técnica de contar las calorías (la primera ley) deja sin

contestar muchas preguntas acerca de la dieta. Es evidente que se requiere más investigación enfocada en los efectos de la segunda ley al hacer dieta antes de poder comprender por completo el proceso de ganancia y pérdida de peso.

Es tentador juzgar las cosas con base en su *cantidad* en vez de su *calidad*, ya que evaluar esta última es mucho más difícil que evaluar la primera. Sin embargo, las evaluaciones hechas basadas solamente en la cantidad (la primera ley) podrían ser extremadamente inadecuadas y engañosas.

## 6-11 ■ EL REFRIGERADOR DE CARNOT Y LA BOMBA DE CALOR

Un refrigerador o una bomba de calor, que opera en el ciclo inverso de Carnot, se llama **refrigerador de Carnot** o **bomba de calor de Carnot**. El coeficiente de desempeño de cualquier refrigerador o bomba de calor, reversible o irreversible, se expresa mediante las ecuaciones 6-9 y 6-11 como

$$\text{COP}_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad \text{y} \quad \text{COP}_{\text{HP}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

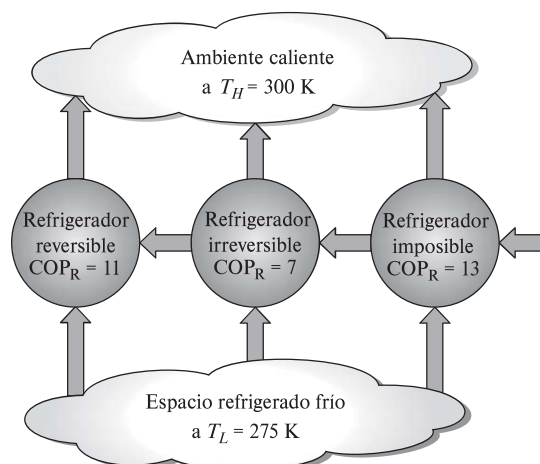
donde  $Q_L$  es la cantidad de calor absorbido del medio de baja temperatura y  $Q_H$  es la cantidad de calor rechazada hacia el medio de temperatura alta. Los COP de refrigeradores y bombas de calor reversibles se determinan al reemplazar las razones de transferencia de calor en las anteriores relaciones por los cocientes de las temperaturas absolutas de los depósitos de temperatura alta y baja, como se expresa mediante la ecuación 6-16. Entonces, las relaciones de COP para refrigeradores y bombas de calor reversibles se convierten en

$$\text{COP}_{R,\text{rev}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad (6-20)$$

y

$$\text{COP}_{\text{HP},\text{rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \quad (6-21)$$

Éstos son los coeficientes de desempeño más altos que puede tener un refrigerador o una bomba de calor que opera entre los límites de temperatura  $T_L$  y  $T_H$ . Los refrigeradores o bombas de calor reales que operan entre estos límites de temperatura ( $T_L$  y  $T_H$ ) tienen menores coeficientes de desempeño (Fig. 6-50).



**FIGURA 6-50**

Ningún refrigerador puede tener un COP mayor que otro reversible que opera entre los mismos límites de temperatura.

Los coeficientes de desempeño de refrigeradores reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se pueden comparar como sigue:

$$\text{COP}_R \begin{cases} < \text{COP}_{R,\text{rev}} & \text{refrigerador irreversible} \\ = \text{COP}_{R,\text{rev}} & \text{refrigerador reversible} \\ > \text{COP}_{R,\text{rev}} & \text{refrigerador imposible} \end{cases} \quad (6-22)$$

Si se reemplazan los  $\text{COP}_R$  por  $\text{COP}_{\text{HP}}$  en la ecuación 6-22 se obtiene una relación similar para las bombas de calor.

El COP para un refrigerador o bomba de calor reversible es el valor teórico máximo para los límites de temperatura especificados. Los refrigeradores o bombas de calor reales pueden aproximarse a estos valores cuando se mejoran sus diseños, pero nunca pueden alcanzarlos.

Como nota final, los COP de refrigeradores y bombas de calor disminuyen cuando  $T_L$  decrece, es decir, requiere más trabajo absorber calor de medios de temperatura menor. Cuando la temperatura del espacio refrigerado se aproxima a cero, la cantidad de trabajo requerida para producir una cantidad finita de refrigeración se aproxima a infinito y  $\text{COP}_R$  tiende a cero.

#### EJEMPLO 6-6 Ciclo de refrigeración de Carnot operando en el domo de saturación

Un ciclo de refrigeración de Carnot se lleva a cabo en un sistema cerrado en la región de mezcla de líquido y vapor saturado, usando 0.8 kg de refrigerante R-134a como fluido de trabajo (Fig. 6-51). Las temperaturas máxima y mínima en el ciclo son 20 y  $-8^\circ\text{C}$ , respectivamente. Se sabe que el refrigerante es líquido saturado al final del proceso de rechazo de calor, y el trabajo neto de entrada al ciclo es 15 kJ. Determine la fracción de la masa del refrigerante que se vaporiza durante el proceso de adición de calor, y la presión al final del proceso de rechazo de calor.

**SOLUCIÓN** Un ciclo de Carnot de refrigeración se lleva a cabo en un sistema cerrado. Se deben determinar la fracción masa del refrigerante que se vaporiza durante el proceso de adición de calor y la presión al final del proceso de rechazo de calor.

**Suposición** El refrigerador opera en el ciclo ideal de Carnot.

**Análisis** Conociendo las temperaturas alta y baja, el coeficiente de desempeño del ciclo es

$$\text{COP}_R = \frac{1}{T_H/T_L - 1} = \frac{1}{(20 + 273\text{ K})/(-8 + 273\text{ K}) - 1} = 9.464$$

La cantidad de enfriamiento se determina, a partir de la definición del coeficiente de desempeño, como

$$Q_L = \text{COP}_R \times W_{\text{entrada}} = (9.464)(15\text{ kJ}) = 142\text{ kJ}$$

La entalpía de vaporización del R-134 a  $-8^\circ\text{C}$  es  $h_{fg} = 204.59\text{ kJ/kg}$  (tabla A-11). Entonces, la cantidad de refrigerante que se vaporiza durante la absorción de calor resulta

$$Q_L = m_{\text{evap}} h_{fg \text{ a } -8^\circ\text{C}} \rightarrow m_{\text{evap}} = \frac{142\text{ kJ}}{204.59\text{ kJ/kg}} = 0.694\text{ kg}$$

Por tanto, la fracción de la masa que se vaporiza durante el proceso de adición de calor al refrigerante es

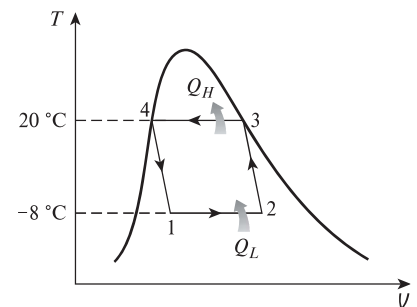


FIGURA 6-51

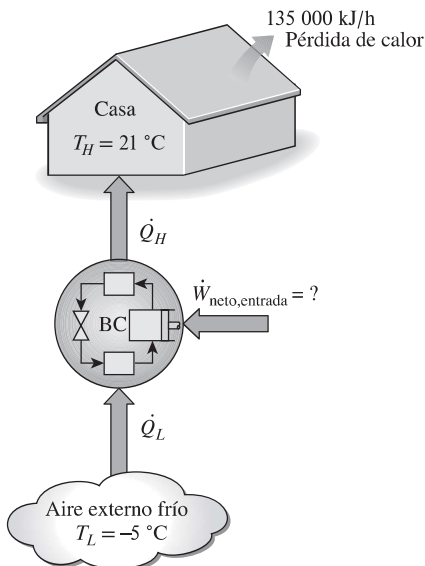
Esquema para el ejemplo 6-6.

$$\text{Fracción de masa} = \frac{m_{\text{evap}}}{m_{\text{total}}} = \frac{0.694 \text{ kg}}{0.8 \text{ kg}} = 0.868 \text{ (u 86.8\%)}$$

La presión al final del proceso de rechazo de calor es simplemente la presión de saturación a la temperatura de rechazo de calor,

$$P_4 = P_{\text{sat a } 20^\circ\text{C}} = 572.1 \text{ kPa}$$

**Comentario** El ciclo de Carnot es un ciclo idealizado de refrigeración; por lo tanto, no se puede lograr en la práctica. En el capítulo 11 se analizan ciclos prácticos de refrigeración.



**FIGURA 6-52**

Esquema para el ejemplo 6-7.

### EJEMPLO 6-7 Calentamiento de una casa con una bomba de calor de Carnot

Se utilizará una bomba de calor para calentar una casa durante el invierno, como se muestra en la figura 6-52. La casa se mantiene a  $21^\circ\text{C}$  todo el tiempo y se estima que pierde calor a razón de  $135\,000 \text{ kJ/h}$  cuando la temperatura exterior desciende a  $-5^\circ\text{C}$ . Determine la potencia mínima requerida para impulsar esta bomba de calor.

**Solución** Una bomba de calor mantiene una casa a una temperatura constante. Se determinará la entrada de potencia mínima requerida a la bomba de calor.

**Suposición** Existen condiciones estacionarias de operación.

**Análisis** La bomba de calor debe suministrar calor a la casa a una tasa de  $\dot{Q}_H = 135\,000 \text{ kJ/h} = 37.5 \text{ kW}$ . Los requerimientos de potencia son mínimos cuando se emplea una bomba de calor reversible para hacer el trabajo. El COP de una bomba de calor reversible que opera entre la casa y el aire exterior es

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - (-5 + 273 \text{ K})/(21 + 273 \text{ K})} = 11.3$$

Entonces, la entrada de potencia requerida para esta bomba de calor reversible se convierte en

$$\dot{W}_{\text{neto,entrada}} = \frac{\dot{Q}_H}{\text{COP}_{\text{HP}}} = \frac{37.5 \text{ kW}}{11.3} = 3.32 \text{ kW}$$

**Comentario** Esta bomba de calor reversible puede satisfacer los requerimientos de calefacción de esta casa si consume energía eléctrica a razón de  $3.32 \text{ kW}$  solamente. Si esta casa se calentara por medio de calentadores de resistencia eléctrica, el consumo de energía aumentaría  $11.3$  veces, es decir,  $37.5 \text{ kW}$ . Esto se debe a que en los calentadores de resistencia la energía eléctrica se convierte en calor en una relación uno a uno. Con una bomba de calor, sin embargo, la energía se absorbe desde el exterior y se lleva al interior por medio de un ciclo de refrigeración que consume sólo  $3.32 \text{ kW}$ . Observe que la bomba de calor no crea energía. Sólo la transporta de un medio (el exterior frío) a otro (el interior caliente).

## TEMA DE INTERÉS ESPECIAL\*

## Refrigeradores domésticos

Los refrigeradores para conservar alimentos perecederos han sido por mucho tiempo los aparatos esenciales de un hogar y han demostrado ser muy durables, confiables y proveedores de un servicio satisfactorio mayor a 15 años. Un refrigerador doméstico es en realidad una combinación de refrigerador-congelador porque tiene un compartimiento de congelador para hacer hielo y almacenar comida congelada.

Los refrigeradores actuales utilizan mucho menos energía como resultado del empleo de motores y compresores *más pequeños* y de *mayor eficiencia*, *mejores materiales de aislamiento*, *áreas superficiales de serpentín más grandes* y *mejores sellos para las puertas* (Fig. 6-53). Tener en operación un refrigerador promedio a un costo promedio de electricidad de 11.5 centavos de dólar por kWh, cuesta cerca de 100 dólares al año, lo cual es la mitad del costo de operación anual de un refrigerador hace 25 años. Reemplazar un refrigerador de hace 25 años de 18 pies cúbicos por un modelo eficiente en cuanto al consumo de energía ahorra más de 1 000 kWh de electricidad por año. Para el ambiente esto significa una reducción de más de una tonelada de CO<sub>2</sub>, causante del cambio climático global, y más de 10 kg de SO<sub>2</sub>, que causa lluvia ácida.

A pesar de las mejoras hechas en los refrigeradores domésticos en varias de sus áreas, durante los últimos 100 años el *ciclo de refrigeración por compresión de vapor* ha permanecido sin cambio. Los sistemas opcionales de *refrigeración por absorción* y *refrigeración termoeléctrica* son en la actualidad más caros y menos eficientes y han encontrado un uso limitado en algunas aplicaciones especializadas (tabla 6-1).

Un refrigerador doméstico se diseña para mantener la sección del congelador a 218 °C (0 °F) y la del refrigerador a 3 °C (37 °F). Temperaturas menores del congelador incrementan el consumo de energía sin mejorar de forma significativa la vida de almacenamiento de los alimentos congelados. Temperaturas diferentes para el almacenamiento de alimentos específicos se pueden mantener en la sección del refrigerador por medio de compartimientos *de aplicación específica*.

Casi todos los refrigeradores de gran tamaño cuentan con una caja de *cerrado hermético* para verduras cubiertas de hojas y frutas frescas, de modo que permanezcan húmedas y estén protegidas del efecto de desecación de aire frío que circula en el refrigerador. Un *compartimiento para huevos* cubierto en la tapa prolonga la vida de éstos al disminuir la pérdida de humedad. Es común que los refrigeradores posean en la puerta un compartimiento especial templado para la *mantequilla*, con la finalidad de mantenerla a temperatura de derretimiento. Este compartimiento también aísla la mantequilla y evita que absorba *olores y sabores* de otros alimentos. Algunos modelos de lujo tienen un *compartimiento de carnes* con temperatura controlada que se mantiene a -0.5 °C (31 °F), que conserva la carne a la mínima temperatura segura sin congelarla, de este modo se prolonga su vida de almacenaje. Los modelos más caros vienen con un *productor de hielo* localizado en la sección del congelador que está conectado a la línea de agua, así como con dosificadores automáticos de hielo y agua helada. Un productor de hielo representativo produce entre 2 y 3 kg de hielo al día y almacena entre 3 y 5 kg en un recipiente móvil.

Los refrigeradores domésticos consumen aproximadamente entre 90 y 600 W de energía eléctrica al operar y están diseñados para funcionar de modo satisfactorio en ambientes de hasta 43 °C (110 °F). Los refrigeradores funcio-

\* Se puede omitir esta sección sin que se pierda continuidad.

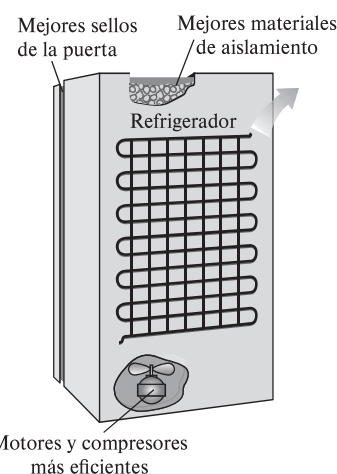


FIGURA 6-53

Los refrigeradores actuales son mucho más eficientes gracias a las mejoras en la tecnología y la manufactura.

TABLA 6-1

Eficiencias de operación características de algunos sistemas de refrigeración para una temperatura de congelador de -18 °C y temperatura ambiente de 32 °C

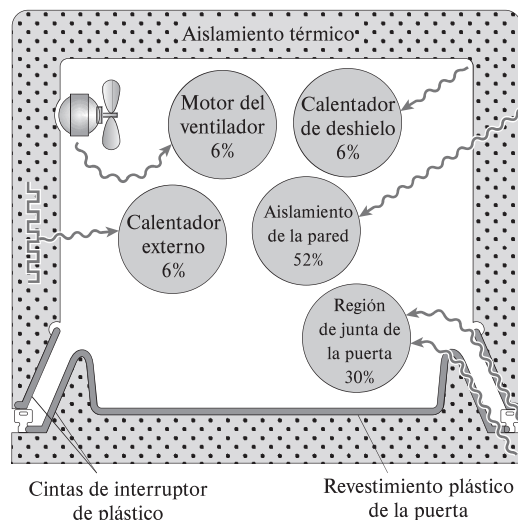
Tipo de sistema de refrigeración	Coefficiente de desempeño
Compresión de vapor	1.3
Refrigeración por absorción	0.4
Refrigeración termoeléctrica	0.1

nan de forma intermitente, como usted habrá notado, y operan cerca de 30 por ciento del tiempo bajo uso normal en una casa a 25 °C (77 °F).

Para dimensiones externas específicas es deseable que un refrigerador tenga volumen *máximo* de almacenaje de comida, consumo *mínimo* de energía y el *menor* costo posible para el consumidor. El volumen total de almacenaje de comida se ha incrementado con el paso de los años sin que esto haya significado un incremento en las dimensiones externas, esto gracias al uso de aislamiento más delgado pero más eficaz y por la reducción del espacio que ocupan el compresor y el condensador. Al cambiar el aislamiento de fibra de vidrio (conductividad térmica  $k = 0.032\text{-}0.040 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) por el de espuma de uretano expandida ( $k = 0.019 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) se logró reducir el espesor de la pared del refrigerador a casi la mitad, de alrededor de 90 a 48 mm para la sección del congelador y de 70 a 40 mm para la del refrigerador. La rigidez y la acción de unión de la espuma también proporcionan soporte estructural adicional. Sin embargo, toda la cubierta del refrigerador se debe sellar de forma cuidadosa para evitar alguna fuga de agua o entrada de humedad hacia el aislamiento ya que la humedad degrada la efectividad del aislamiento.

El tamaño del compresor y otros componentes de un sistema de refrigeración se determinan con base en la carga de calor anticipada (o carga de refrigeración), que es la tasa de flujo de calor hacia el refrigerador. La carga de calor consiste en la *parte predecible*, como la transferencia de calor a través de las paredes y los empaques de las puertas del refrigerador, así como de motores de ventiladores y calentadores de descongelación (Fig. 6-54); y la *parte impredecible*, que depende de los hábitos del usuario, como abrir la puerta, hacer hielos y el llenado del refrigerador. La cantidad de *energía* que consume el refrigerador se reduce al poner en práctica *medidas de conservación* según se explica a continuación.

1. *Abrir la puerta del refrigerador las menos veces posibles* durante el menor tiempo posible. Cada vez que se abre la puerta del refrigerador, el aire frío del interior se reemplaza por aire tibio externo que debe ser enfriado. Mantener el refrigerador o el congelador lleno ahorrará energía al reducir la cantidad de aire frío que pueda escapar cada vez que se abre la puerta.
2. *Enfriar primero los alimentos calientes* a temperatura ambiente antes de introducirlos al refrigerador. Pasar una sartén caliente directamente del horno al refrigerador no sólo consume energía al hacer que el refrigerador trabaje más tiempo, sino que también causa que los alimentos pere-



**FIGURA 6-54**

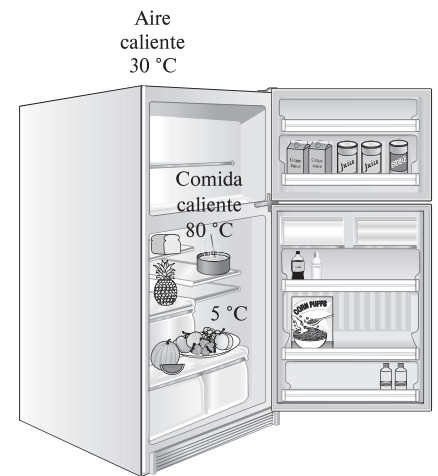
Sección transversal de un refrigerador que muestra las magnitudes relativas de varios efectos que constituyen la carga de calor predecible.

cederos cercanos a la sartén se descompongan al crear un ambiente más caliente en su entorno inmediato (Fig. 6-55).

3. *Limpiar los serpentines del condensador* localizados detrás o debajo del refrigerador. El polvo y la mugre pegados en los serpentines actúan como un aislamiento que disminuye la disipación de calor a través de ellos. Limpiar los serpentines un par de veces al año con un trapo húmedo o una aspiradora mejorará la capacidad de enfriamiento del refrigerador al mismo tiempo que reducirá el consumo de energía. A veces se emplea un ventilador para el enfriamiento forzado de los condensadores de refrigeradores grandes o integrados, y el fuerte movimiento del aire mantiene limpios los serpentines.
4. *Comprobar si el empaque de la puerta tiene fugas.* Esto se puede hacer colocando una linterna en el refrigerador, sin luces en la cocina y observando si se filtra la luz. La transferencia de calor a través de la región de unión de la puerta explica casi un tercio de la carga de calor regular de los refrigeradores y, por lo tanto, se debe reemplazar de inmediato cualquier junta defectuosa.
5. *Evitar ajustes innecesarios de temperatura baja.* Las temperaturas recomendadas para congeladores y refrigeradores son  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) y  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $37\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), respectivamente. Fijar la temperatura del congelador debajo de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  contribuye de forma importante al consumo de energía pero no mucho a la duración de los alimentos congelados. Mantener temperaturas de  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (o  $10\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) por debajo de los niveles recomendados incrementa el uso de energía en 25 por ciento.
6. *Evitar la acumulación excesiva de hielo* en las superficies interiores del evaporador. La capa de hielo en la superficie actúa como un aislamiento y disminuye la transferencia de calor de la sección del congelador hacia el refrigerante. El refrigerador se debe descongelar encendiendo de forma manual el interruptor de control de temperatura cuando el espesor del hielo pasa de algunos milímetros.

La descongelación se hace de forma automática en refrigeradores que no forman escarcha al suministrar calor, de forma periódica y durante cortos periodos, suministrando el calor al evaporador mediante un calentador de resistencia de entre 300 y 1 000 W, o mediante gas refrigerante caliente. El agua se drena entonces a un recipiente externo donde se evapora por medio del calor que disipa el condensador. Los evaporadores que no forman escarcha son básicamente tubos provistos de aletas sujetos al flujo de aire que hace circular un ventilador. Casi toda la escarcha se colecta en las aletas, que son las superficies más frías, de modo que tanto las superficies expuestas de la sección del congelador como el alimento congelado quedan sin escarcha.

7. *Usar el interruptor ahorrador de energía* que controla los serpentines de calentamiento y evita la condensación en las superficies externas en ambientes húmedos. Los calentadores de bajo consumo se usan para aumentar la temperatura de las superficies externas del refrigerador en lugares críticos arriba del punto de rocío, con la finalidad de evitar la formación y el deslizamiento de gotas en las superficies. La condensación tiene más probabilidades de ocurrir en hogares sin sistemas de aire acondicionado ubicados en lugares con climas cálidos y húmedos. La formación de humedad en las superficies es indeseable porque podría causar el deterioro de la superficie externa y humedecer el piso de la cocina. Cerca de 10 por ciento de la energía total consumida



**FIGURA 6-55**

Introducir al refrigerador alimentos calientes sin dejar que se enfrien primero no sólo gasta energía sino que también descompone los alimentos cercanos.

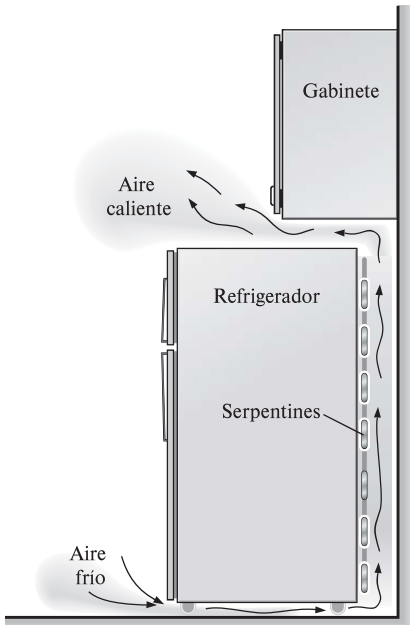


FIGURA 6-56

Los serpentines del condensador de un refrigerador se deben limpiar de forma periódica y no deben bloquearse los pasajes de flujo de aire con la finalidad de mantener un rendimiento alto.

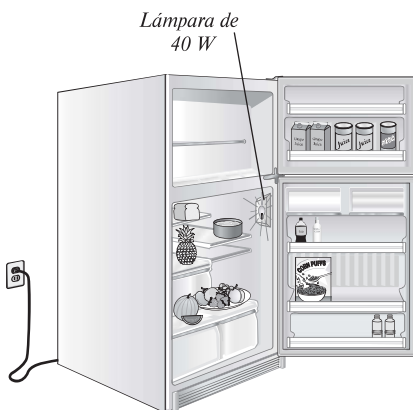


FIGURA 6-57

Esquema para el ejemplo 6-8.

por el refrigerador se ahorra si se apaga este calentador y se mantiene así a menos que haya condensación visible en las superficies externas.

8. *No bloquear los pasajes de flujo de aire* hacia y desde los serpentines del condensador. El aire que entra por el fondo y los lados del condensador y sale por la parte superior se encarga de arrastrar el calor que disipa este dispositivo. Cualquier bloqueo de esta trayectoria de circulación del aire por convección natural mediante objetos grandes, como cajas de cereal en la parte superior del refrigerador, degradarán el desempeño del condensador y, por lo tanto, del refrigerador (Fig. 6-56).

Éstas y otras medidas de conservación de sentido común darán como resultado la reducción de los costos de energía y mantenimiento de un refrigerador así como una vida prolongada y sin problemas para el dispositivo.

### EJEMPLO 6-8 Falla del interruptor de luz del refrigerador

La iluminación interna de los refrigeradores la proporcionan lámparas incandescentes que se encienden cuando se abre la puerta del refrigerador. Considere un refrigerador cuya lámpara de 40 W permanece encendida como resultado de una falla del interruptor (Fig. 6-57). Si el refrigerador tiene un coeficiente de desempeño de 1.3 y el costo de la electricidad es de 12 centavos de dólar por kWh, determine el incremento en el consumo de energía del refrigerador y el costo anual que acarreará de no repararse el interruptor.

**SOLUCIÓN** La lámpara de un refrigerador permanece encendida debido a una falla del interruptor. Se determinará el incremento en el consumo de electricidad y el costo.

**Suposiciones** La vida de la lámpara es mayor a un año.

**Análisis** La lámpara consume 40 W de potencia cuando está encendida, por lo tanto añade 40 W a la carga de calor del refrigerador. En vista de que el COP del refrigerador es 1.3, la potencia que consume el refrigerador para eliminar el calor que genera la lámpara es

$$\dot{W}_{\text{refrig}} = \frac{\dot{Q}_{\text{refrig}}}{\text{COP}_R} = \frac{40 \text{ W}}{1.3} = 30.8 \text{ W}$$

Por lo tanto, la potencia adicional que consume el refrigerador es

$$\dot{W}_{\text{total,adicional}} = \dot{W}_{\text{luz}} + \dot{W}_{\text{refrig}} = 40 + 30.8 = 70.8 \text{ W}$$

El número total de horas en un año es

$$\text{Horas anuales} = (365 \text{ días/año})(24 \text{ h/día}) = 8\,760 \text{ h/año}$$

Si se supone que el refrigerador se abre 20 veces al día durante un promedio de 30 segundos, la luz estaría encendida normalmente durante

$$\begin{aligned} \text{Horas de operación normal} &= (20 \text{ veces/día})(30 \text{ s/vez})(1 \text{ h}/3\,600 \text{ s})(365 \text{ días/año}) \\ &= 61 \text{ h/año} \end{aligned}$$

Entonces las horas adicionales que la luz permanece encendida como resultado de la falla son

$$\begin{aligned} \text{Horas de operación adicionales} &= \text{horas anuales} - \text{horas de operación normales} \\ &= 8\,760 - 61 = 8\,699 \text{ h/año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el consumo adicional de potencia eléctrica y su costo por año son

$$\begin{aligned} \text{Consumo de potencia adicional} &= \dot{W}_{\text{total,adicional}} \times (\text{horas de operación adicionales}) \\ &= (0.0708 \text{ kW})(8\,699 \text{ h/año}) = \mathbf{616 \text{ kWh/año}} \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} \text{Costo de potencia adicional} &= (\text{Consumo de potencia adicional})(\text{Costo unitario}) \\ &= (616 \text{ kWh/año})(\$0.12/\text{kWh}) = \mathbf{\$73.9/\text{año}} \end{aligned}$$

**Comentario** No reparar el interruptor costará al dueño de la casa 75 dólares al año. Esto es alarmante cuando se considera que a 12 centavos de dólar por kWh, un refrigerador representativo consume cerca de 100 dólares de electricidad al año.

## RESUMEN

La *segunda ley de la termodinámica* establece que un proceso ocurre en cierta dirección, no en cualquiera. Un proceso no sucede a menos que satisfaga tanto la primera como la segunda leyes de la termodinámica. Los cuerpos que pueden absorber o rechazar cantidades finitas de calor en forma isotérmica se llaman *depósitos de energía térmica* o *depósitos de calor*.

El trabajo se puede convertir directamente en calor, pero éste no se puede convertir en trabajo sino únicamente por medio de ciertos dispositivos llamados *máquinas térmicas*. La *eficiencia térmica* de una máquina térmica se define como

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto,salida}}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

donde  $W_{\text{neto,salida}}$  es la salida de trabajo neto de la máquina térmica,  $Q_H$  la cantidad de calor suministrada a la máquina y  $Q_L$  la cantidad de calor que la máquina cede.

Los refrigeradores y las bombas de calor son dispositivos que absorben calor de medios de baja temperatura y lo ceden hacia la atmósfera a medios de mayor temperatura. El desempeño de un refrigerador o bomba de calor se expresa en términos del *coeficiente de desempeño*, definido como

$$\begin{aligned} \text{COP}_R &= \frac{Q_L}{W_{\text{neto,entrada}}} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \\ \text{COP}_{\text{HP}} &= \frac{Q_H}{W_{\text{neto,entrada}}} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \end{aligned}$$

El *enunciado de Kelvin-Planck* de la segunda ley de la termodinámica establece que ninguna máquina térmica puede producir una cantidad neta de trabajo mientras intercambia calor con un solo depósito. El *enunciado de Clausius* de la segunda ley expresa que ningún dispositivo puede transferir calor de un cuerpo más frío a otro más caliente sin dejar un efecto sobre los alrededores.

Cualquier dispositivo que viola la primera o la segunda ley de la termodinámica se llama *máquina de movimiento perpetuo*.

Se dice que un proceso es *reversible* si tanto el sistema como los alrededores pueden volver a su condición original. Cualquier otro proceso es *irreversible*. Los efectos que hacen que un proceso sea irreversible son la fricción, la expansión o compresión de no cuasiequilibrio y la transferencia de calor debida a

una diferencia finita de temperatura, las cuales se denominan *irreversibilidades*.

El *ciclo de Carnot* es un ciclo reversible compuesto por cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos. Los *principios de Carnot* establecen que las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reversibles que operan entre dos depósitos son las mismas, y que ninguna máquina de este tipo es más eficiente que una reversible que opera entre los mismos dos depósitos. Estos enunciados crean el fundamento para establecer una *escala termodinámica de temperatura* relacionada con las transferencias de calor entre un dispositivo reversible y los depósitos a alta y baja temperaturas, por medio de

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{\text{rev}} = \frac{T_H}{T_L}$$

Por lo tanto, la relación  $Q_H/Q_L$  se puede reemplazar por  $T_H/T_L$  para dispositivos reversibles, donde  $T_H$  y  $T_L$  son las temperaturas absolutas de los depósitos de temperaturas alta y baja, respectivamente.

Una máquina térmica que opera en un ciclo reversible de Carnot se llama *máquina térmica de Carnot*. La eficiencia térmica de una máquina térmica de Carnot, así como de las otras máquinas térmicas reversibles está expresada por

$$\eta_{\text{ter,rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Ésta es la eficiencia máxima que puede tener una máquina térmica que opera entre dos depósitos a temperaturas  $T_H$  y  $T_L$ .

Los COP de refrigeradores reversibles y las bombas de calor se obtienen de una manera similar,

$$\text{COP}_{R,\text{rev}} = \frac{1}{T_H/T_L - 1}$$

y

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

De nuevo, éstos son los COP más altos que puede tener un refrigerador o una bomba de calor que opera entre los límites de temperatura  $T_H$  y  $T_L$ .

## REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

1. ASHRAE, *Handbook of Refrigeration*, Versión SI, Atlanta, Georgia, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1994.
2. D. Stewart, "Wheels Go Round and Round, but Always Run Down", noviembre de 1986, *Smithsonian*, pp. 193-208.
3. J. T. Amann, A. Wilson y K. Ackerly, *Consumer Guide to Home Energy Saving*, 9a. ed., American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, D. C., 2007.

## PROBLEMAS\*

## Segunda ley de la termodinámica y depósitos de energía térmica

- 6-1C** Un mecánico afirma que desarrolló un motor de automóvil que funciona con agua en lugar de gasolina. ¿Cuál es su respuesta a esta afirmación?
- 6-2C** Describa un proceso imaginario que viole tanto la primera como la segunda leyes de la termodinámica.
- 6-3C** Describa un proceso imaginario que satisfaga la primera ley pero que viole la segunda ley de la termodinámica.
- 6-4C** Describa un proceso imaginario que satisfaga la segunda ley pero viole la primera ley de la termodinámica.
- 6-5C** Un experimentador asegura haber subido la temperatura de una pequeña cantidad de agua a 150 °C transfiriendo calor de vapor a alta presión a 120 °C. ¿Es ésta una aseveración razonable? ¿Por qué? Suponga que no se usa en el proceso ni refrigerador, ni bomba de calor.
- 6-6C** Considere el proceso de hornear papas en un horno convencional. ¿Se puede considerar el aire caliente del horno como un depósito térmico? Explique.
- 6-7C** Considere la energía generada por un televisor. ¿Qué es un opción adecuada como depósito de energía térmica?

## Máquinas térmicas y eficiencia térmica

- 6-8C** ¿Cuáles son las características de todas las máquinas térmicas?
- 6-9C** ¿Cuál es la expresión de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica?
- 6-10C** ¿Es posible que una máquina térmica opere sin rechazar ningún calor de desecho a un depósito de baja temperatura? Explique.
- 6-11C** ¿Una máquina térmica que tiene una eficiencia térmica de 100 por ciento viola necesariamente a) la primera ley y b) la segunda ley de la termodinámica? Explique.
- 6-12C** En ausencia total de fricción y de otras irreversibilidades, ¿puede una máquina térmica tener una eficiencia de 100 por ciento? Explique.

**6-13C** Las eficiencias de todos los dispositivos productores de trabajo, incluyendo las plantas hidroeléctricas, ¿están limitadas por la expresión de Kelvin-Planck de la segunda ley? Explique.

**6-14C** Los calentadores zócalo son básicamente calentadores de resistencia eléctrica y se usan con frecuencia para calefacción de espacios. Una ama de casa asegura que sus calentadores zócalo, que tienen cinco años de uso, tienen una eficiencia de conversión del 100 por ciento. ¿Es esta afirmación una violación de algunas leyes termodinámicas? Explique.

**6-15C** Considere una cacerola con agua que se calienta a) colocándola en una parrilla eléctrica y b) colocando un elemento calentador en el agua. ¿Cuál de los dos métodos es la manera más eficiente de calentar el agua? Explique.

**6-16** Una máquina térmica recibe un total de 1.3 kJ de calor y su eficiencia térmica es de 35 por ciento. ¿Cuánto trabajo producirá?

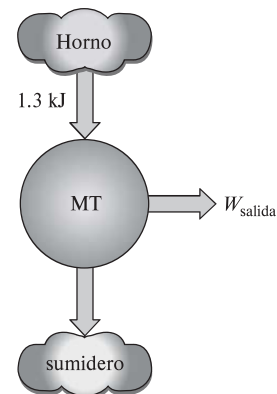



FIGURA P6-16

**6-17** Una central termoeléctrica de vapor recibe calor de un horno a razón de 280 GJ/h. Se estima que las pérdidas de calor al aire circundante del vapor conforme éste pasa por las tuberías y otros componentes son de alrededor de 8 GJ/h. Si el calor residual es transferido a agua refrigerante a razón de 165 GJ/h, determine a) la energía neta de salida y b) la eficiencia térmica de esta central termoeléctrica.

Respuestas: a) 29.7 MW, b) 38.2 por ciento

**6-18E** Un motor de automóvil recibe  $3 \times 10^4$  Btu/h de calor y su eficiencia térmica es de 40 por ciento. Calcule la potencia que producirá, en hp.

\* Los problemas marcados con "C" son preguntas de concepto y se exhorta a los estudiantes a contestarlas todas. Los problemas marcados con una "E" están en unidades inglesas y quienes utilizan unidades SI pueden ignorarlos. Los problemas con un ícono  son de comprensión y se recomienda emplear un software como EES para resolverlos.

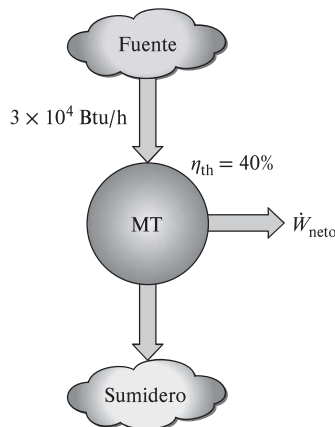


FIGURA P6-18E

**6-19** Una planta termoeléctrica de 600 MW, que se enfría con el agua de un río cercano, y su eficiencia térmica es de 40 por ciento. Determine la tasa de transferencia térmica al agua del río. ¿La tasa real de transferencia será mayor o menor que este valor? ¿Por qué?

**6-20** Una máquina térmica con una eficiencia térmica de 45 por ciento rechaza 500 kJ/kg de calor. ¿Cuánto calor recibe?  
*Respuesta:* 909 kJ/kg

**6-21E** Una máquina térmica que impulsa un barco produce 500 Btu/lbm de trabajo, y rechaza 300 Btu/lbm de calor. ¿Cuál es su eficiencia térmica?

**6-22** Una planta termoeléctrica con una generación de potencia de 150 MW consume carbón a razón de 60 toneladas/h. Si el poder calorífico del carbón es de 30 000 kJ/kg, determine la eficiencia total de esta planta. *Respuesta:* 30.0 por ciento

**6-23** Un motor de automóvil consume combustible a razón de 22 L/h y entrega a las ruedas una potencia de 55 kW. Si el combustible tiene un poder calorífico de 44 000 kJ/kg y una densidad de 0.8 g/cm<sup>3</sup>, determine la eficiencia del motor.  
*Respuesta:* 25.6 por ciento


**6-24E** La energía solar almacenada en grandes cuerpos de agua, que se llaman estanques solares, se utiliza para generar electricidad. Si una planta de energía solar tiene una eficiencia de 3 por ciento y una generación neta de 150 kW, determine el valor promedio de la tasa necesaria de recolección de energía solar, en Btu/h.

**6-25** Una planta eléctrica de carbón produce una potencia neta de 300 MW con una eficiencia térmica total de 32 por ciento. Se calcula que la relación real gravimétrica aire-combustible en el horno es de 12 kg aire/kg de combustible. El poder calorífico del carbón es 28 000 kJ/kg. Determine *a*) la cantidad de carbón que se consume durante un periodo de 24 horas y *b*) la tasa de aire que fluye a través del horno.  
*Respuestas:* *a*)  $2.89 \times 10^6$  kg; *b*) 402 kg/s

**6-26E** Una planta de energía construida en Hawai en 1987 y que utiliza conversión de energía térmica oceánica (OTEC) se diseñó para operar entre los límites de temperatura de 86 °F en la superficie oceánica y 41 °F a una profundidad de 2 100 pies. Se bombeaban aproximadamente 13 300 gpm de agua marina

fría del fondo del océano a través de una tubería de 40 pulg de diámetro para utilizarla como medio refrigerante o disipador térmico. Si el agua refrigerante experimenta un aumento de temperatura de 6 °F y la eficiencia térmica es de 2.5 por ciento, determine la cantidad de energía generada. Sea la densidad del agua marina de 64 lbm/pies<sup>3</sup>.

**6-27** Un país necesita construir nuevas centrales eléctricas para satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica. Una posibilidad es construir centrales eléctricas de carbón, cuyo costo de construcción es de \$1 300 por kW con eficiencia de 40 por ciento. Otra posibilidad es construir plantas de ciclo combinado de gasificación integrada (CCGI) de combustión limpia donde el carbón se somete a calor y presión para gasificarlo y eliminar azufre y partículas de él. A continuación el carbón gaseoso se quema en una turbina de gas, y una parte del calor residual de los gases de escape se recupera para generar vapor para la turbina de vapor. La construcción de plantas CCGI cuesta aproximadamente \$1 500 por kW, pero su eficiencia es de cerca de 40 por ciento. El valor calorífico promedio del carbón es de cerca de 28 000 000 kJ por tonelada (es decir, se liberan 28 000 000 kJ de calor cuando se quema una tonelada de carbón). Para que la planta CCGI recupere su diferencia en los costos con los ahorros en combustible en cinco años, determine cuánto debe costar el carbón en \$ por tonelada.

**6-28**  Reconsidere el problema 6-27, y con un software apropiado investigue el precio del carbón para periodos de reembolso simple, costos de construcción de la planta y eficiencia de operación.

**6-29** Repita el problema 6-27 para un periodo de reembolso simple de tres años en lugar de cinco.

### Refrigeradores y bombas térmicas

**6-30C** ¿Cuál es la diferencia entre un refrigerador y una bomba de calor?

**6-31C** ¿Cuál es la diferencia entre un refrigerador y un acondicionador de aire?

**6-32C** Defina en sus propias palabras el coeficiente de desempeño de un refrigerador. ¿Puede ser mayor que la unidad?

**6-33C** Defina en sus propias palabras el coeficiente de desempeño de una bomba térmica. ¿Puede ser mayor que la unidad?

**6-34C** Una bomba de calor que se usa para calentar una casa tiene un COP (coeficiente de desempeño) de 2.5. Es decir, la bomba de calor entrega 2.5 kWh de energía a la casa por cada kWh de electricidad que consume. ¿Es ésta una violación de la primera ley de la termodinámica? Explique.

**6-35C** Un refrigerador tiene un COP de 1.5. Es decir, el refrigerador remueve 1.5 kWh de energía del espacio refrigerado por cada kWh de electricidad que consume. ¿Es ésta una violación de la primera ley de la termodinámica? Explique.

**6-36C** En un refrigerador, se transfiere calor de un medio de menor temperatura (el espacio refrigerado) a otro de mayor temperatura (el aire de la cocina). ¿Es ésta una violación de la segunda ley de la termodinámica? Explique.

**6-37C** Una bomba de calor es un dispositivo que absorbe energía del aire exterior frío y la transfiere al interior más cálido.

¿Es ésta una violación de la segunda ley de la termodinámica? Explique.

**6-38C** ¿Cuál es la expresión de Clausius de la segunda ley de la termodinámica?

**6-39C** Demuestre que las expresiones de Kelvin-Planck y de Clausius de la segunda ley son equivalentes.

**6-40** El coeficiente de desempeño de una bomba térmica residencial es 1.6. Calcule el efecto de calefacción en kJ/s que esta bomba producirá cuando consume 2 kW de energía eléctrica.

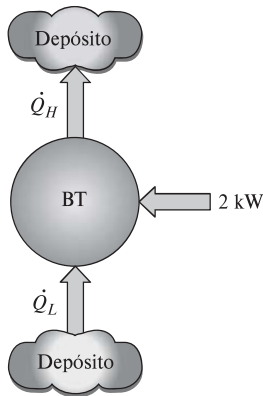


FIGURA P6-40

**6-41** Un congelador de alimentos debe producir un efecto de enfriamiento de 5 kW y su COP es de 1.3. ¿Cuántos kW de potencia requerirá este refrigerador para su operación?

**6-42** El acondicionador de aire de un automóvil produce un efecto de enfriamiento de 1 kW y consume 0.75 kW de energía. ¿Cuál es la tasa a la cual rechaza calor este acondicionador de aire?

**6-43** Un refrigerador de alimentos debe producir un efecto de enfriamiento de 15 000 kJ/h y rechazar 22 000 kJ/h de calor. Calcule el COP de este refrigerador. *Respuesta: 2.14*

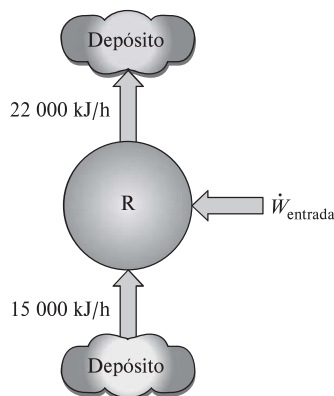


FIGURA P6-43

**6-44** Determine el COP de un refrigerador que remueve calor del compartimiento de alimentos a razón de 5 040 kJ/h por

cada kW de potencia que consume. También, determine la tasa de rechazo de calor hacia el aire exterior.

**6-45** Determine el COP de una bomba de calor que suministra energía a una casa a razón de 8 000 kJ/h por cada kW de energía eléctrica que consume. También, determine la tasa de absorción de energía del aire exterior.

*Respuestas: 2.22, 4 400 kJ/h*

**6-46** El COP de una bomba de calor es 1.7. Determine el calor transferido hacia y desde la bomba de calor cuando se suministran 50 kJ de trabajo.

**6-47E** Una bomba de calor con un COP de 1.4 debe producir un efecto de calentamiento de 100 000 Btu/h. ¿Cuánta potencia requiere este dispositivo, en hp?

**6-48** Un acondicionador de aire extrae calor de forma continua de una casa a razón de 750 kJ/min mientras consume 5.25 kW de energía eléctrica. Determine a) el COP de este acondicionador de aire y b) la tasa de transferencia de calor hacia el aire exterior. *Respuestas: a) 2.38, b) 1 065 kJ/min*

**6-49** Un refrigerador doméstico que tiene una entrada de potencia de 450 W y un COP de 1.5 debe enfriar cinco sandías grandes, de 10 kg cada una, a 8 °C. Si las sandías inicialmente están a 28 °C, determine cuánto tardará el refrigerador en enfriarlas. Las sandías se pueden considerar como agua cuyo calor específico es 4.2 kJ/kg·°C. ¿Es su respuesta realista u optimista? Explique. *Respuesta: 104 min*

**6-50** Cuando un hombre regresa a su casa bien sellada en un día de verano, encuentra que la casa está a 35 °C. Enciende el acondicionador de aire, que enfria toda la casa a 20 °C en 30 minutos. Si el COP del sistema de acondicionamiento de aire es 2.8, determine la potencia consumida por el acondicionador de aire. Suponga que toda la masa dentro de la casa equivale a 800 kg de aire para el cual  $c_v = 0.72$  kJ/kg °C y  $c_p = 1.0$  kJ/kg °C.

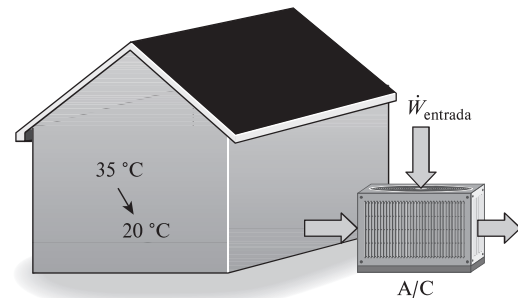



FIGURA P6-50

**6-51**  Reconsidere el problema 6-50, y con un software apropiado, determine la entrada de potencia requerida por el acondicionador de aire para enfriar la casa en función de las capacidades nominales del acondicionador de aire EER en rango de 5 a 15. Explique sus resultados e incluya costos representativos de unidades de acondicionamiento de aire en el rango de capacidades nominales EER.

**6-52E** A una máquina de hielo entra agua a 55 °F y sale como hielo a 25 °F. Si el COP de la máquina de hielo es 2.4 durante este proceso, determine la entrada de potencia requerida para

una tasa de producción de hielo de 28 lbm/h. (Se tiene que remover 169 Btu de cada lbm de agua a 55 °F para transformarla en hielo a 25 °F.)

**6-53** Se utiliza un refrigerador para enfriar agua de 23 a 5 °C de manera continua. El calor rechazado en el condensador es 570 kJ/min y la potencia es 2.65 kW. Determine la tasa a la cual se enfría el agua en L/min y el COP del refrigerador. El calor específico del agua es 4.18 kJ/kg·°C y su densidad es 1 kg/L. *Respuestas:* 5.46 L/min, 2.58

**6-54** Un refrigerador doméstico funciona una cuarta parte del tiempo y extrae el calor del compartimiento de comida a una razón promedio de 800 kJ/h. Si el COP del refrigerador es de 2.2 determine la energía que el refrigerador consume cuando está funcionando.

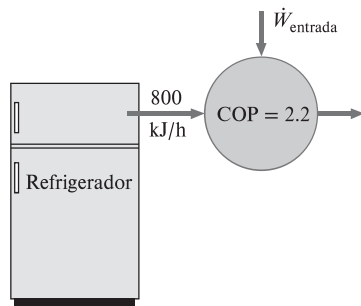


FIGURA P6-54

**6-55E** Considere una oficina que se enfría adecuadamente mediante un acondicionador de aire de ventana de 12 000 Btu/h de efecto de enfriamiento. Ahora se ha decidido convertirla en un cuarto de computadoras donde se instalarán varias computadoras, terminales e impresoras con una potencia nominal total de 8.4 kW. Se tienen en almacén varios acondicionadores de aire de 7 000 Btu/h de efecto de enfriamiento, que se pueden instalar para satisfacer las necesidades adicionales de enfriamiento. Suponiendo un factor de uso de 0.4 (es decir, sólo se consumirá en un tiempo dado 40 por ciento de la potencia nominal) y la presencia de siete personas adicionales, cada una de las cuales genera calor a razón de 100 W, determine cuántos de estos acondicionadores de aire se tienen que instalar en el cuarto.

**6-56** Una casa que se calentaba con calentadores de resistencia eléctricos consumía 1 200 kW de energía eléctrica en un mes de invierno. Si esta casa se calentara con una bomba de calor con COP de 2.4, determine cuánto dinero se ahorraría el propietario ese mes. Suponga un precio de \$0.12/kWh de la electricidad.

**6-57** Al condensador de una bomba de calor residencial entra refrigerante 134a a 800 kPa y 35 °C, a razón de 0.018 kg/s, y sale como líquido saturado a 800 kPa. Si el compresor consume 1.2 kW de potencia, determine *a)* el COP de la bomba de calor y *b)* la tasa de absorción de calor del aire exterior.

**6-58** Entra refrigerante R-134a a los serpentines del evaporador colocado en la parte posterior del congelador de un refrigerador doméstico a 100 kPa con una calidad de 20 por ciento

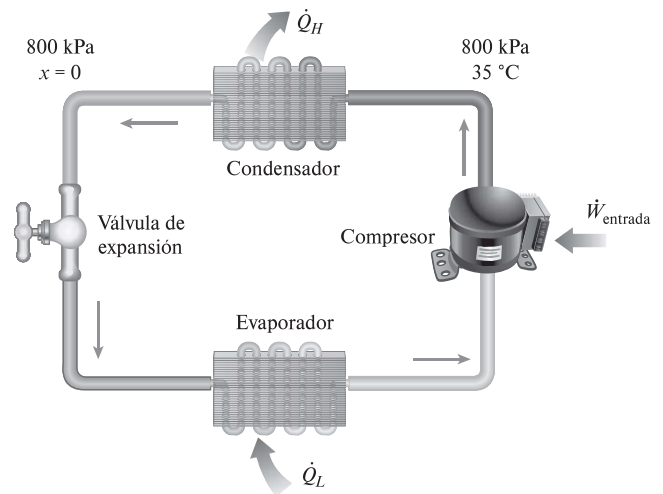


FIGURA P6-57

y sale a 100 kPa y -26 °C. Si el compresor consume 600 W de potencia el COP del refrigerador es 1.2, determine *a)* el flujo másico del refrigerante y *b)* la tasa del calor rechazado al aire de la cocina. *Respuestas:* *a)* 0.00414 kg/s, *b)* 1 320 W

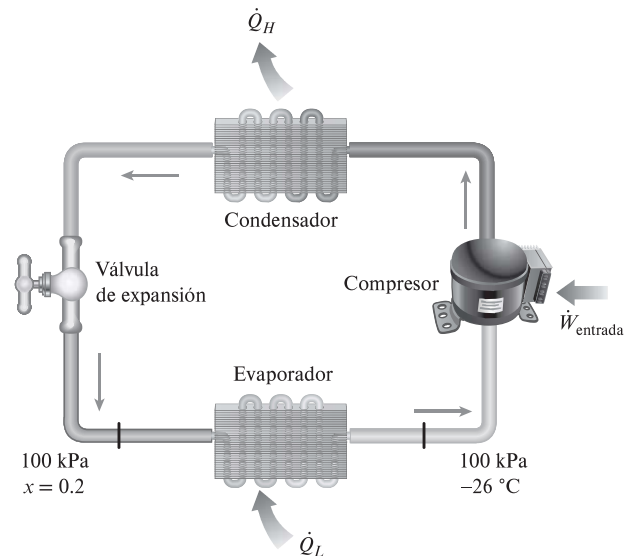


FIGURA P6-58

**Máquinas de movimiento perpetuo**

**6-59C** Un inventor afirma que ha desarrollado un calentador de resistencia que suministra 1.2 kWh de energía a un cuarto por cada kWh de electricidad que consume. ¿Es ésta una aseveración razonable, o este inventor ha desarrollado una máquina de movimiento perpetuo? Explique.

**6-60C** Es de conocimiento común que la temperatura del aire sube cuando se comprime. Un inventor pensó usar este aire de alta temperatura para calentar edificios. Usó un compresor actuado por un motor eléctrico. El inventor dice que el sistema de aire caliente comprimido es 25 por ciento más eficiente que

un sistema de calentamiento por resistencia que proporcione una cantidad equivalente de calentamiento. ¿Es esta afirmación válida, o es sólo otra máquina de movimiento perpetuo? Explique.

### Procesos reversibles e irreversibles

**6-61C** ¿Por qué se interesan los ingenieros en los procesos reversibles aun cuando nunca se puedan lograr?

**6-62C** Se deja una lata de refresco en una habitación caliente donde su temperatura sube como resultado de la transferencia de calor. ¿Es este un proceso reversible? Explique.

**6-63C** Un bloque se desliza hacia abajo de un plano inclinado con fricción y ninguna fuerza de restricción. ¿Es este un proceso reversible o irreversible? Justifique su respuesta.

**6-64C** ¿Cómo distingue entre irreversibilidades internas y externas?

**6-65C** Demuestre que los procesos que implican reacciones químicas son irreversibles considerando la combustión de un gas natural (p. ej., metano) y una mezcla de aire en un recipiente rígido.

**6-66C** Demuestre que los procesos que utilizan trabajo para mezclar son irreversibles considerando un sistema adiabático cuyo contenido se mezcla con una rueda de paletas que gira adentro del sistema (p. ej., batir una mezcla para un pastel con una mezcladora eléctrica).

**6-67C** ¿Por qué un proceso de no cuasiequilibrio requiere un mayor trabajo de entrada que el correspondiente de cuasiequilibrio?

**6-68C** ¿Por qué un proceso de expansión de no cuasiequilibrio suministra menos trabajo que el correspondiente de cuasiequilibrio?

**6-69C** ¿Es un proceso de expansión o compresión reversible forzosamente de cuasiequilibrio? ¿Es un proceso de expansión o compresión de cuasiequilibrio forzosamente reversible? Explique.

### Ciclo de Carnot y principios de Carnot

**6-70C** ¿Cuáles son los cuatro procesos que conforman el ciclo de Carnot?

**6-71C** ¿Cuáles son los dos enunciados conocidos como principios de Carnot?

**6-72C** ¿Es posible desarrollar un ciclo de máquina térmica *a*) real y *b*) reversible que sea más eficiente que el ciclo de Carnot operando entre los mismos límites de temperatura? Explique.

**6-73C** Alguien afirma haber desarrollado un nuevo ciclo reversible de máquina térmica que tiene una eficiencia teórica más alta que el ciclo de Carnot operando entre los mismos límites de temperatura. ¿Cómo evalúa usted esta afirmación?

**6-74C** Alguien afirma haber desarrollado un nuevo ciclo reversible de máquina térmica que tiene la misma eficiencia teórica que el ciclo de Carnot entre los mismos límites de temperatura. ¿Es ésta una afirmación razonable?

### Máquinas térmicas de Carnot

**6-75C** ¿Hay alguna manera de aumentar la eficiencia de una máquina térmica de Carnot que no sea aumentar  $T_H$  o disminuir  $T_L$ ?

**6-76C** Considere dos plantas eléctricas reales que operan con energía solar. Una planta recibe energía de un estanque solar a  $80^\circ\text{C}$ , y la otra la recibe de colectores concentradores que elevan la temperatura del agua a  $600^\circ\text{C}$ . ¿Cuál de estas plantas eléctricas tendrá una eficiencia más alta? Explique.

**6-77** Usted es un ingeniero que trabaja en una estación de generación de electricidad. Sabe que las flamas en la caldera alcanzan una temperatura de  $1\,200\text{ K}$  y que dispone agua de enfriamiento a  $300\text{ K}$  procedente de un río cercano. ¿Cuál es la eficiencia máxima que su planta alcanzará?

**6-78** Reconsidere el problema 6-77. También sabe que el límite de temperatura metalúrgica de las aspas de la turbina es de  $1\,000\text{ K}$  antes de que experimenten una deformación excesiva. Ahora, ¿cuál es la eficiencia máxima de esta planta?

**6-79E** Un experto en termodinámica afirma que desarrolló una máquina térmica con 50 por ciento de eficiencia térmica cuando opera con depósitos de energía térmica a  $1\,260\text{ R}$  y  $510\text{ R}$ . ¿Es válida esta afirmación?

**6-80E** Una máquina térmica opera en un ciclo de Carnot y su eficiencia térmica es de 47 por ciento. El calor residual de esta máquina se transfiere a un lago cercano a  $60^\circ\text{F}$  a razón de  $800\text{ Btu/min}$ . Determine *a*) la potencia de entrada de la máquina y *b*) la temperatura de la fuente.

Respuestas: *a*) 16.7 hp, *b*) 981 R

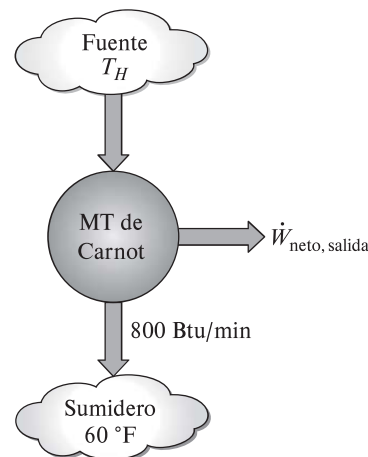


FIGURA P6-80E

**6-81E** Una máquina completamente reversible opera con una fuente a  $1\,500\text{ R}$  y un sumidero a  $500\text{ R}$ . ¿A qué tasa debe suministrarse calor a esta máquina, en  $\text{Btu/h}$ , para que produzca  $5\text{ hp}$  de potencia? Respuesta:  $19\,100\text{ Btu/h}$

**6-82** Un inventor afirma que desarrolló una máquina térmica que recibe  $700\text{ kJ}$  de calor de una fuente a  $500\text{ K}$  y produce  $300\text{ kJ}$  de trabajo neto mientras rechaza el calor residual hacia un sumidero a  $290\text{ K}$ . ¿Es esta una afirmación razonable? ¿Por qué?

**6-83** Una máquina térmica de Carnot opera entre una fuente a 1 000 K y un sumidero a 300 K. Si la máquina térmica recibe calor a razón de 800 kJ/min, determine *a)* la eficiencia térmica y *b)* la energía producida por esta máquina térmica.

Respuesta: *a)* 70 por ciento, *b)* 9.33 kW

**6-84E** Una máquina térmica trabaja en un ciclo de Carnot y tiene una eficiencia térmica de 75 por ciento. El calor de desecho de esta máquina se rechaza hacia un lago cercano a 60 °F, a razón de 800 Btu/min. Determine *a)* la producción de potencia de la máquina y *b)* la temperatura de la fuente.

Respuestas: *a)* 56.6 hp, *b)* 2 080 R

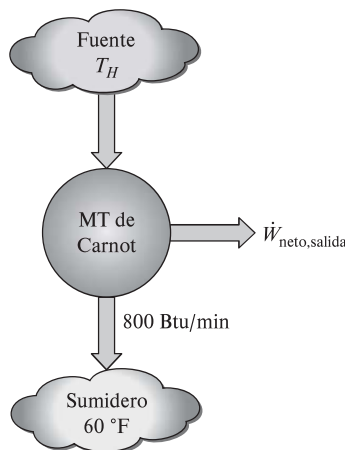



FIGURA P6-84E

**6-85** Una máquina térmica opera entre una fuente a 477 °C y un sumidero a 25 °C. Si se suministra calor a la máquina térmica a una tasa constante de 65 000 kJ/min, determine la producción máxima de potencia de esta máquina térmica.

**6-86**  Reconsidere el problema 6-85, y con un software apropiado, estudie los efectos de las temperaturas de la fuente de calor y el sumidero en la potencia producida y la eficiencia térmica del ciclo. Suponga que la temperatura de la fuente varía de 300 a 1 000 °C, y que la temperatura del sumidero varía de 0 a 50 °C. Grafique la potencia producida y la eficiencia del ciclo contra la temperatura de la fuente para temperaturas de sumidero de 0, 25 y 50 °C, y explique los resultados.

**6-87E** Un inventor afirma que, basado en sus mediciones, una máquina térmica recibe 300 Btu de calor de una fuente de 900 R, que convierte 160 Btu de él en trabajo, y que rechaza el resto como calor residual hacia un sumidero a 540 R. ¿Son razonables estas mediciones? ¿Por qué?

**6-88** En climas tropicales, el agua cercana a la superficie del océano permanece caliente durante todo el año a consecuencia de la absorción de energía solar. Sin embargo, en las partes más profundas del océano, el agua permanece a una temperatura relativamente baja, pues los rayos solares no pueden penetrar tan lejos. Se propone aprovechar esta diferencia térmica y construir una planta de energía que absorba el calor del agua caliente cercana a la superficie y deseché el calor resi-

dual en el agua fría a unos cientos de metros de profundidad. Determine la máxima eficiencia térmica de dicha planta si las temperaturas del agua en los dos sitios son de 24 y 3 °C, respectivamente.

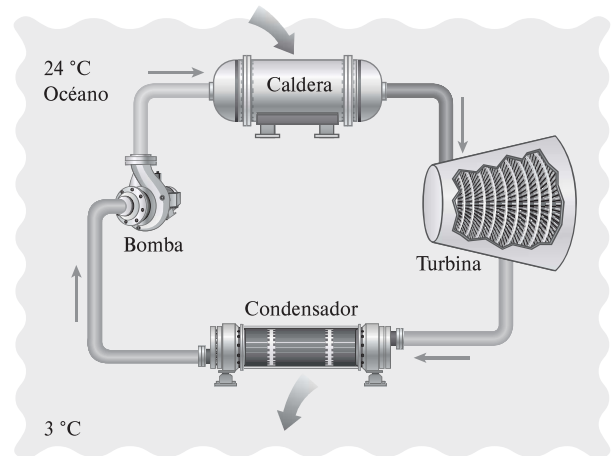


FIGURA P6-88

**6-89** Se afirma que la eficiencia de una máquina térmica completamente reversible se puede duplicar si se duplica la temperatura de la fuente de energía. Justifique la validez de esta afirmación.

### Refrigeradores y bombas de calor de Carnot

**6-90C** ¿Cuál es el COP más alto que un refrigerador que opera entre los niveles de temperatura  $T_L$  y  $T_H$  puede tener?

**6-91C** El propietario de una casa compra un refrigerador nuevo y un acondicionador de aire nuevo. ¿Cuál de estos dispositivos esperaría que tenga el COP más alto? ¿Por qué?

**6-92C** El propietario de una casa compra un refrigerador nuevo sin compartimento de congelación y un congelador independiente para la cocina nueva. ¿Cuál de estos dispositivos esperaría que tenga el menor COP? ¿Por qué?

**6-93C** ¿Cómo se puede incrementar el COP de un refrigerador de ciclo de Carnot?

**6-94C** En un esfuerzo para conservar la energía en un ciclo de máquina térmica, alguien sugiere incorporar un refrigerador que absorba algo de la energía de desecho  $Q_L$  y la transfiera a la fuente de energía de la máquina térmica. ¿Es ésta una idea inteligente? Explique.

**6-95C** Está bien establecido que la eficiencia térmica de una máquina térmica aumenta al disminuir la temperatura  $T_L$  a la que se rechaza el calor de la máquina térmica. En un esfuerzo por aumentar la eficiencia de una planta eléctrica, alguien sugiere refrigerar el agua de enfriamiento antes de que entre al condensador, donde tiene lugar el rechazo de calor. ¿Estaría usted a favor de esta idea? ¿Por qué?

**6-96C** Se sabe bien que la eficiencia térmica de las máquinas térmicas aumenta al incrementar la temperatura de la fuente de energía. En un intento de aumentar la eficiencia de una planta eléctrica, alguien sugiere transferir energía, mediante una bomba

de calor, de la fuente disponible de energía a un medio a temperatura más alta, antes de suministrar la energía a la planta eléctrica. ¿Qué piensa usted de esta sugerencia? Explique.

**6-97** Un experto en termodinámica afirma que desarrolló una bomba de calor con un COP de 1.7 cuando opera con depósitos de energía térmica a 273 y 293 K. ¿Es válida esta afirmación?

**6-98** Determine el trabajo mínimo por unidad de transferencia de calor desde el depósito fuente que se requiere para operar una bomba de calor con depósitos de energía térmica a 460 y 535 K.

**6-99** Un refrigerador completamente reversible es accionado por un compresor de 10 kW y opera con depósitos de energía térmica a 250 y 300 K. Calcule la tasa de enfriamiento provista por este refrigerador. *Respuesta:* 50 kW

**6-100** Se requiere que un sistema de aire acondicionado que opera en el ciclo de Carnot inverso transfiera calor de una casa a razón de 750 kJ/min para mantener su temperatura a 24 °C. Si la temperatura del aire exterior es de 35 °C, determine la potencia requerida para operar este sistema de aire acondicionado.

*Respuesta:* 0.463 kW

**6-101** Una bomba térmica opera en un ciclo de Carnot con un COP de 12.5. Conserva un espacio a 24 °C consumiendo 2.15 kW de potencia. Determine la temperatura del depósito del cual se absorbe el calor y la carga de calentamiento que suministra la bomba térmica.

*Respuestas:* 273 K, 26.9 kW

**6-102E** Se utiliza un sistema de aire acondicionado para mantener una casa a 70 °F cuando la temperatura exterior es de 100 °F. La casa absorbe calor a través de los muros y ventanas a razón de 800 Btu/min y la tasa de generación de calor dentro de la casa debido a las personas, luces y aparatos eléctricos asciende a 100 Btu/min. Determine la entrada de potencia mínima requerida para este sistema de aire acondicionado.

*Respuesta:* 1.20 hp

**6-103** Un refrigerador de ciclo de Carnot absorbe calor de un espacio a 15 °C a razón de 16 000 kJ/h y rechaza calor hacia un depósito a 36 °C. Determine el COP del refrigerador, la

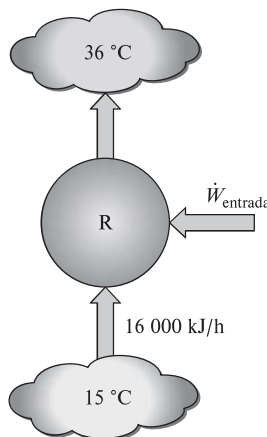


FIGURA P6-103

entrada de potencia, en kW, y la tasa del calor rechazado hacia el depósito de alta temperatura, en kJ/h.

**6-104E** Un refrigerador completamente reversible opera entre depósitos térmicos a 450 y 540 R. ¿Cuántos kilowatts de potencia se requieren para que este dispositivo produzca un efecto de enfriamiento de 15 000 Btu/h?

**6-105** Un refrigerador de ciclo de Carnot opera en un cuarto donde la temperatura es de 25 °C. El refrigerador consume 500 W de potencia cuando opera y su COP es de 4.5. Determine *a)* la tasa de remoción de calor del espacio refrigerado, y *b)* la temperatura del espacio refrigerado.

*Respuestas:* *a)* 135 kJ/min, *b)* -29.2 °C

**6-106** Se utiliza una bomba de calor para calentar una casa y mantenerla a 24 °C. En un día de invierno cuando la temperatura del aire exterior es de -5 °C, se estima que la casa pierde calor a razón de 80 000 kJ/h. Determine la potencia mínima requerida para operar esta bomba de calor.

**6-107** Se utiliza un refrigerador comercial con refrigerante 134a como su fluido de trabajo para mantener el espacio refrigerado a -35 °C al liberar el calor residual en el agua refrigerante que ingresa al condensador a 18 °C a razón de 0.25 kg/s y sale de él a 26 °C. El refrigerante entra al condensador a 1.2 MPa y 50 °C y sale de él a la misma presión subenfriado 5 °C. Si el compresor consume 3.3 kW de energía, determine *a)* la tasa de flujo másico del refrigerante, *b)* la carga de refrigeración, *c)* el COP y *d)* la energía mínima de entrada al compresor para la misma carga de refrigeración.

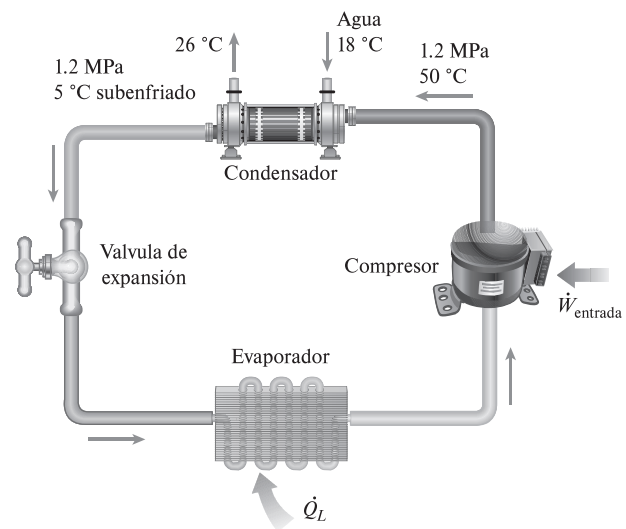


FIGURA P6-107

**6-108** El desempeño de una bomba de calor se degrada (es decir, su COP se reduce) a medida que la temperatura de la fuente de calor disminuye. Esto hace que no sea atractivo utilizar bombas de calor en lugares con condiciones de clima grave. Considere una casa que se calienta y se mantiene a 20 °C con una bomba de calor durante el invierno. ¿Cuál es el COP máximo para esta bomba de calor si el calor se extrae del aire externo a *a)* 10 °C, *b)* -5 °C y *c)* -30 °C?

**6-109E** Se debe utilizar una bomba de calor para calentar una casa en invierno. La casa debe estar a 78 °F en todo momento. Cuando la temperatura al aire libre disminuye a 25 °F, se estima que la casa pierde calor a razón de 70 000 Btu/h. Determine la potencia mínima requerida para operar esta bomba si el calor se extrae del *a)* aire exterior a 25 °F y *b)* el agua de un pozo a 50 °F.

**6-110** Una bomba completamente reversible tiene un COP de 1.6 y una temperatura de sumidero de 300 K. Calcule *a)* la temperatura de la fuente y *b)* la tasa de transferencia de calor hacia el sumidero cuando se suministran 1.5 kW de potencia a esta bomba de calor.

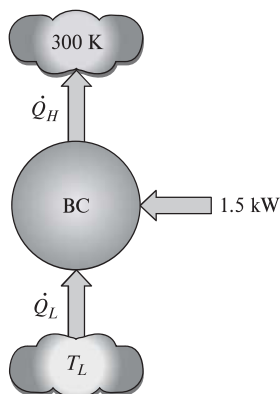


FIGURA P6-110

**6-111** Una bomba de calor de Carnot se usa para calentar una casa y mantenerla a 25 °C en invierno. Un día en que la temperatura exterior promedio permanece alrededor de 2 °C, se estima que la casa pierde calor a razón de 55 000 kJ/h. Si la bomba de calor consume 4.8 kW de potencia al operar, determine *a)* cuánto tiempo trabajó la bomba ese día; *b)* los costos totales de calentamiento, suponiendo un precio promedio de \$0.11/kWh de electricidad, y *c)* el costo de calefacción para el mismo día si se utiliza calentador eléctrico en vez de una bomba de calor. *Respuestas:* *a)* 5.90 h; *b)* \$3.11; *c)* \$40.3

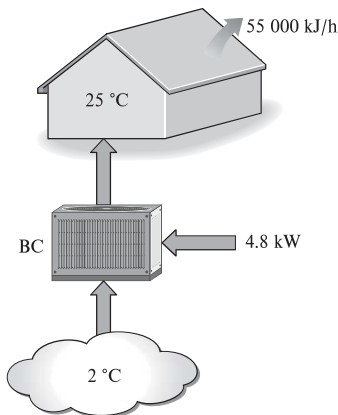



FIGURA P6-111

**6-112** Una máquina térmica de Carnot recibe calor de un depósito a 900 °C a razón de 800 kJ/min y rechaza el calor residual al aire ambiente a 27 °C. Todo el trabajo producido por la máquina térmica se utiliza para operar un refrigerador que extrae calor del espacio refrigerado a -5 °C y lo transfiere al aire ambiente a 27 °C. Determine *a)* la tasa máxima de calor extraído del espacio refrigerado y *b)* la tasa total de rechazo de calor al aire ambiente.

*Respuestas:* *a)* 4 982 kJ/min, *b)* 5 782 kJ/min

**6-113** La estructura de una casa es tal que pierde calor a razón de 4 500 kJ/h por la diferencia en °C entre el interior y el exterior. Se utiliza una bomba de calor que requiere una entrada de potencia de 4 kW para mantener esta casa a 24 °C. Determine la temperatura exterior más baja para la cual la bomba de calor puede satisfacer los requerimientos de calefacción de esta casa. *Respuesta:* -6.8 °C

**6-114** Deduzca una expresión para el COP de un refrigerador completamente reversible en función de las temperaturas,  $T_L$  y  $T_H$ , del depósito de energía térmica.

**6-115**  Calcule y grafique el COP de un refrigerador completamente reversible en función de la temperatura del sumidero hasta de 500 K con la temperatura de la fuente fija en 250 K.

**Tema especial: refrigeradores domésticos**

**6-116C** ¿Por qué los refrigeradores actuales son mucho más eficientes que los construidos en el pasado?

**6-117C** ¿Por qué es importante limpiar los serpentines del condensador de un refrigerador doméstico unas cuantas veces al año? Además, ¿por qué es importante que no se bloquee el flujo de aire a través de los serpentines del condensador?

**6-118C** Alguien propone que el sistema de refrigeración de un supermercado se sobrediseñe, de modo que todas las necesidades de acondicionamiento de aire de la tienda se puedan satisfacer por aire refrigerado sin instalar un sistema de acondicionamiento de aire. ¿Qué piensa usted de esta propuesta?

**6-119C** Alguien propone que todas las necesidades de refrigeración y congelación de una tienda se satisfagan usando un gran congelador que suministre suficiente aire frío a -20 °C en vez de instalar refrigeradores y congeladores separados. ¿Qué piensa usted de esta propuesta?

**6-120** Explique cómo se puede reducir el consumo de energía de su refrigerador doméstico.

**6-121** La etiqueta de "Guía energética" de un refrigerador dice que el refrigerador consumirá electricidad con un costo de \$170 por año en uso normal si el costo de electricidad es de \$0.125/kWh. Si la electricidad que consume el foco de iluminación interna es insignificante y el refrigerador consume 400 W cuando trabaja, determine la fracción del tiempo durante la cual trabajará el refrigerador.

**6-122** La iluminación interior de los refrigeradores normalmente se hace mediante lámparas incandescentes cuyos interruptores actúan al abrir la puerta del refrigerador. Considere un refrigerador cuyo foco de 40 W permanece encendido aproximadamente 60 h por año. Se propone reemplazar el foco por otro más eficiente que consume sólo 18 W pero tiene un precio

de adquisición e instalación de \$25. Si el refrigerador tiene un coeficiente de desempeño de 1.3 y el costo de la electricidad es de \$0.13/kWh, determine si los ahorros de energía por foco propuesto justifican su costo.

**6-123** Comúnmente se recomienda dejar enfriar a temperatura ambiente los alimentos calientes antes de introducirlos al refrigerador, para ahorrar energía. A pesar de esta recomendación de sentido común, una persona sigue cocinando dos veces a la semana una gran cacerola de estofado y metiendo la cacerola al refrigerador cuando aún está caliente, pensando que el dinero ahorrado probablemente es muy poco. Pero dice que se puede convencer si usted le demuestra que el ahorro es significativo. La masa promedio de la cacerola y su contenido es de 5 kg. La temperatura promedio de la cocina es 23 °C, y la temperatura promedio del alimento es 95 °C cuando se quita de la estufa. El espacio refrigerado se mantiene a 3 °C, y el calor específico promedio del alimento y la cacerola se puede tomar en 3.9 kJ/kg·°C. Si el refrigerador tiene un coeficiente de desempeño de 1.5 y el costo de la electricidad es de \$0.125 kWh, determine cuánto ahorrará esta persona por año esperando que el alimento se enfríe a la temperatura ambiente antes de meterlo al refrigerador.

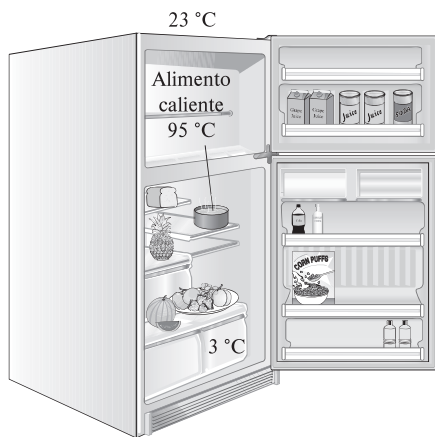


FIGURA P6-123

**6-124** Con frecuencia se dice que la puerta del refrigerador se debe abrir tan pocas veces como sea posible, durante el tiempo más corto posible, para ahorrar energía. Considere un refrigerador doméstico cuyo volumen interior es 0.9 m<sup>3</sup>, y que la temperatura interior promedio es 4 °C. En algún tiempo dado, un tercio del espacio refrigerado está ocupado por alimentos, y el espacio restante de 0.6 m<sup>3</sup> está lleno de aire. La temperatura promedio y la presión promedio en la cocina son 20 °C y 95 kPa, respectivamente. El contenido de humedad en la cocina y el refrigerador son 0.010 y 0.004 kg/kg de aire, respectivamente, y por lo tanto 0.006 kg de vapor de agua se condensan y se retiran del aire por cada kilogramo de aire que entra. La puerta del refrigerador se abre un promedio de 20 veces al día, y cada vez la mitad del volumen de aire en el refrigerador es reemplazada por el aire más tibio de la cocina. Si el refrigerador tiene un coeficiente de desempeño de 1.4 y el costo de la electricidad es de \$0.115/kWh, determine el costo de la energía que se desperdicia por año como resultado

de abrir la puerta del refrigerador. ¿Cuál sería la respuesta de usted si el aire de la cocina fuera muy seco y se condensara una cantidad insignificante de vapor de agua en el refrigerador?

### Problemas de repaso

**6-125** Un fabricante de congeladores para helados afirma que su producto tiene un coeficiente de desempeño de 1.3 mientras congela helados a 250 K cuando el aire ambiente está a 300 K. ¿Es válida esta afirmación?

**6-126** El diseñador de una bomba de calor afirma que cuenta con una bomba de calor de fuente de aire cuyo coeficiente de desempeño es 1.8 cuando calienta un edificio cuya temperatura interior es 300 K y cuando el aire atmosférico que circunda el edificio está a 260 K. ¿Es válida esta afirmación?

**6-127** Se utiliza un sistema de aire acondicionado para mantener una casa a una temperatura constante de 20 °C. La casa absorbe calor del exterior a razón de 20 000 kJ/h, y el calor generado en la casa por las personas, luces y aparatos eléctricos es de 8 000 kJ/h. Para un COP de 2.5 determine el suministro de potencia requerido por este sistema de aire acondicionado. *Respuesta:* 3.11 kW

**6-128E** Se utiliza una bomba de calor de Carnot para mantener un edificio residencial a 75 °F. Un análisis de energía de la casa revela que pierde calor a razón de 2 500 Btu/h por °F de diferencia de temperatura entre el interior y el exterior. Para una temperatura exterior de 35 °F, determine *a)* el coeficiente de desempeño y *b)* la entrada de potencia requerida a la bomba de calor. *Respuestas:* *a)* 13.4, *b)* 2.93 hp

**6-129E** Un sistema de refrigeración utiliza un condensador enfriado por agua para rechazar el calor residual. El sistema absorbe calor del espacio a 25 °F a razón de 21 000 Btu/h. El agua entra al condensador a 65 °F a razón de 1.45 lbm/s. Se estima que el COP del sistema es 1.9. Determine *a)* la entrada de potencia al sistema en kW, *b)* la temperatura del agua a la salida del condensador en °F y *c)* el COP máximo posible del sistema. El calor específico del agua es 1.0 Btu/lbm·°F.

**6-130** Un sistema de refrigeración debe enfriar barras de pan con una masa promedio de 350 g de 30 a -10 °C a razón de 1 200 barras por hora con aire refrigerado a -30 °C. Considerando que los calores específico y latente promedio del pan son 2.93 kJ/kg·°C y 109.3 kJ/kg, respectivamente, determine *a)* la tasa de extracción de calor de los panes, en kJ/h; *b)* el flujo volumétrico de aire requerido, en m<sup>3</sup>/h, si el aumento de temperatura del aire no debe exceder los 8 °C, y *c)* la capacidad del compresor y el sistema de refrigeración, en kW, para un COP de 1.2 para el sistema de refrigeración.

**6-131** Se utiliza una bomba de calor con un COP DE 2.8 para calentar una casa hermética al aire. Cuando funciona, la bomba consume 5 kW de potencia. Si la temperatura en la casa es 7 °C, cuando la bomba se enciende, ¿cuánto tardará la bomba en elevar la temperatura de la casa a 22 °C? ¿Es esta respuesta realista u optimista? Explique. Suponga que toda la masa adentro de casa (aire, muebles, etc.) equivale a 1 500 kg de aire. *Respuesta:* 19.2 min

**6-132** Un promisorio método de generación de potencia consiste en recolectar y guardar energía solar en grandes lagos artificiales de unos cuantos metros de profundidad, llamados

estanques solares. La energía solar es absorbida por todas las partes del estanque y la temperatura del agua se eleva en todas ellas. No obstante, la parte superior del lago, pierde hacia la atmósfera mucho del calor que absorbe, de ahí, que su temperatura disminuye. Esta agua fría sirve como aislante para la parte inferior del estanque y ayuda a atrapar energía. Por lo general, se esparce sal en el fondo del estanque para que el agua caliente no ascienda a la parte superior. Una central eléctrica que utiliza un fluido orgánico, como alcohol, como fluido de trabajo puede operar entre las partes superior e inferior del estanque. Si la temperatura del agua es  $35\text{ }^\circ\text{C}$  cerca de la superficie y  $80\text{ }^\circ\text{C}$  cerca del fondo del estanque, determine la eficiencia térmica máxima que esta central puede tener. ¿Es realista utilizar las temperaturas de  $35$  y  $80\text{ }^\circ\text{C}$  en los cálculos? Explique.

Respuesta: 12.7 por ciento

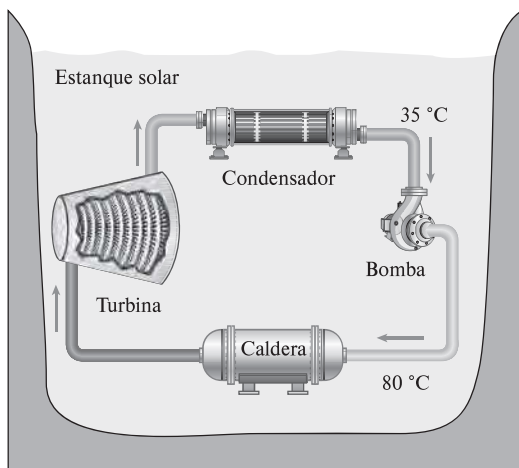


FIGURA P6-132

**6-133** Considere un ciclo de máquina térmica de Carnot ejecutado en sistema cerrado que utiliza  $0.025\text{ kg}$  de vapor como fluido de trabajo. Se sabe que la temperatura máxima absoluta en el ciclo es dos veces la temperatura mínima absoluta, y que la salida de trabajo neta del ciclo es  $60\text{ kJ}$ . Si el vapor cambia de vapor saturado a líquido saturado durante el rechazo de calor, determine la temperatura del vapor durante el proceso de rechazo de calor.

**6-134** Reconsidere el problema 6-133, y con un software apropiado, investigue el efecto de la salida de trabajo neto en la temperatura requerida del vapor durante el proceso de rechazo de calor. Considere que la salida de trabajo varía de  $40$  a  $60\text{ kJ}$ .

**6-135** Considere un ciclo de refrigeración de Carnot ejecutado en un sistema cerrado en la región de mezcla saturada de líquido-vapor que utiliza  $0.96\text{ kg}$  de refrigerante 134a como fluido de trabajo. Se sabe que la temperatura absoluta máxima en el ciclo es 1.2 veces la temperatura absoluta mínima, y que la entrada de trabajo neto al ciclo es  $22\text{ kJ}$ . Si el refrigerante cambia de vapor saturado a líquido saturado durante el proceso de rechazo de calor, determine la presión mínima en el ciclo.

**6-136** Reconsidere el problema 6-135, y con un software apropiado, investigue el efecto de la entrada

de trabajo neto en la presión mínima. Considere que la entrada de trabajo varía de  $10$  a  $30\text{ kJ}$ . Grafique la presión mínima en el ciclo de refrigeración en función de la entrada de trabajo neto, y explique los resultados.

**6-137** Considere un ciclo de máquina térmica de Carnot ejecutado en un sistema de flujo estacionario que utiliza vapor como fluido de trabajo. El ciclo tiene una eficiencia térmica de 30 por ciento, y el vapor cambia de líquido saturado a vapor saturado a  $275\text{ }^\circ\text{C}$  durante el proceso de adición de calor. Si la tasa de flujo másico del vapor es  $3\text{ kg/s}$ , determine la salida de trabajo neto de esta máquina, en kW.

**6-138** Considere dos máquinas térmicas de ciclo de Carnot que operan en serie. La primera máquina recibe calor del depósito a  $1400\text{ K}$  y rechaza el calor residual hacia otro depósito a temperatura  $T$ . La segunda máquina recibe esta energía rechazada por la primera, y convierte algo de ella en trabajo, y rechaza el resto hacia un depósito a  $300\text{ K}$ . Si las eficiencias térmicas de ambas máquinas son las mismas, determine la temperatura  $T$ . Respuesta:  $648\text{ K}$

**6-139** Una máquina térmica opera entre dos depósitos a  $800$  y  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . La mitad de la potencia desarrollada por la máquina térmica se usa para operar una bomba de calor de Carnot que extrae calor del entorno frío a  $2\text{ }^\circ\text{C}$  y lo transfiere a una casa que se mantiene a  $22\text{ }^\circ\text{C}$ . Si la casa pierde calor a razón de  $62000\text{ kJ/h}$ , determine la tasa mínima de suministro de calor a la máquina térmica necesaria para mantener la casa a  $22\text{ }^\circ\text{C}$ .

**6-140** Una antigua turbina de gas tiene una eficiencia de 21 por ciento y desarrolla una potencia de  $6000\text{ kW}$ . Determine el consumo de combustible de esta turbina de gas, en L/min, si el combustible tiene un valor de calentamiento de  $42000\text{ kJ/kg}$  y una densidad de  $0.8\text{ g/cm}^3$ .

**6-141** Considere un ciclo de bomba de calor Carnot ejecutado en un sistema de flujo estacionario en la región de vapor húmedo saturado que utiliza refrigerante R-134a que fluye a razón de  $0.18\text{ kg/s}$  como flujo de trabajo. Se sabe que la temperatura absoluta máxima en el ciclo es 1.2 veces la temperatura absoluta mínima, y que la entrada de potencia neta a ciclo es  $5\text{ kW}$ . Si el refrigerante cambia de vapor saturado a líquido saturado durante el proceso de rechazo de calor, determine la relación entre las presiones máxima y mínima en el ciclo.

**6-142** El espacio de carga vacío de un camión refrigerado, cuyas dimensiones internas son  $12\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ , se va a preenfriar de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a una temperatura promedio de  $5\text{ }^\circ\text{C}$ . La construcción del camión es tal que hay una transmisión de ganancia de calor a razón de  $120\text{ W}/^\circ\text{C}$ . Si la temperatura ambiente es de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , determine cuánto tardará un sistema con una capacidad de refrigeración de  $11\text{ kW}$  en preenfriar este camión.

**6-143** El flujo máximo de un cabezal de ducha estándar es de aproximadamente  $3.5\text{ gpm}$  ( $13.3\text{ L/min}$ ) y puede reducirse a  $2.75\text{ gpm}$  ( $10.5\text{ L/min}$ ) reemplazándolo por un cabezal de flujo bajo, equipado con controladores de flujo. Considere una familia de cuatro en la que cada persona toma un baño de seis minutos todas las mañanas. El agua de la ciudad a  $15\text{ }^\circ\text{C}$  se calienta a  $55\text{ }^\circ\text{C}$  en un calentador de agua de petróleo cuya eficiencia es de 65 por ciento. Esta agua después se temple

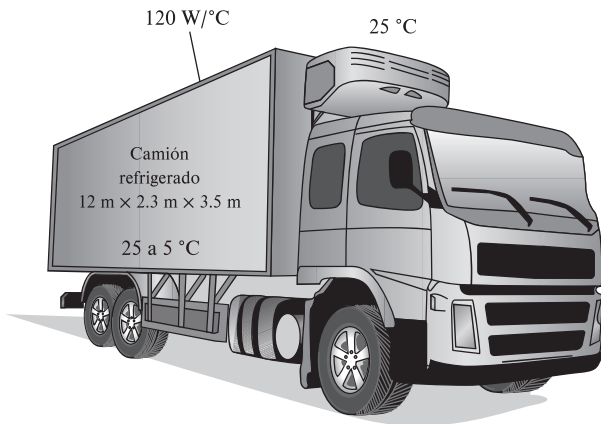


FIGURA P6-142

a  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  con agua fría en el codo T de la regadera antes de desembocar en el cabezal de la ducha. El precio del petróleo es de  $\$2.80/\text{gal}$  y su valor térmico es de  $146\ 300\ \text{kJ}/\text{gal}$ . Si se considera un calor específico constante de  $4.18\ \text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$  para el agua, determine la cantidad de petróleo y dinero que se ahorraría al año al reemplazar los cabezales de ducha estándar por unos de bajo flujo.

**6-144** Las necesidades de agua potable de una planta de producción con 20 empleados se deben satisfacer mediante una fuente de agua de tipo burbujeo. La fuente de agua refrigerada debe enfriar el agua de  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  y suministrar agua fría a razón de  $0.4\ \text{L}$  por hora por persona. El calor se transfiere al depósito del entorno a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a razón de  $45\ \text{W}$ . Si el COP del sistema de refrigeración es 2.9, determine el tamaño del compresor, en  $\text{W}$ , que será adecuado para el sistema de refrigeración de este enfriador de agua.

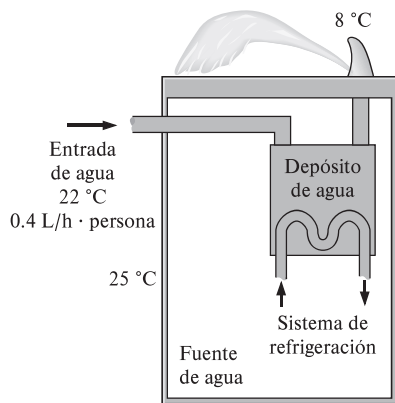


FIGURA P6-144


**6-145** Un calentador eléctrico de agua típico tiene una eficiencia de 95 por ciento y su operación cuesta  $\$350$  por año, a un costo unitario de electricidad de  $\$0.11/\text{kWh}$ . Un calentador de agua típico impulsado por bomba de calor tiene un COP de 3.3, pero su instalación cuesta alrededor de  $\$800$  más. Determine en cuántos años tardará el calentador de agua impulsado por bomba de calor en pagar la diferencia de costos con la energía que ahorra.



Calentador de agua

FIGURA P6-145

© McGraw-Hill Education/Christopher Kerrigan

**6-146**  Reconsidere el problema 6-145, y con un software apropiado, investigue el efecto del COP de la bomba de calor en los costos de operación anuales y el número de años para salir a mano. Considere que el COP varía de 2 a 5. Grafique el periodo de reembolso contra el COP y explique los resultados.

**6-147** El propietario de una casa está tratando de decidir entre un horno de gas natural de alta eficiencia de 97 por ciento y una bomba de calor con un COP de 3.5 que extrae calor del suelo. Los costos unitarios de la electricidad y el gas natural son  $\$0.115/\text{kWh}$  y  $\$0.75/\text{termia}$ , respectivamente ( $1\ \text{termia} = 105\ 500\ \text{kJ}$ ). Determine cuál sistema tendrá un costo menor de consumo de energía.

**6-148** Reemplazar las lámparas incandescentes con lámparas fluorescentes energéticamente eficientes puede reducir el consumo de energía de iluminación a la cuarta parte de la que antes era. La energía consumida por las lámparas finalmente se convierte en calor y, por lo tanto, el cambio a iluminación energéticamente eficiente también reduce la carga de enfriamiento en el verano, pero aumenta la carga de calefacción en invierno. Considere un edificio que recibe calefacción de un horno de gas natural con una eficiencia de 80 por ciento y se enfría mediante un acondicionador de aire con un COP de 3.5. Si la electricidad cuesta  $\$0.12/\text{kWh}$  y el gas natural cuesta  $\$1.40/\text{termia}$  ( $1\ \text{termia} = 105\ 500\ \text{kJ}$ ), determine si la iluminación eficiente aumentará o disminuirá el costo total de energía del edificio *a*) en verano; *b*) en invierno.

**6-149** Una bomba de calor suministra calor a una casa a razón de  $140\ 000\ \text{kJ}/\text{h}$  cuando la casa se mantiene a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durante un mes, la bomba de calor opera durante 100 horas para transferir energía de una fuente térmica fuera de la casa al interior de la misma. Considere una bomba de calor que recibe calor de dos fuentes diferentes exteriores de energía. En una apli-

cación, la bomba de calor recibe calor del aire exterior a 0 °C. En una segunda aplicación, la bomba de calor recibe calor de un lago cuya agua está a 10 °C. Si la electricidad cuesta \$0.12/kWh, determine la cantidad máxima de dinero que ahorra por usar el agua de lago en vez del aire exterior como fuente de calor.

**6-150** Los ventiladores de la cocina, del baño y otros en una casa se deben usar con moderación, ya que estos ventiladores pueden descargar una casa llena de aire calentado o enfriado en sólo una hora. Considere una casa de 200 m<sup>2</sup> cuya altura de techo es de 2.8 m. La casa se calienta con un calefactor de gas de 96 por ciento de eficiencia, y se mantiene a 22 °C y 92 kPa. Si el costo unitario del gas natural es \$1.20/termia (1 termia = 105 500 kJ), determine el costo de energía “desechada por los ventiladores” en 1 h. Suponga que la temperatura exterior promedio durante la estación fría es 5 °C.

**6-151** Repita el problema 6-150 para el costo de acondicionamiento de aire en clima seco y para una temperatura exterior de 33 °C. Suponga que el COP del sistema de acondicionamiento de aire es 2.1, y que el costo unitario de electricidad es de \$0.12/kWh.

**6-152** Una bomba de calor con refrigerante 134a como fluido de trabajo se usa para mantener un espacio a 25 °C absorbiendo calor de agua geotérmica que entra al evaporador a 60 °C a razón de 0.065 kg/s y sale a 40 °C. El refrigerante entra al evaporador a 12 °C con una calidad de 15 por ciento y sale a la misma presión como vapor saturado. Si el compresor consume 1.6 kW de potencia, determine *a*) el flujo másico del refrigerante, *b*) la tasa de suministro de calor, *c*) el COP y *d*) la entrada de potencia mínima al compresor para la misma tasa de suministro de calor.

Respuestas: *a*) 0.0338 kg/s, *b*) 7.04 kW, *c*) 4.40, *d*) 0.740 kW

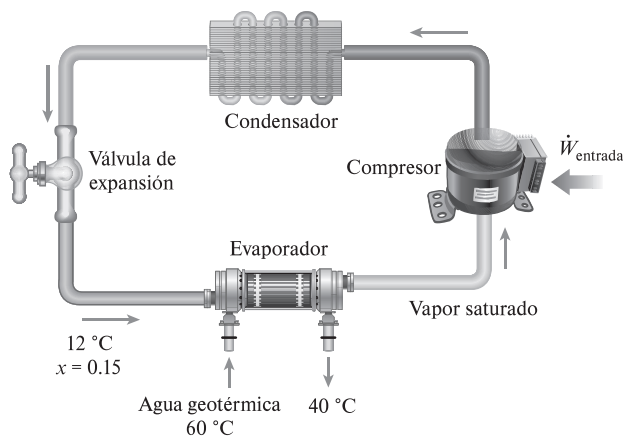


FIGURA P6-152

**6-153** Entra agua fría a 10 °C a un calentador de agua a razón de 0.02 m<sup>3</sup>/min y sale a 50 °C. El calentador recibe calor de una bomba que lo extrae de una fuente a 0 °C.

- Suponiendo que el agua es un líquido incompresible que no cambia de fase durante la adición de calor, determine la tasa de suministro de calor al agua, en kJ/s.
- Suponiendo que el calentador de agua actúa como sumidero térmico con una temperatura promedio de 30 °C, determine

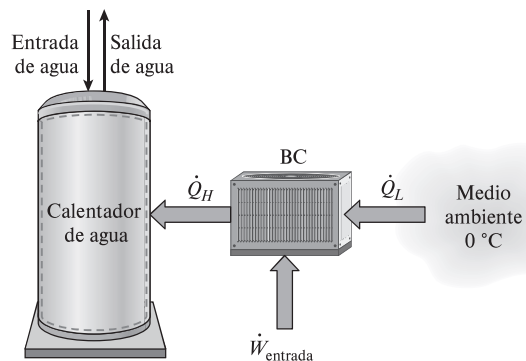


FIGURA P6-153

la potencia mínima suministrada a la bomba de calor, en kW.

**6-154** Con un software apropiado, determine el trabajo máximo que se puede extraer de un estanque que contiene 10<sup>5</sup> kg de agua a 350 K cuando la temperatura del medio ambiente es de 300 K. Observe que la temperatura del agua del estanque disminuirá poco a poco a medida que se extraiga energía de ella; por consiguiente, la eficiencia de la máquina disminuirá. Use intervalos de temperatura de *a*) 5 K, *b*) 2 K y *c*) 1 K hasta que la temperatura del estanque disminuya a 300 K. También resuelva este problema mediante integración y compare los resultados.

**6-155** Una máquina térmica de Carnot opera entre una fuente a  $T_H$  y un sumidero a  $T_L$ . Si se desea duplicar la eficiencia térmica de esta máquina, ¿cuál debe ser la nueva temperatura de la fuente? Suponga que la temperatura del sumidero se mantiene constante.

**6-156E** Calcule y grafique la eficiencia térmica de una máquina térmica completamente reversible en función de la temperatura de la fuente hasta de 2 000 R con la temperatura del sumidero fija en 500 R.

**6-157** Demuestre que  $COP_{BC} = COP_R + 1$  cuando tanto la bomba como el refrigerador tienen los mismos valores de  $Q_L$  y  $Q_H$ .

**6-158** Demuestre que el COP de un refrigerador no puede ser mayor que el de un refrigerador completamente reversible que comparte los mismos depósitos de energía térmica.

### Fundamentos de ingeniería y problemas de examen

**6-159** Considere un refrigerador y una bomba de calor de ciclo Carnot que operan entre los mismos dos depósitos de energía. Si el COP del refrigerador es 3.4, el COP de la bomba de calor es

- |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| <i>a</i> ) 1.7 | <i>b</i> ) 2.4 | <i>c</i> ) 3.4 |
| <i>d</i> ) 4.4 | <i>e</i> ) 5.0 |                |

**6-160** Una casa de 200 m<sup>2</sup> y 2.4 m de altura se mantiene a 22 °C mediante un sistema de acondicionamiento de aire cuyo COP es 3.2. Se estima que los ventiladores de la cocina, el baño y otros ventiladores de la casa descargan todo el aire acondicionado de la casa una vez cada hora. Si la temperatura exte-

rrior promedio es de  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la densidad del aire es  $1.20\text{ kg/m}^3$  y el costo unitario de electricidad es  $\$0.10/\text{kWh}$ , la cantidad de dinero “arrojada al aire” por los ventiladores en 10 horas es

- a)  $\$0.50$                       b)  $\$1.6$                       c)  $\$5.00$   
 d)  $\$11.00$                       e)  $\$16.00$

**6-161** Un acondicionador de aire de ventana que consume  $1\text{ kW}$  de electricidad cuando opera y tiene un coeficiente de desempeño de 3, se coloca en medio de un cuarto, y se conecta a la corriente. La tasa de enfriamiento o calefacción que este acondicionador proporcionará al aire en el cuarto cuando opera es

- a)  $3\text{ kJ/s}$ , enfriamiento                      b)  $1\text{ kJ/s}$ , enfriamiento  
 c)  $0.33\text{ kJ/s}$ , calefacción                      d)  $1\text{ kJ/s}$ , calefacción  
 e)  $3\text{ kJ/s}$ , calefacción

**6-162** Las necesidades de agua potable se satisfacen enfriando agua de la llave en una fuente de agua refrigerada de  $23\text{ a }6\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tasa promedio de  $18\text{ kg/h}$ . Si el COP de este refrigerador es 3.1, la entrada de potencia requerida a este refrigerador es

- a)  $1\ 100\text{ W}$                       b)  $355\text{ W}$                       c)  $195\text{ W}$   
 d)  $115\text{ W}$                       e)  $35\text{ W}$

**6-163** La etiqueta de una lavadora indica que ésta usará agua caliente por un valor de  $\$85$  por año si el agua se calienta con un calentador eléctrico 90 por ciento eficiente, con una tarifa eléctrica de  $\$0.125/\text{kWh}$ . Si el agua se calienta de  $18\text{ a }45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la cantidad de agua caliente que usa una familia promedio por año es

- a)  $19.5$  toneladas                      b)  $21.7$  toneladas  
 c)  $24.1$  toneladas                      d)  $27.2$  toneladas  
 e)  $30.4$  toneladas

**6-164** Una bomba de calor absorbe calor del exterior frío a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y suministra calor a una casa a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a razón de  $18\ 000\text{ kJ/h}$ . Si la potencia consumida por la bomba de calor es  $1.9\text{ kW}$ , su coeficiente de desempeño es

- a)  $1.3$                       b)  $2.6$                       c)  $3.0$   
 d)  $3.8$                       e)  $13.9$

**6-165** Un ciclo de máquina térmica se ejecuta con vapor de agua en el domo de saturación. La presión del vapor es  $1\text{ MPa}$  durante la adición de calor y  $0.4\text{ MPa}$  durante el rechazo de calor. La eficiencia más alta posible de esta máquina térmica es

- a)  $8.0\%$                       b)  $15.6\%$                       c)  $20.2\%$   
 d)  $79.8\%$                       e)  $100\%$

**6-166** Un ciclo de máquina térmica se ejecuta con R-134a bajo el domo de saturación entre los límites de presión de  $1.2$  y  $0.16\text{ MPa}$ . El coeficiente máximo de desempeño de esta bomba de calor es

- a)  $5.7$                       b)  $5.2$                       c)  $4.8$   
 d)  $4.5$                       e)  $4.1$

**6-167** Un ciclo de refrigeración se ejecuta con R-134a bajo el domo de saturación entre los límites de presión de  $1.6$  y  $0.2\text{ MPa}$ . Si el consumo de potencia del refrigerador es de  $3\text{ kW}$ , la

tasa máxima de remoción de calor del espacio enfriado de este refrigerador es

- a)  $0.45\text{ kJ/s}$                       b)  $0.78\text{ kJ/s}$                       c)  $3.0\text{ kJ/s}$   
 d)  $11.6\text{ kJ/s}$                       e)  $14.6\text{ kJ/s}$

**6-168** Una bomba de calor con un COP de 3.2 se usa para calentar una casa perfectamente sellada (sin fugas de aire). La masa total dentro de la casa (aire, muebles, etc.) equivale a  $1\ 200\text{ kg}$  de aire. En operación, la bomba consume una potencia eléctrica a razón de  $5\text{ kW}$ . La temperatura de la casa era de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  cuando se puso a funcionar la bomba. Si la transferencia a través de la envolvente de la casa (paredes, techo, etc.) es insignificante, el intervalo de tiempo durante el cual debe funcionar la bomba para elevar la temperatura del contenido total de la casa a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  es

- a)  $13.5\text{ min}$                       b)  $43.1\text{ min}$                       c)  $138\text{ min}$   
 d)  $18.8\text{ min}$                       e)  $808\text{ min}$

**6-169** Un ciclo de máquina térmica se ejecuta con vapor de agua en el domo de saturación entre los límites de presión de  $7$  y  $2\text{ MPa}$ . Si se suministra calor a la máquina térmica a razón de  $150\text{ kJ/s}$ , la potencia máxima desarrollada por esta máquina térmica es

- a)  $8.1\text{ kW}$                       b)  $19.7\text{ kW}$                       c)  $38.6\text{ kW}$   
 d)  $107\text{ kW}$                       e)  $130\text{ kW}$

**6-170** Una máquina térmica recibe calor de una fuente a  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$  y rechaza el calor de desecho a un sumidero a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si se suministra calor a esta máquina a razón de  $100\text{ kJ/s}$ , la potencia máxima que esta máquina puede producir es

- a)  $25.4\text{ kW}$                       b)  $55.4\text{ kW}$                       c)  $74.6\text{ kW}$   
 d)  $95.0\text{ kW}$                       e)  $100\text{ kW}$

**6-171** Se requiere un sistema de acondicionamiento de aire que opere en el ciclo inverso de Carnot para extraer calor de la casa a razón de  $32\text{ kJ/s}$  para mantener su temperatura constante a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si la temperatura exterior es de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la potencia necesaria para operar este sistema de aire acondicionado es

- a)  $0.58\text{ kW}$                       b)  $3.20\text{ kW}$                       c)  $1.56\text{ kW}$   
 d)  $2.26\text{ kW}$                       e)  $1.64\text{ kW}$

**6-172** Un refrigerador absorbe calor de un medio frío a  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a razón de  $5\ 400\text{ kJ/h}$  y rechaza el calor residual hacia un medio a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si el coeficiente de desempeño del refrigerador es 2, la potencia que consume el refrigerador es

- a)  $0.5\text{ kW}$                       b)  $0.75\text{ kW}$                       c)  $1.0\text{ kW}$   
 d)  $1.5\text{ kW}$                       e)  $3.0\text{ kW}$

**6-173** Dos máquinas térmicas de Carnot operan en serie de modo que el sumidero térmico de la primera máquina sirve como fuente de calor para la segunda. Si la temperatura de la fuente de la primera máquina es de  $1\ 300\text{ K}$  y la temperatura del sumidero de la segunda máquina es de  $300\text{ K}$ , y las eficiencias térmicas de ambas máquinas son iguales, la temperatura del depósito intermedio es

- a)  $625\text{ K}$                       b)  $800\text{ K}$                       c)  $860\text{ K}$   
 d)  $453\text{ K}$                       e)  $758\text{ K}$

**6-174** Un refrigerador doméstico nuevo típico consume alrededor de 680 kWh de electricidad por año y tiene un coeficiente de desempeño de 1.4. La cantidad de calor extraída por este refrigerador del espacio refrigerado por año es

- a) 952 MJ/año      b) 1 749 MJ/año      c) 2 448 MJ/año  
d) 3 427 MJ/año      e) 4 048 MJ/año

### Problemas de diseño y ensayo

**6-175** Demuestre que el trabajo producido por un proceso reversible sobrepasa al producido por un proceso irreversible equivalente considerando que un peso se desliza hacia abajo por un plano inclinado con y sin fricción.

**6-176** Diseñe una máquina térmica de Carnot que utilice componentes de flujo constante y describa cómo se ejecuta el ciclo de Carnot en esa máquina. ¿Qué sucede cuando las direcciones de las interacciones de trabajo y calor se invierten?

**6-177** El Sol suministra energía electromagnética a la Tierra. Parece tener una temperatura efectiva de aproximadamente 5 800 K. En un día despejado de verano en América del Norte, la energía incidente en una superficie de cara al Sol es de aproximadamente  $0.95 \text{ kW/m}^2$ . La energía solar electromagnética se puede convertir en energía térmica al ser absorbida por una superficie oscurecida. ¿Cómo podría usted caracterizar el potencial de trabajo de la energía solar cuando se va a usar para producir trabajo?

**6-178** Con la ayuda de un termómetro, mida la temperatura del principal compartimiento de comida de su refrigerador, y verifique si está entre 1 y 4 °C. También mida la temperatura del compartimiento del congelador, y verifique si está al valor recomendado de  $-18 \text{ °C}$ .

**6-179** Usando un cronómetro (o reloj) y un termómetro, lleve a cabo el siguiente experimento para determinar la tasa de ganancia de calor de su refrigerador. Primero, asegúrese de que la puerta del refrigerador no se abra durante al menos unas pocas horas, de modo que se establezcan condiciones estacionarias de operación. Ponga en marcha el cronómetro cuando el refrigerador deje de funcionar, y mida el tiempo  $\Delta T_1$  durante

el cual permanece apagado antes de volver a arrancar. Luego mida el tiempo  $\Delta T_2$  durante el cual permanece funcionando. Observe que el calor que se extrae durante  $\Delta T_2$  es igual a la ganancia de calor del refrigerador durante  $\Delta T_1 + \Delta T_2$ , y usando la potencia consumida por el refrigerador cuando está funcionando, determine la tasa promedio de ganancia de calor para su refrigerador, en W. Considere el COP (coeficiente de desempeño) de su refrigerador como 1.3, si no está disponible.

**6-180** Diseñe una unidad de hidrogenfriamiento que pueda enfriar frutas y vegetales de 30 a 5 °C a razón de 20 000 kg/h bajo las siguientes condiciones:

La unidad será de tipo inundación, que enfriará los productos cuando se transportan en el canal lleno de agua. Los productos se dejarán caer en el canal lleno de agua en un extremo y se recogerán en el otro extremo. El canal puede tener una anchura de hasta 3 m y una altura de hasta 90 cm. El agua circulará y se enfriará a través de la sección de evaporación de un sistema de refrigeración. La temperatura del refrigerante dentro de los serpentines será  $-2 \text{ °C}$  y la temperatura del agua no debe reducirse por debajo de  $1 \text{ °C}$  y no ha de exceder  $6 \text{ °C}$ .

Suponiendo valores razonables para la densidad promedio, el calor específico y la porosidad del producto (la fracción del volumen de aire en una caja), recomiende valores razonables para a) la velocidad del agua por el canal y b) la capacidad de refrigeración del sistema de refrigeración.

**6-181** En pos de reducir la contaminación térmica y aprovechar las fuentes renovables de energía, algunas personas han propuesto que se aprovechen fuentes como las descargas de las plantas de energía eléctrica, la energía geotérmica y la energía térmica de los océanos. Aunque muchas de estas fuentes contienen una enorme cantidad de energía, la cantidad de trabajo que son capaces de producir es limitada. ¿Cómo podría usted utilizar el potencial de trabajo para asignar una “calidad de energía” a estas fuentes propuestas? Pruebe su medida propuesta de “calidad de energía” aplicándola a la fuente térmica oceánica, donde la temperatura a 30 m debajo de la superficie es quizá  $5 \text{ °C}$  menor que en la superficie. Aplíquela también a la fuente de agua geotérmica, donde la temperatura a 2 a 3 km debajo de la superficie es quizá  $150 \text{ °C}$  más alta que en la superficie.