

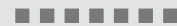
ENERGÍA, TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS GENERAL DE ENERGÍA

Se perciba o no, la energía es parte importante en la mayoría de los aspectos cotidianos; por ejemplo, la calidad de vida y su sostenibilidad dependen de su disponibilidad. De ahí que sea importante tener una buena comprensión de las fuentes energéticas, la conversión de la energía de una forma a otra y las ramificaciones de estas conversiones.

Algunas de las numerosas formas de la energía son: térmica, mecánica, eléctrica, química y nuclear, incluso la masa puede ser considerada una forma de energía. Ésta se puede transferir hacia o desde un sistema cerrado (una masa fija) en dos formas distintas: *calor* y *trabajo*. Para volúmenes de control, la energía se puede transferir por flujo de masa. Una transferencia de energía hacia o desde un sistema cerrado es *calor* si la provoca una diferencia de temperatura. De lo contrario es *trabajo*, y lo origina una fuerza que actúa a través de una distancia.

Este capítulo inicia con un análisis de varias formas de energía y transferencia de energía mediante calor. Luego, se presentan varias formas de trabajo y se analiza la transferencia de energía mediante trabajo. Se continúa con la obtención de una expresión general intuitiva para la *primera ley de la termodinámica*, conocida también como el *principio de conservación de la energía*, uno de los principios fundamentales en la naturaleza, para después demostrar su uso. Por último, se analizan las eficiencias de algunos procesos comunes de conversión de energía y se examina el impacto de la conversión en el ambiente. Los tratamientos detallados de la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados y volúmenes de control aparecen en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

Se debe tener en cuenta que las leyes físicas o las leyes de la naturaleza, como la primera ley de la termodinámica, son enunciados aceptados universalmente y basados en fenómenos observados. Son conclusiones derivadas de numerosos experimentos y observaciones científicos a lo largo del tiempo. Una ley física dicta que siempre ocurre un fenómeno particular cuando se presentan condiciones específicas. Todo en el universo las obedece sin excepciones, y no puede haber violaciones. Como tales, las leyes físicas sirven como poderosas herramientas de predicción, que permiten a los científicos anticipar cómo sucederán las cosas en el universo antes de que sucedan. No han cambiado desde que se descubrieron por primera vez, y nada en la naturaleza parece afectarlas.



OBJETIVOS

En el capítulo 2, los objetivos son:

- Presentar el concepto de energía y definir sus distintas formas.
- Analizar la naturaleza de la energía interna.
- Definir el concepto de calor y la terminología relacionada con la transferencia de energía causada por calor.
- Definir el concepto de trabajo, incluidos el trabajo eléctrico y varias formas de trabajo mecánico.
- Introducir la primera ley de la termodinámica, balances de energía y mecanismos de transferencia de energía hacia o desde un sistema.
- Determinar que un fluido que pasa por una superficie de control de un volumen de control lleva energía a través de dicha superficie, además de cualquier transferencia de energía ya sea en forma de calor o trabajo, o ambos a través de la superficie de control.
- Definir las eficiencias de conversión de energía.
- Analizar las implicaciones de la conversión de energía en el ambiente.



FIGURA 2-1

Un refrigerador en funcionamiento con su puerta abierta dentro de una habitación perfectamente sellada y aislada.

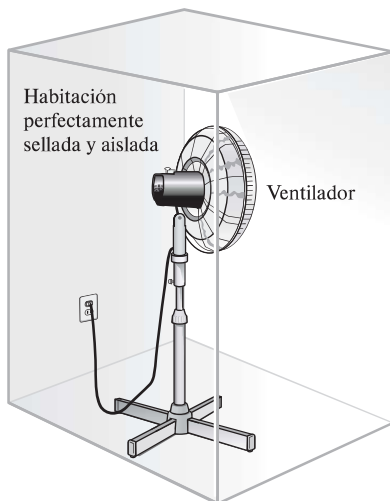


FIGURA 2-2

Un ventilador en funcionamiento en una habitación bien sellada y aislada hará que aumente la temperatura del aire que se halla en la habitación.

2-1 ■ INTRODUCCIÓN

El principio de conservación de la energía expresado por la primera ley de la termodinámica es un concepto con el que ya se ha trabajado en bachillerato, y siempre se hace hincapié en que durante un proceso, la energía no se crea ni se destruye, sólo cambia de una forma a otra. Esto parece bastante simple, pero sería necesario verificar en qué medida se comprende en realidad este principio.

Imagine una habitación con puertas y ventanas cerradas herméticamente y con paredes aisladas de modo que la pérdida o ganancia de calor a través de ellas es insignificante. En el centro de la habitación se coloca un refrigerador conectado a un contacto y con la puerta abierta (Fig. 2-1). Incluso se podría usar un pequeño ventilador que haga circular el aire para mantener la temperatura uniforme. Ahora bien, ¿qué cree que sucederá con la temperatura promedio del aire? ¿Aumentará o disminuirá? ¿Permanecerá constante?

Probablemente el primer pensamiento que se tenga sea que la temperatura media del aire en la habitación disminuirá a medida que el aire templado se combine con el frío que produce el refrigerador. Es posible que algunos deseen poner atención en el calor que genera el motor del refrigerador, y podrían argumentar que la temperatura media del aire aumentará si este efecto de calentamiento es mayor que el efecto de enfriamiento. Pero se sentirán confundidos si se afirma que el motor está hecho de materiales superconductores y, por lo tanto, que es muy difícil que el motor genere calor.

La discusión podría continuar sin final si no se recuerda el principio de conservación de la energía: si se toma toda la habitación, incluidos el aire y el refrigerador, como el sistema (el cual sería un sistema cerrado adiabático puesto que la habitación está bien cerrada y aislada), el único intercambio de energía sería el de energía eléctrica, que cruza las fronteras del sistema y entra en la habitación. La conservación de la energía requiere que la energía contenida en la habitación aumente en la misma cantidad que la de la energía eléctrica que entra al refrigerador, la cual se puede conocer mediante un contador eléctrico ordinario. El refrigerador o su motor no almacenan esta energía; por lo tanto, debe hallarse en el aire de la habitación y se manifestará como un aumento en la temperatura de éste, incremento que se calcula con base en el principio de la conservación de la energía, considerando las propiedades del aire y la cantidad de energía eléctrica consumida. ¿Qué cree que sucedería si se tuviera una unidad de aire acondicionado en el centro de la habitación en lugar de un refrigerador? ¿Qué pasa si se trata de un ventilador (Fig. 2-2)?

Observe que mientras el refrigerador trabaja dentro de la habitación, la energía se conserva, ya que la energía eléctrica se convierte en una cantidad equivalente de energía térmica almacenada en el aire de la habitación. Si ya es un hecho que la energía se conserva, entonces ¿qué sentido tiene hablar tanto de la conservación de la energía y las medidas que deben tomarse para conservarla? En realidad, lo que se entiende por "conservación de energía" es la conservación de la *calidad* de la energía, no la cantidad. La electricidad, que es una de las energías de más alta calidad, por ejemplo, siempre se puede convertir en una cantidad igual de energía térmica (conocida también como *calor*). Pero sólo una pequeña fracción de la energía térmica, que es la de menor calidad, se puede convertir de nuevo en electricidad, como se explica en el capítulo 6. Piense en las cosas que puede hacer con la energía eléctrica consumida por el refrigerador, así como con el aire de la habitación que ahora está a mayor temperatura.

Ahora bien, si se pide nombrar las transformaciones de energía relacionadas con la operación del refrigerador, también podrían surgir dificultades para res-

ponder porque todo lo que se observa es la energía eléctrica que entra al refrigerador y el calor de éste disipado en el aire de la habitación. Es evidente que es necesario estudiar primero las distintas formas de energía, lo cual se hará a continuación, y después los mecanismos de transferencia de energía.

2-2 ■ FORMAS DE ENERGÍA

La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear (Fig. 2-3), cuya suma conforma la **energía total** E de un sistema, la cual se denota por *unidad de masa* mediante e y se expresa como

$$e = \frac{E}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-1)$$

La termodinámica no proporciona información acerca del valor absoluto de la energía total, sólo trata con el *cambio* de ésta, que es lo importante en los problemas de ingeniería. Así, a la energía total de un sistema se le puede asignar un valor de cero ($E = 0$) en algún punto de referencia conveniente. El cambio de energía total de un sistema es independiente del punto de referencia seleccionado. La disminución en la energía potencial de una roca que cae, por ejemplo, depende sólo de la diferencia de alturas y no del nivel de referencia seleccionado.

En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar dos grupos para las diversas formas de energía que conforman la energía total de un sistema: *macroscópicas* y *microscópicas*. Las formas **macroscópicas** de energía son las que posee un sistema como un todo en relación con cierto marco de referencia exterior, como las energías cinética y potencial (Fig. 2-4). Las formas **microscópicas** de energía son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de la actividad molecular, y son independientes de los marcos de referencia externos. La suma de todas las formas microscópicas de energía se denomina **energía interna** de un sistema y se denota mediante U .

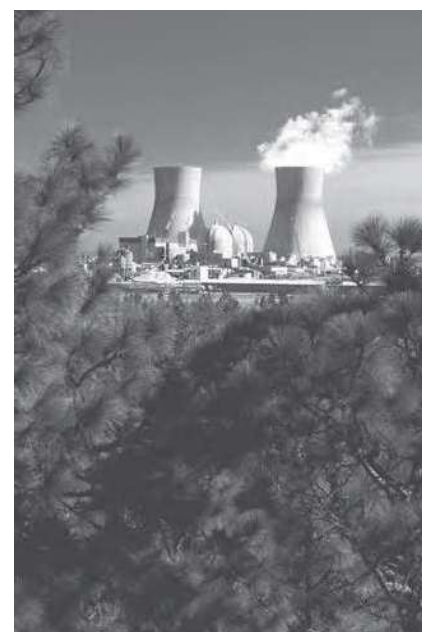
En 1807 Thomas Young acuñó el término *energía* y en 1852 lord Kelvin propuso su uso en termodinámica. El concepto *energía interna* y su símbolo U aparecieron por primera vez en los trabajos de Rudolph Clausius y William Rankine, en la segunda mitad del siglo XIX, y con el tiempo sustituyó a los términos *trabajo interior*, *trabajo interno* y *energía intrínseca* empleados habitualmente en esa época.

La energía macroscópica de un sistema se relaciona con el movimiento y la influencia de algunos factores externos como la gravedad, el magnetismo, la electricidad y la tensión superficial. La energía que posee un sistema como resultado de su movimiento en relación con cierto marco de referencia se llama **energía cinética** (EC). Cuando todas las partes de un sistema se mueven con la misma velocidad, la energía cinética se expresa como

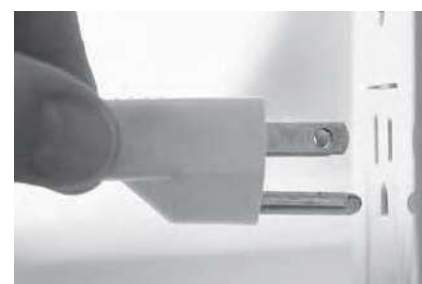
$$EC = m \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ}) \quad (2-2)$$

o bien, por unidad de masa,

$$ec = \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-3)$$



a)



b)

FIGURA 2-3

Existen al menos seis diferentes formas de energía implicadas en llevar la energía de una planta nuclear a su hogar: nuclear, térmica, mecánica, cinética, magnética y eléctrica.

a) © Gary Gladstone/Getty Images RF
b) © Tetra Images/Getty Images RF

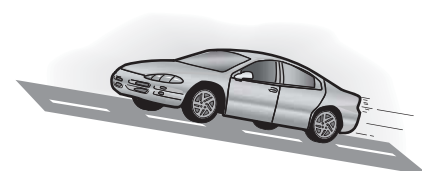


FIGURA 2-4

La energía macroscópica de un objeto cambia con la velocidad y la altura.

donde V denota la velocidad del sistema con respecto a algún marco de referencia fijo. La energía cinética de un cuerpo sólido que gira se determina mediante $\frac{1}{2}I\omega^2$, donde I es el momento de inercia del cuerpo y ω es la velocidad angular.

La energía que posee un sistema como resultado de su incremento de altura en un campo gravitacional se llama **energía potencial (EP)** y se expresa como

$$EP = mgz \quad (\text{kJ}) \quad (2-4)$$

o, por unidad de masa,

$$ep = gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-5)$$

donde g es la aceleración gravitacional y z es la altura del centro de gravedad de un sistema con respecto a algún nivel de referencia elegido arbitrariamente.

Los efectos magnético, eléctrico y de tensión superficial son significativos sólo en casos especiales y en general se ignoran. En ausencia de esta clase de efectos, la energía total de un sistema consta sólo de las energías cinética, potencial e interna, y se expresa como

$$E = U + EC + EP = U + m\frac{V^2}{2} + mgz \quad (\text{kJ}) \quad (2-6)$$

o bien, por unidad de masa,

$$e = u + ec + ep = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-7)$$

La mayor parte de los sistemas cerrados permanecen estacionarios durante un proceso y, por lo tanto, no experimentan cambios en sus energías cinética y potencial. Los sistemas cerrados cuya velocidad y altura del centro de gravedad permanecen constantes durante un proceso generalmente se denominan **sistemas estacionarios**. El cambio en la energía total ΔE de un sistema fijo es idéntico al cambio en su energía interna ΔU . En este libro se supone que un sistema cerrado será estacionario a menos que se especifique lo contrario.

Los volúmenes de control en general están relacionados con el flujo de un fluido durante largos periodos, y es conveniente expresar en forma de tasa el flujo de energía asociado al flujo de un fluido. Esto se consigue al incorporar la **tasa de flujo masa** \dot{m} , que es la cantidad de masa que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo; y se relaciona con la **tasa de flujo volumétrico** \dot{V} , definido como el volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, mediante

$$\text{Tasa de flujo de masa:} \quad \dot{m} = \rho\dot{V} = \rho A_t V_{\text{prom}} \quad (\text{kg/s}) \quad (2-8)$$

que es análoga a $m = \rho\dot{V}$, donde ρ es la densidad del fluido, A_t el área de sección transversal de flujo y V_{prom} es la velocidad media del flujo normal a A_t . En todo el libro, el punto sobre el símbolo se usa para indicar *tasa de cambio respecto al tiempo*. Entonces, el flujo de energía asociado con un fluido que fluye a una tasa de \dot{m} es (Fig. 2-5)

$$\text{Tasa de flujo de energía:} \quad \dot{E} = \dot{m}e \quad (\text{kJ/s o kW}) \quad (2-9)$$

que es análoga a $E = me$.

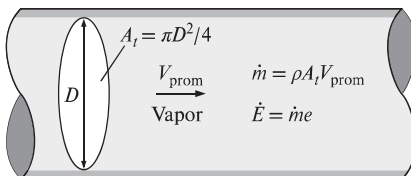


FIGURA 2-5

Tasas de flujo de masa y energía asociados a un flujo de vapor en una tubería de diámetro interno D con una velocidad promedio de V_{prom} .

Algunas consideraciones físicas de la energía interna

La energía interna se define como la suma de todas las formas *microscópicas* de energía de un sistema. Se relaciona con la *estructura molecular* y el grado de *actividad molecular* y se puede considerar como la suma de las energías *cinética* y *potencial* de las moléculas.

Para comprender mejor la energía interna, los sistemas se examinan a nivel molecular. Las moléculas de gas se mueven en el espacio con cierta velocidad; por lo tanto, poseen algo de energía cinética. Esto se conoce como *energía de traslación*. Los átomos de las moléculas poliatómicas rotan respecto a un eje y la energía relacionada con esta rotación es la *energía cinética rotacional*. Los átomos de este tipo de moléculas podrían vibrar respecto a su centro de masa común, entonces la energía de este movimiento de “vaivén” sería la *energía cinética vibratoria*. Para los gases, la energía cinética se debe sobre todo a los movimientos de traslación y rotación, en los que el movimiento vibratorio se vuelve significativo a altas temperaturas. Los electrones en un átomo giran en torno al núcleo y, por lo tanto, poseen *energía cinética rotacional*. Los electrones de órbitas exteriores tienen energías cinéticas más grandes. Como estas partículas también giran en torno a sus ejes, la energía relacionada con este movimiento es la *energía de giro (espín)*. Las otras partículas que están ubicadas en el núcleo de un átomo también poseen energía de giro. La porción de la energía interna de un sistema relacionada con la energía cinética de las moléculas se llama **energía sensible** (Fig. 2-6). La velocidad promedio y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura del gas, por lo que a temperaturas más elevadas las moléculas poseen energías cinéticas superiores y, como consecuencia, el sistema tiene una energía interna más alta.

La energía interna también se relaciona con diversas *fuerzas de enlace* entre las moléculas de una sustancia, entre los átomos dentro de una molécula y entre las partículas al interior de un átomo y su núcleo. Las fuerzas que unen a las *moléculas* entre sí son, como se esperaría, más intensas en los sólidos y más débiles en los gases. Si se agrega suficiente energía a las moléculas de un sólido o de un líquido, éstas vencen las fuerzas moleculares y se separan, de modo que la sustancia se convierte en un gas; éste es un proceso de cambio de fase. Debido a la energía agregada, un sistema en la fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que el de la fase sólida o líquida. La energía interna relacionada con la fase de un sistema se llama **energía latente**. El proceso de cambio de fase puede ocurrir sin que se modifique la composición química de un sistema. La mayor parte de los problemas reales caen dentro de esta categoría, por lo que no es necesario prestar atención a las fuerzas de enlace de los átomos en una molécula.

Un átomo en su núcleo tiene neutrones y protones con carga positiva enlazados entre sí mediante intensas fuerzas, además de electrones cargados negativamente orbitando a su alrededor. La energía interna relacionada con los enlaces atómicos en una molécula se llama **energía química**. Durante una reacción química, por ejemplo un proceso de combustión, algunos enlaces químicos se destruyen y otros se forman, lo que da como resultado que la energía interna experimente un cambio. Las fuerzas nucleares son mucho mayores que las que unen a los electrones con el núcleo. Esta enorme cantidad de energía relacionada con los fuertes enlaces dentro del núcleo del átomo se llama **energía nuclear** (Fig. 2-7). Es evidente que no es necesario ocuparse de la energía nuclear en termodinámica a menos, desde luego, que se trate de una reacción de fusión o de fisión. Una reacción química tiene que ver con cambios en la estructura de los

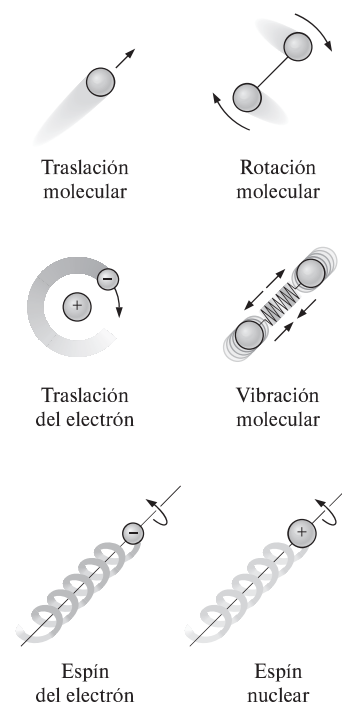


FIGURA 2-6

Diversas formas de energías microscópicas constituyen la *energía sensible*.

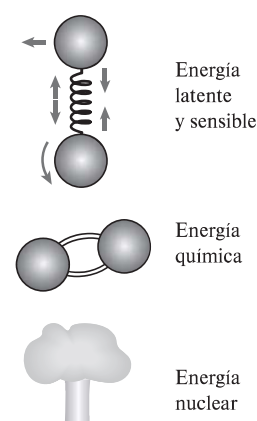


Figura 2-7

La energía interna de un sistema es la suma de todas las formas de energías microscópicas.

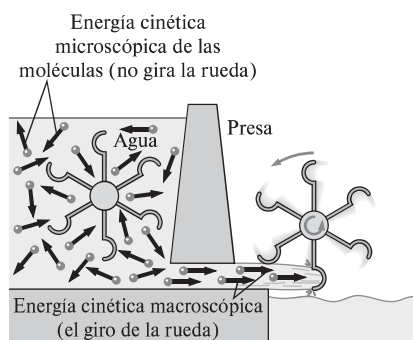


FIGURA 2-8

La energía cinética *macroscópica* es una forma organizada de energía y es mucho más útil que las energías cinéticas *microscópicas* desorganizadas de las moléculas.

electrones de los átomos, pero en una reacción nuclear los cambios ocurren en el núcleo; por lo tanto, un átomo conserva su identidad durante una reacción química pero la pierde durante una nuclear. Los átomos pueden poseer también *energías de momento dipolar eléctrico y magnético* cuando se someten a campos magnéticos y eléctricos externos debidos al giro de los dipolos magnéticos resultantes de pequeñas corrientes eléctricas relacionadas con los electrones que orbitan.

Las formas de energía anteriormente explicadas, que constituyen la energía total de un sistema, pueden estar *contenidas o almacenadas* en éste, así que es posible considerarlas como formas *estáticas* de energía. Las formas de energía no almacenadas en un sistema se consideran formas *dinámicas* de energía, o *interacciones de energía*, posibles de reconocer cuando cruzan las fronteras del sistema y representan la energía que éste gana o pierde durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de energía relacionadas con un sistema cerrado son la **transferencia de calor** y el **trabajo**. Una interacción de energía corresponde a una transferencia de calor si su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura; de lo contrario es trabajo, como se explica en la siguiente sección. Un volumen de control también intercambia energía vía transferencia de masa, puesto que cada vez que ésta se transfiere hacia un sistema o afuera del mismo el contenido de energía de la masa también se transfiere.

En la vida diaria es común llamarle *calor* a las formas sensibles y latentes de energía interna, y se habla acerca del contenido calorífico de los cuerpos. Sin embargo, en termodinámica normalmente se hace referencia a esas formas de energía como **energía térmica** a fin de evitar confusiones con la *transferencia de calor*.

Se debe hacer una distinción entre la energía cinética macroscópica de un objeto como un todo y las energías cinéticas microscópicas de sus moléculas, las cuales constituyen la energía interna del objeto (Fig. 2-8). La energía cinética de un objeto es una forma *organizada* de energía relacionada con el movimiento ordenado de las moléculas en una dirección con trayectoria recta o alrededor de un eje. En cambio, las energías cinéticas de las moléculas son completamente *aleatorias* y muy *desorganizadas*. Como se verá en capítulos posteriores, la energía organizada es mucho más valiosa que la desorganizada y un área de aplicación importante de la termodinámica es la conversión de la energía desorganizada (calor) en energía organizada (trabajo). También se verá que es posible convertir la totalidad de la energía organizada en desorganizada, pero sólo es posible convertir a organizada una fracción de esta última, mediante dispositivos especiales llamados *máquinas térmicas* (por ejemplo, los motores de coches y las centrales eléctricas). Se puede dar una explicación similar para la energía potencial macroscópica de un objeto como un todo y para energías potenciales microscópicas de las moléculas.

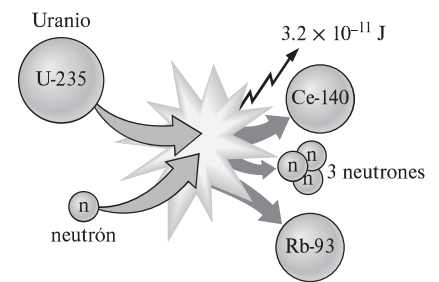
Más sobre energía nuclear

La reacción de fisión más conocida tiene que ver con la división del átomo de uranio (el isótopo U-235) en otros elementos y se usa habitualmente para generar electricidad en las centrales de energía nuclear (en 2016 había 450 reactores que generaban 392 000 MW), para impulsar submarinos, portaaviones e incluso naves espaciales, así como en la producción de bombas nucleares. El porcentaje de electricidad que se produce mediante energía nuclear es de 76 por ciento en Francia, 19 por ciento en Rusia y el Reino Unido, 14 por ciento en Alemania y 20 por ciento en Estados Unidos. Enrico Fermi logró en 1942 la primera reacción nuclear en cadena y los primeros reactores nucleares a gran escala se construyeron en 1944 con la finalidad de producir materiales para armamentos nucleares. Cuando un átomo de uranio-235 absorbe un neutrón y

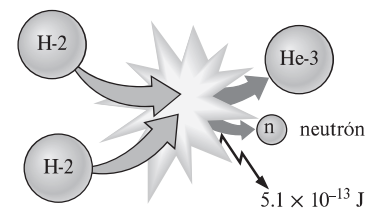
se divide durante un proceso de fisión, produce un átomo de cesio-140, un átomo de rubidio-93, tres neutrones y 3.2×10^{-11} J de energía. En términos prácticos, la fisión completa de 1 kg de uranio-235 libera 8.314×10^{10} kJ de calor, lo que equivale a una cantidad superior al calor desprendido por quemar 3700 toneladas de carbón. Por lo tanto, con una misma cantidad de combustible, una reacción de fisión nuclear genera varios millones más de energía que una reacción química. Sin embargo, aún es un problema desechar los residuos del combustible nuclear en un lugar seguro.

La energía nuclear por fusión se libera al combinar dos núcleos pequeños en uno más grande. La enorme cantidad de energía que irradian el Sol y las otras estrellas se origina a partir de procesos de fusión en los que dos átomos de hidrógeno se combinan para formar un solo átomo de helio. Cuando dos núcleos de hidrógeno pesado (deuterio) se combinan durante un proceso de fusión, producen un átomo de helio-3, un neutrón libre y 5.1×10^{-13} J de energía (Fig. 2-9).

En la práctica, las reacciones de fusión son mucho más difíciles de lograr debido a la fuerte repulsión entre los núcleos con carga positiva, llamada *repulsión de Coulomb*. Para vencer esta fuerza repulsiva y conseguir que se fusionen los dos núcleos, el nivel de energía de éstos debe elevarse calentándolos hasta cerca de los 100 millones de °C. Sin embargo, temperaturas tan altas sólo se encuentran en las estrellas o en las explosiones de bombas atómicas (bomba-A). De hecho, la reacción de fusión fuera de control en una bomba de hidrógeno (bomba-H) se inicia por la explosión de una bomba atómica pequeña. La reacción de fusión no controlada se logró a principios de la década de 1950, pero desde entonces, para lograr la fusión controlada, han fallado todos los esfuerzos para generar energía realizados mediante rayos láser masivos, potentes campos magnéticos y corrientes eléctricas.



a) Fisión de uranio



b) Fusión de hidrógeno

FIGURA 2-9

Fisión de uranio y fusión de hidrógeno en las reacciones nucleares, con su consecuente liberación de energía nuclear.

EJEMPLO 2-1 Automóvil accionado con combustible nuclear

En promedio, un automóvil consume alrededor de 5 L de gasolina por día y la capacidad de su depósito de combustible es de 50 L. Por lo tanto, es necesario reabastecer un automóvil una vez cada 10 días. Asimismo, la densidad de la gasolina varía entre 0.68 y 0.78 kg/L, y su poder calorífico inferior es aproximadamente de 44 000 kJ/kg (es decir, cuando se quema por completo 1 kg de gasolina se liberan 44 000 kJ de calor). Suponga que están resueltos todos los problemas relacionados con la radiactividad y la eliminación de los desechos producidos por los combustibles nucleares, y que un automóvil nuevo utilizará como combustible U-235. Si el vehículo viene equipado con 0.1 kg de U-235, determine si este automóvil requerirá ser reabastecido en condiciones de manejo promedio (Fig. 2-10).

SOLUCIÓN Se tiene un vehículo que utiliza combustible nuclear y es necesario determinar si alguna vez el vehículo requerirá ser reabastecido de combustible.

Suposiciones 1 La gasolina es una sustancia no compresible con una densidad promedio de 0.75 kg/L. 2 El combustible nuclear se convierte por completo en energía térmica.

Análisis La masa de gasolina que el automóvil usa por día es

$$m_{\text{gasolina}} = (\rho V)_{\text{gasolina}} = (0.75 \text{ kg/L}) (5 \text{ L/día}) = 3.75 \text{ kg/día}$$

Observe que el poder calorífico de la gasolina es de 44 000 kJ/kg, por lo que la energía proporcionada por día al automóvil es de

$$\begin{aligned} E &= (m_{\text{gasolina}})(\text{Poder calorífico}) \\ &= (3.75 \text{ kg/día}) (44\,000 \text{ kJ/kg}) = 165\,000 \text{ kJ/día} \end{aligned}$$



FIGURA 2-10

Esquema para el ejemplo 2-1.

La fisión completa de 0.1 kg de uranio-235 libera

$$(8.314 \times 10^{10} \text{ kJ/kg})(0.1 \text{ kg}) = 8.314 \times 10^9 \text{ kJ}$$

de calor, suficiente para satisfacer la demanda de energía del automóvil para

$$\text{Número de días} = \frac{\text{Contenido de energía del combustible}}{\text{Uso de energía diario}} = \frac{8.314 \times 10^9 \text{ kJ}}{165\,000 \text{ kJ/día}} = 50\,390 \text{ días}$$

lo que equivale a 138 años. Si se considera que un automóvil no dura más de 100 años, este vehículo nunca necesitará ser reabastecido. Parece ser que para toda su vida útil, el automóvil no requiere más combustible nuclear que el equivalente al tamaño de una cereza.

Comentario Este problema no es del todo real puesto que la masa crítica necesaria no se logra con esta pequeña cantidad de combustible. Además, no se puede convertir todo el uranio en la fisión, una vez más debido a los problemas de masa crítica después de la conversión parcial.

Energía mecánica



FIGURA 2-11

La energía mecánica es un concepto útil para flujos que no involucran una importante transferencia de calor o conversión de energía, como es el caso del flujo de gasolina desde un depósito subterráneo hacia un auto.

© altrendo images/Getty Images RF

Muchos sistemas de ingeniería se diseñan para transportar un fluido de un lugar a otro a determinado flujo volumétrico y una velocidad y con diferencia de elevación, mientras el sistema genera trabajo mecánico en una turbina o consume trabajo mecánico en una bomba o ventilador (Fig. 2-11). Estos sistemas no tienen que ver con la conversión de energía nuclear, química o térmica a energía mecánica; tampoco hay en ellos transferencia de calor en cantidad importante y operan en esencia a temperatura constante. Esta clase de sistemas se analizan de modo conveniente al considerar sólo las *formas mecánicas de la energía* y los efectos que la fricción causa, como la pérdida de energía mecánica (es decir, que la energía se convierta en energía térmica la cual por lo general no tiene utilidad).

La **energía mecánica** se define como *la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal*. Las formas más familiares de energía mecánica son la cinética y la potencial. Sin embargo, la energía térmica no es energía mecánica puesto que no se puede convertir en trabajo de forma completa y directa (segunda ley de la termodinámica).

Una bomba transfiere energía mecánica a un fluido al elevar la presión de éste, y una turbina extrae energía mecánica de un fluido al disminuir su presión; de ahí que la presión de un fluido en movimiento se relacione también con su energía mecánica. De hecho, la unidad de presión Pa es equivalente a $\text{Pa} = \text{N/m}^2 = \text{N} \cdot \text{m/m}^3 = \text{J/m}^3$, que es la energía por unidad de volumen, y el producto Pv o su equivalente P/ρ con J/kg, que corresponde a la energía por unidad de masa. Es importante observar que la presión por sí misma no es una forma de energía, pero una fuerza de presión que actúa sobre un fluido a lo largo de una distancia produce trabajo, llamado *trabajo de flujo*, en una cantidad de P/ρ por unidad de masa. El trabajo de flujo se expresa en términos de las propiedades del fluido y es conveniente considerarlo como parte de la energía de un fluido en movimiento y llamarlo *energía de flujo*. Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido en movimiento por unidad de masa se puede expresar como

$$e_{\text{mecánica}} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2-10)$$

donde P/ρ es la *energía de flujo*, $V^2/2$ es la *energía cinética* y gz es la *energía potencial* del fluido, todas por unidad de masa. También es posible expresarla por unidad de tiempo

$$\dot{E}_{\text{mecánica}} = \dot{m}e_{\text{mecánica}} = \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (2-11)$$

donde \dot{m} es la tasa de flujo de masa del fluido. Entonces el cambio de la energía mecánica de un fluido durante flujo incompresible ($\rho = \text{constante}$) es

$$\Delta e_{\text{mecánica}} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-12)$$

y

$$\Delta \dot{E}_{\text{mecánica}} = \dot{m} \Delta e_{\text{mecánica}} = \dot{m} \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (\text{kW}) \quad (2-13)$$

Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido no cambia durante el flujo si su presión, densidad, velocidad y altura permanecen constantes. En ausencia de pérdidas irreversibles, el cambio de energía mecánica representa el trabajo mecánico suministrado al fluido (si $\Delta e_{\text{mecánica}} < 0$) o extraído del fluido (si $\Delta e_{\text{mecánica}} > 0$). La potencia máxima (ideal) generada por una turbina, por ejemplo, es $\dot{W}_{\text{máx}} = \dot{m} \Delta e_{\text{mecánica}}$ como se muestra en la figura 2-12.

EJEMPLO 2-2 Energía eólica

Un sitio evaluado para construir un parque eólico tiene vientos permanentes a una velocidad de 8.5 m/s (Fig. 2-13). Determine la energía eólica *a*) por unidad de masa, *b*) para una masa de 10 kg y *c*) para un flujo de 1 154 kg/s de aire.

SOLUCIÓN Se tiene un sitio con una velocidad de viento especificada, donde se determinará la energía eólica por unidad de masa, para una masa especificada y un determinado flujo másico de aire.

Suposiciones El viento fluye en forma permanente a la velocidad especificada.

Análisis La única forma aprovechable de la energía del aire atmosférico es la energía cinética, la cual se dirige a una turbina eólica (aerogenerador).

a) La energía eólica por masa unitaria de aire es

$$e = e_c = \frac{V^2}{2} = \frac{(8.5 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ J/kg}}{1 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 36.1 \text{ J/kg}$$

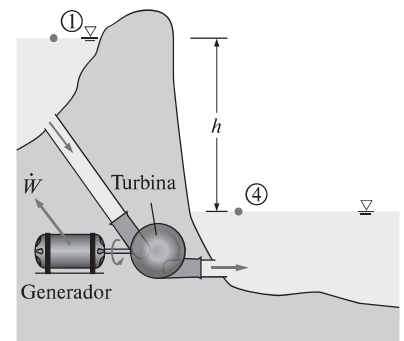
b) La energía eólica para una masa de aire de 10 kg es

$$E = me = (10 \text{ kg})(36.1 \text{ J/kg}) = 361 \text{ J}$$

c) La energía eólica para una tasa de flujo de masa de 1 154 kg/s es

$$\dot{E} = \dot{m}e = (1 \ 154 \text{ kg/s})(36.1 \text{ J/kg}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \ 000 \text{ J/s}} \right) = 41.7 \text{ kW}$$

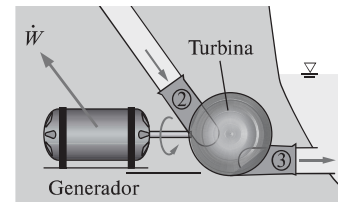
Comentario Se puede demostrar que la tasa de flujo de masa corresponde a una sección del flujo con un diámetro de 12 m cuando la densidad del aire es de 1.2 kg/m³. Por lo tanto, una turbina eólica con un diámetro de 12 m tiene un potencial de generación de energía de 41.7 kW. Las turbinas eólicas reales convierten en energía eléctrica cerca de un tercio de este potencial.



$$\dot{W}_{\text{máx}} = \dot{m} \Delta e_{\text{mecánica}} = \dot{m}g(z_1 - z_4) = \dot{m}gh$$

entonces $P_1 \approx P_4 = P_{\text{atm}}$ y $V_1 = V_4 \approx 0$

a)



$$\dot{W}_{\text{máx}} = \dot{m} \Delta e_{\text{mecánica}} = \dot{m} \frac{(P_2 - P_3)}{\rho} = \dot{m} \frac{\Delta P}{\rho}$$

entonces $V_1 \approx V_3$ y $z_2 = z_3$

b)

FIGURA 2-12

La energía mecánica se ilustra mediante una turbina hidráulica ideal acoplada con un generador ideal. En ausencia de pérdidas irreversibles, la potencia máxima producida es proporcional a *a*) el cambio en la elevación de la superficie del agua entre los reservorios de aguas arriba y aguas abajo, o *b*) (vista en detalle) la caída de presión del agua desde el punto inmediato aguas arriba de la turbina hasta el punto inmediatamente posterior de la turbina.



FIGURA 2-13

Un lugar para un campo eólico, como se analiza en el ejemplo 2-2.

© Image Source/Getty Images RF

2-3 ■ TRANSFERENCIA DE ENERGÍA POR CALOR

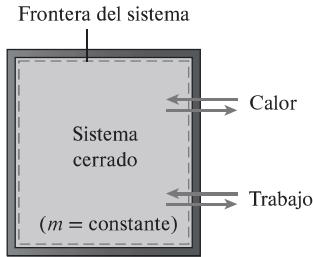


FIGURA 2-14

La energía puede cruzar las fronteras de un sistema cerrado en la forma de calor y trabajo.



FIGURA 2-15

La diferencia de temperatura es la fuerza motriz para la transferencia de calor. Mientras más grande es la diferencia de temperatura, mayor es la tasa de transferencia de calor.

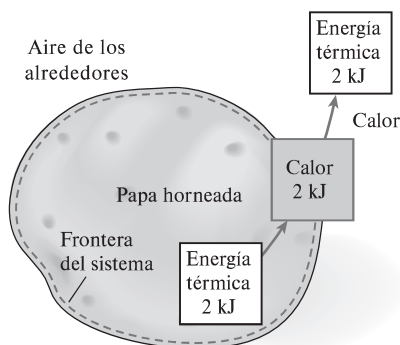


FIGURA 2-16

La energía se reconoce como transferencia de calor sólo cuando cruza las fronteras del sistema.

La energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en dos formas distintas: *calor* y *trabajo* (Fig. 2-14). Es importante distinguir entre estas dos formas de energía, por lo que primero se analizarán con el propósito de conformar una base sólida para el desarrollo de las leyes de la termodinámica.

La experiencia nos dice que si se deja sobre la mesa una lata fría de bebida carbonatada, en algún momento alcanzará la temperatura ambiente, mientras que una papa horneada caliente se enfriará. Cuando un cuerpo se coloca en un medio que está a una temperatura diferente, la transferencia de energía tiene lugar entre el cuerpo y el medio hasta que se establece el equilibrio térmico, es decir, cuando ambos alcanzan la misma temperatura. La dirección de la transferencia de energía es siempre del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura. Una vez establecida la igualdad de temperatura, termina la transferencia de energía. En este proceso se afirma que la energía se transfiere en forma de calor.

El **calor** se define como *la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura* (Fig. 2-15). Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura.

Varias frases de uso común como flujo de calor, adición de calor, rechazo de calor, absorción de calor, eliminación de calor, ganancia de calor, pérdida de calor, almacenamiento de calor, generación de calor, calentamiento eléctrico, calentamiento mediante resistencias, calentamiento por fricción, calentamiento por gas, calor de reacción, liberación de calor, calor específico, calor sensible, calor latente, calor de desecho, calor corporal, calor de proceso, disipador de calor y fuente de calor, no son congruentes con el estricto significado termodinámico de *calor*, término cuyo uso se limita a la *transferencia* de energía térmica durante un proceso. Sin embargo, estas frases tan arraigadas en el vocabulario de científicos y personas comunes generalmente no producen malentendidos, ya que por lo común son interpretadas apropiadamente y no de manera literal. (Además, no existen alternativas aceptables para algunas de estas frases.) Por ejemplo, se entiende que *calor corporal* significa *el contenido de energía térmica* de un cuerpo. De igual modo, *flujo de calor* se interpreta como *la transferencia de energía térmica* no como el flujo de una sustancia similar a un líquido llamada calor. Aunque incorrecta, esta última interpretación fue la base de la teoría calórica, la cual dio origen a la frase. Asimismo, la transferencia de calor hacia un sistema se conoce como *adición de calor* mientras que *rechazo de calor* es la transferencia hacia afuera. Quizá haya una razón termodinámica para ser tan reacio en sustituir *calor* por *energía térmica* y es que el primero requiere menos tiempo y esfuerzo que el segundo para decirlo, escribirlo y entenderlo.

El calor es energía en transición y se reconoce sólo cuando cruza la frontera de un sistema. Considere otra vez la papa horneada caliente, la cual contiene energía que sólo es transferencia de calor cuando cruza la cáscara de la papa (la frontera del sistema) para llegar al aire, según se ilustra en la figura 2-16. Una vez en el exterior, el calor transferido se vuelve parte de la energía interna del exterior. Así, en termodinámica el término *calor* significa simplemente *transferencia de calor*.

Un proceso durante el cual no hay transferencia de calor se denomina **proceso adiabático** (Fig. 2-17). El término *adiabático* proviene de la palabra griega *adiabatos*, que significa *no pasar*. Hay dos maneras en que un proceso puede ser adiabático: el sistema está bien aislado de modo que sólo una cantidad insignificante de calor cruza la frontera, o bien, tanto el sistema como el exterior están a la misma temperatura y por lo tanto no hay fuerza impulsora (diferencia de temperatura) para la transferencia de calor. Hay que distinguir entre un proceso adiabático y uno isotérmico: aunque no hay transferencia de calor durante un proceso adiabático, otros medios como el trabajo pueden cambiar el contenido de energía y, en consecuencia, la temperatura de un sistema.

Como forma de energía, el calor tiene unidades de energía, la más común es el kJ (o Btu). La cantidad de calor transferida durante el proceso entre dos estados (1 y 2) se denota mediante Q_{12} o sólo Q . La transferencia de calor de un sistema *por unidad de masa* se denota como q y se determina a partir de

$$q = \frac{Q}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-14)$$

En ocasiones es deseable conocer la *tasa de transferencia de calor* (cantidad de calor transferida por unidad de tiempo) en lugar del calor total transferido durante cierto intervalo de tiempo (Fig. 2-18). La tasa de transferencia de calor se expresa con \dot{Q} , donde el punto significa la derivada con respecto al tiempo, o “por unidad de tiempo”. La tasa de transferencia de calor \dot{Q} tiene las unidades kJ/s, equivalente a kW. Cuando \dot{Q} varía con el tiempo, la cantidad de transferencia de calor durante un proceso se determina integrando \dot{Q} sobre el intervalo de tiempo del proceso:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (\text{kJ}) \quad (2-15)$$

Cuando \dot{Q} permanece constante durante un proceso, esta relación se reduce a

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (2-16)$$

donde $\Delta t = t_2 - t_1$ es el intervalo de tiempo durante el que ocurre el proceso.

Antecedentes históricos sobre el calor

El calor siempre se ha percibido como algo que produce una sensación de calidez, por lo que se podría pensar que su naturaleza fue una de las primeras cosas que la humanidad entendió. No obstante, a mediados del siglo XIX se llegó a una verdadera comprensión física sobre la naturaleza del calor, gracias al desarrollo en ese tiempo de la **teoría cinética**, la cual considera a las moléculas como diminutas esferas que se encuentran en movimiento y que por lo tanto poseen energía cinética. De esta manera, el calor se define como la energía relacionada con el movimiento aleatorio de átomos y moléculas. A pesar de que entre el siglo XVIII y principios del XIX se sugirió que el calor es la manifestación del movimiento a nivel molecular (llamado *fuerza viva*), la opinión prevaleciente sobre el calor hasta la mitad del siglo XIX se basó en la teoría calórica propuesta en 1789 por el químico francés Antoine Lavoisier (1744-1794). Esta teoría sostiene que el calor es una sustancia similar a un fluido llamada **calórico** que no tiene masa, es incoloro, inodoro e insípido y que puede pasar de un cuerpo a otro (Fig. 2-19). Cuando se añadía calórico a un cuerpo, se incrementaba su temperatura; cuando se extraía, entonces disminuía. Cuando un cuerpo

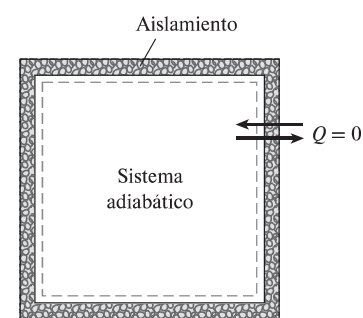


FIGURA 2-17

Durante un proceso adiabático, un sistema no intercambia calor con el exterior.

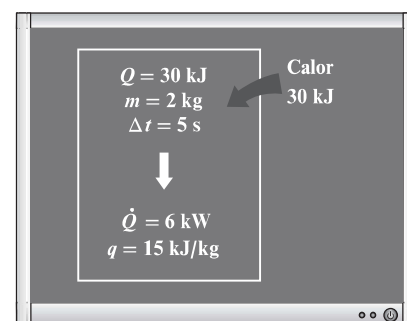


FIGURA 2-18

Relaciones entre q , Q y \dot{Q} .

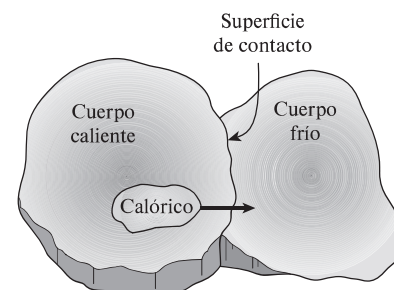


FIGURA 2-19

A principios del siglo XIX se consideraba al calor como un fluido invisible llamado *calórico* que fluía de los cuerpos más calientes a los más fríos.

ya no podía contener más calórico, de modo similar a cuando en un vaso con agua ya no es posible disolver más sal o azúcar, se decía que el cuerpo estaba saturado con calórico. Esta interpretación dio lugar a los términos *líquido saturado* y *vapor saturado* que aún se usan en la actualidad.

La teoría del calórico experimentó críticas inmediatamente después de su introducción. Sostenía que el calor es una sustancia que no podía ser creada ni destruida; sin embargo, se sabía que el calor podía ser generado de modo indefinido al frotar entre sí las manos o dos trozos de madera. En 1798, el estadounidense Benjamin Thompson (conde Rumford) (1754-1814) demostró en sus artículos que el calor se genera en forma continua por rozamiento. Muchos otros pusieron en duda la validez de la teoría del calórico, pero fueron los cuidadosos experimentos del inglés James P. Joule (1818-1889), publicados en 1843, los que finalmente convencieron a los escépticos de que el calor no era una sustancia, así que se desechó la teoría del calórico. A pesar de ser abandonada por completo a mediados del siglo XIX, esta teoría contribuyó en gran medida al desarrollo de la termodinámica y la transferencia de calor.

El calor se transfiere mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La **conducción** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas. La **convección** es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. La **radiación** es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones). Al final de este capítulo se repasan los tres mecanismos de transferencia de calor como un tema de interés especial.

2-4 ■ TRANSFERENCIA DE ENERGÍA POR TRABAJO

Al igual que el calor, el trabajo es una interacción de energía que ocurre entre un sistema y el exterior. La energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en forma de calor o trabajo; entonces, *si la energía que cruza la frontera de un sistema cerrado no es calor, debe ser trabajo*. Es fácil reconocer el calor: su fuerza impulsora es una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Por lo tanto se puede decir simplemente que una interacción de energía que se origina por algo distinto a una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. De manera más específica, *el trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia*. Un pistón ascendente, un eje giratorio y un cable eléctrico que cruzan las fronteras del sistema son situaciones que se relacionan con interacciones de trabajo.

El trabajo es también una forma de energía transferida como calor y por lo tanto tiene unidades de energía como kJ. El trabajo realizado durante un proceso entre los estados 1 y 2 se denota por W_{12} o sólo W . El trabajo *por unidad de masa* de un sistema se denota mediante w y se expresa como

$$w = \frac{W}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-17)$$

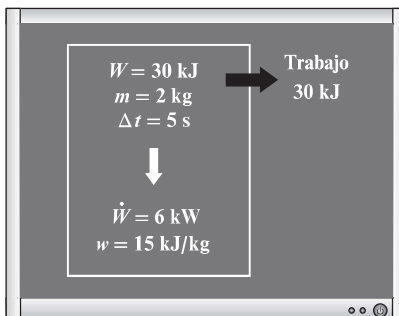


FIGURA 2-20

Relaciones entre w , W y \dot{W} .

El trabajo realizado *por unidad de tiempo* se llama **potencia** y se denota como \dot{W} (Fig. 2-20). Las unidades de potencia son kJ/s, o kW.

Calor y trabajo son *cantidades direccionales* y la descripción completa de sus interacciones requiere la especificación de la *magnitud* y la *dirección*. Una forma de hacer esto es adoptar un convenio de signo: generalmente se acepta para las interacciones de calor y trabajo un **convenio de signo formal**, tal que *la transferencia de calor hacia un sistema y el trabajo hecho por un sistema son positivos; la transferencia de calor desde un sistema y el trabajo hecho sobre un sistema son negativos*. Otra forma es usar los subíndices *entrada* y *salida* para indicar la dirección (Fig. 2-21), por ejemplo, la introducción de 5 kJ de trabajo se expresa como $W_{\text{entrada}} = 5 \text{ kJ}$, en tanto que una pérdida de calor de 3 kJ se expresa como $Q_{\text{salida}} = 3 \text{ kJ}$. Cuando se desconoce la dirección de una interacción de calor o trabajo, simplemente se *supone* una dirección (con el subíndice *entrada* o *salida*) para determinar la interacción. Un resultado positivo indica que la dirección supuesta es correcta, mientras que un resultado negativo indica que la relación de la interacción es opuesta a la dirección preestablecida: es como suponer una dirección para una fuerza desconocida al resolver un problema de estática, e invertir la dirección cuando se obtiene un resultado negativo para dicha fuerza. En este libro se utiliza el *método intuitivo*, con el que se eliminan las necesidades de adoptar un convenio de signos y de asignar cuidadosamente valores negativos a algunas interacciones.

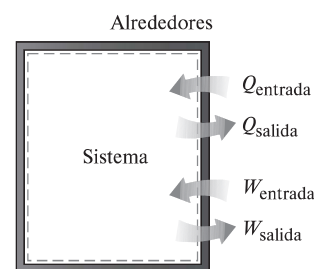


FIGURA 2-21
Especificaciones de las direcciones de calor y trabajo.

Observe que una cantidad transferida hacia o desde un sistema durante una interacción no es una propiedad puesto que la medida de dicha cantidad depende de algo más que sólo el estado del sistema. El calor y el trabajo son *mecanismos de transferencia de energía* entre un sistema y el exterior, y existen muchas similitudes entre ellos:

1. Tanto el calor como el trabajo pueden ser reconocidos en las fronteras de un sistema cuando las cruzan; es decir, son fenómenos de *frontera*.
2. Los sistemas poseen energía, pero el calor o el trabajo no.
3. Ambos se relacionan con un *proceso*, no con un estado. A diferencia de las propiedades, ni el calor ni el trabajo tienen significado en un estado.
4. Ambos son *función de la trayectoria* (es decir, sus magnitudes dependen de la trayectoria seguida durante un proceso, así como de los estados iniciales y finales).

Las **funciones de la trayectoria** son **diferenciales inexactas** que se denotan por el símbolo δ . Así, una cantidad diferencial de calor o trabajo se representa mediante δQ o δW , respectivamente, en lugar de dQ o dW . Sin embargo, las propiedades son **funciones de punto** (es decir, sólo dependen del estado y no de cómo un sistema llega a ese estado) y son **diferenciales exactas** designadas por el símbolo d . Un pequeño cambio de volumen, por ejemplo, se representa por dV , y el cambio de volumen total durante un proceso entre los estados 1 y 2 es

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V$$

Es decir, el cambio de volumen entre los procesos 1 y 2 es siempre el volumen en el estado 2 menos el volumen en el estado 1, sin importar la trayectoria seguida (Fig. 2-22). Sin embargo, el trabajo total realizado entre los procesos 1 y 2 es

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \quad (\text{no } \Delta W)$$

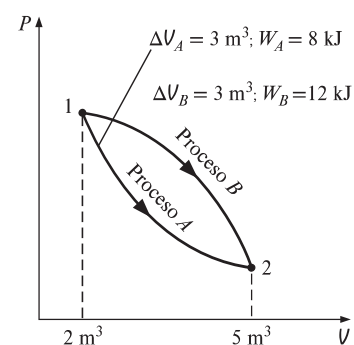


FIGURA 2-22
Las propiedades son funciones de punto; pero el calor y el trabajo son funciones de la trayectoria (sus magnitudes dependen de la trayectoria seguida).

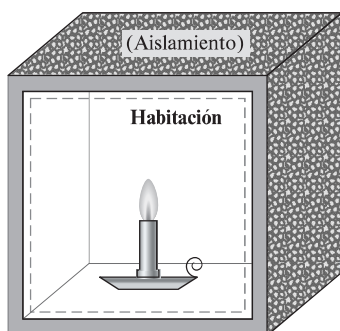


FIGURA 2-23

Esquema para el ejemplo 2-3.

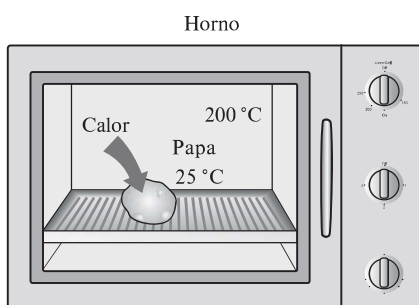


FIGURA 2-24

Esquema para el ejemplo 2-4.

Es decir, el trabajo total se obtiene siguiendo la trayectoria del proceso y sumando las cantidades diferenciales de trabajo (δW) efectuadas a lo largo del trayecto. La integral de δW no es $W_2 - W_1$ (es decir, el trabajo en el estado 2 menos el del estado 1), lo cual carecería de sentido puesto que el trabajo no es una propiedad y los sistemas no poseen trabajo en un estado.

EJEMPLO 2-3 Combustión de una vela en un espacio aislado

Una vela se consume en una habitación aislada. Considere la habitación (el aire más la vela) como el sistema y determine *a*) si hay alguna transferencia de calor durante este proceso de combustión y *b*) si hay algún cambio en la energía interna del sistema.

SOLUCIÓN Se considera la combustión de una vela en una habitación bien aislada y se determinará si hay alguna transferencia de calor y algún cambio de energía interna.

Análisis *a*) Las superficies internas de la habitación forman la frontera del sistema, según se indica mediante la línea discontinua en la figura 2-23. Como se señaló, el calor se reconoce cuando cruza los límites. Dado que la habitación está perfectamente aislada, se tiene un sistema adiabático y ninguna cantidad de calor cruza las fronteras. Por consiguiente, $Q = 0$ para este proceso. *b*) La energía interna conlleva otras formas de energía (sensible, latente, química, nuclear). Durante el proceso descrito, parte de la energía química se convierte en energía sensible. Como no hay aumento o disminución de la energía interna total del sistema, $\Delta U = 0$ para este proceso.

EJEMPLO 2-4 Calentamiento de una papa en un horno

Una papa a temperatura ambiente (25 °C) se cocina en un horno que se mantiene a 200 °C, como se ilustra en la figura 2-24. ¿Hay alguna transferencia de calor durante este proceso?

SOLUCIÓN Se hornea una papa y se determinará si hay alguna transferencia de calor durante este proceso.

Análisis El problema está mal definido puesto que no se especifica el sistema. Se supondrá que se analiza a la papa, por lo que ésta será el sistema. Así, se puede considerar que la cáscara de la papa es la frontera del sistema, a la cual atraviesa parte de la energía producida en el horno. Como la fuerza impulsora para esta transferencia de energía es una diferencia de temperatura, se trata de un proceso de transferencia de calor.

EJEMPLO 2-5 Calentamiento de un horno por transferencia de trabajo

Un horno eléctrico bien aislado aumenta su temperatura por medio de un elemento de calentamiento. Si se considera todo el horno como el sistema, incluido el elemento de calentamiento, determine si se trata de una interacción de calor o trabajo.

SOLUCIÓN Un horno eléctrico bien aislado es calentado y se determinará si esto es una interacción de trabajo o calor.

Análisis En este problema, las superficies internas del horno forman las fronteras del sistema (Fig. 2-25). Es evidente que el contenido de energía del horno se incrementa durante este proceso, según se comprueba por el aumento de temperatura. Esta transferencia de energía al horno se debe no a una diferencia de temperatura entre el horno y el aire circundante, sino a los *electrones* que cruzan la frontera del sistema y, por lo tanto, realizan trabajo. Por consiguiente, ésta es una interacción de trabajo.

EJEMPLO 2-6 Calentamiento de un horno mediante transferencia de calor

Conteste la pregunta del ejemplo 2-5 considerando que el sistema está conformado sólo por el aire contenido en el horno y sin que éste cuente con el elemento de calentamiento.

SOLUCIÓN La pregunta del ejemplo 2-5 se considerará de nuevo pero ahora el sistema sólo consta del aire dentro del horno.

Análisis La frontera del sistema incluirá la superficie externa del elemento de calentamiento sin cortarlo (Fig. 2-26); por lo tanto, ningún electrón cruza la frontera del sistema en ningún punto. En cambio, la energía generada en el interior del elemento de calentamiento se transferirá al aire de su entorno como resultado de la diferencia de temperatura entre éste y el elemento. De esta manera se tiene un proceso de transferencia de calor.

Comentario En ambos casos, la cantidad de transferencia de energía hacia el aire es la misma. En estos dos ejemplos se observa que una transferencia de energía puede corresponder a calor o trabajo, dependiendo de cómo se seleccione el sistema.

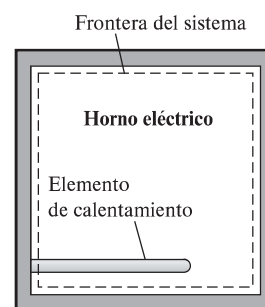


FIGURA 2-25

Esquema para el ejemplo 2-5.

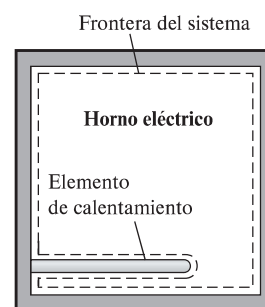


FIGURA 2-26

Esquema para el ejemplo 2-6.

Trabajo eléctrico

En el ejemplo 2-5 se señaló que los electrones que cruzan la frontera del sistema realizan trabajo eléctrico sobre éste. En un campo eléctrico, los electrones de un alambre se mueven por el efecto de fuerzas electromotrices, así que realizan trabajo. Cuando N coulombs de carga eléctrica se mueven a través de una diferencia de potencial V , el trabajo eléctrico realizado es

$$W_e = VN$$

el cual se expresa también en forma de tasa como

$$\dot{W}_e = VI \quad (\text{W}) \quad (2-18)$$

donde \dot{W}_e es la **potencia eléctrica** e I es el número de cargas eléctricas que fluyen por unidad de tiempo, es decir, la *corriente* (Fig. 2-27). En general, tanto V como I varían con el tiempo y el trabajo eléctrico realizado durante un intervalo de tiempo Δt se expresa como

$$W_e = \int_1^2 VI dt \quad (\text{kJ}) \quad (2-19)$$

Si tanto V como I permanecen constantes durante el intervalo de tiempo Δt , la ecuación se reduce a

$$W_e = VI \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (2-20)$$

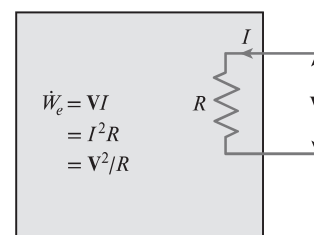


FIGURA 2-27

Potencia eléctrica en términos de resistencia R , corriente I y diferencia de potencial V .

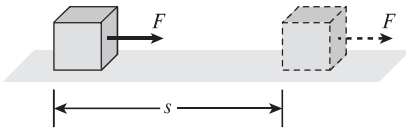


FIGURA 2-28

El trabajo hecho es proporcional a la fuerza aplicada (F) y la distancia recorrida (s).

2-5 ■ FORMAS MECÁNICAS DEL TRABAJO

Hay diversas formas de hacer trabajo, cada una relacionada de cierta manera con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia (Fig. 2-28). En la mecánica elemental, el trabajo que realiza una fuerza constante F sobre un cuerpo que se desplaza una distancia s en la dirección de la fuerza se expresa como

$$W = Fs \quad (\text{kJ}) \quad (2-21)$$

Si la fuerza F no es constante, el trabajo realizado se obtiene al sumar (es decir, integrar) las cantidades diferenciales de trabajo,

$$W = \int_1^2 F ds \quad (\text{kJ}) \quad (2-22)$$

Es obvio que para efectuar esta integración es necesario saber cómo varía la fuerza con el desplazamiento, y las ecuaciones 2-21 y 2-22 sólo proporcionan la magnitud del trabajo. El signo se determina con facilidad a partir de consideraciones físicas: el trabajo que sobre un sistema realiza una fuerza externa que actúa en la dirección del movimiento es negativo, y el trabajo que lleva a cabo un sistema contra una fuerza externa que actúa en dirección opuesta al movimiento es positivo.

Hay dos requisitos para que se presente una interacción de trabajo entre un sistema y el exterior: 1) debe haber una *fuerza* que actúe sobre los límites y 2) éstos deben *moverse*. Por lo tanto, la presencia de fuerzas en la frontera sin ningún desplazamiento de la misma no constituye una interacción de trabajo. De modo similar, el desplazamiento de la frontera sin ninguna fuerza que se oponga a este movimiento o lo impulse (como la expansión de un gas al interior de un espacio al vacío) no es una interacción de trabajo ya que no se transfiere energía.

En muchos problemas termodinámicos el trabajo mecánico es la única forma de trabajo, y se relaciona con el movimiento de la frontera de un sistema o el del propio sistema como un todo. A continuación se analizan algunas formas comunes de trabajo mecánico.

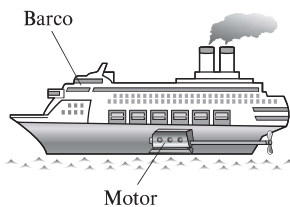


FIGURA 2-29

La transmisión de energía mediante ejes rotatorios se encuentra comúnmente en la práctica.

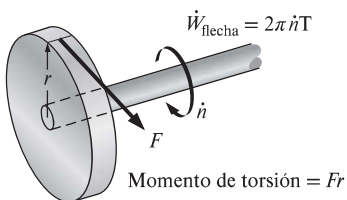


FIGURA 2-30

El trabajo de flecha es proporcional al momento de torsión aplicado y al número de revoluciones de la flecha.

Trabajo de flecha

La transmisión de energía mediante un eje rotatorio (flecha) es una práctica muy común en la ingeniería (Fig. 2-29). Con frecuencia el momento de torsión T aplicado al eje es constante, lo cual significa que la fuerza F aplicada también es constante. Para un determinado momento de torsión constante, el trabajo hecho durante n revoluciones se determina así: una fuerza F que actúa por medio de un brazo de momento r genera un momento de torsión T (Fig. 2-30)

$$T = Fr \quad \rightarrow \quad F = \frac{T}{r} \quad (2-23)$$

Esta fuerza actúa a lo largo de una distancia s , que se relaciona con el radio r mediante

$$s = (2\pi r)n \quad (2-24)$$

El trabajo de flecha se determina a partir de

$$W_{\text{flecha}} = Fs = \left(\frac{T}{r}\right)(2\pi rn) = 2\pi nT \quad (\text{kJ}) \quad (2-25)$$

La potencia transmitida mediante la flecha es el trabajo de flecha por unidad de tiempo, que se puede expresar como

$$\dot{W}_{\text{flecha}} = 2\pi \dot{n}T \quad (\text{kW}) \quad (2-26)$$

donde \dot{n} es el número de revoluciones por unidad de tiempo.

EJEMPLO 2-7 Transmisión de potencia mediante la flecha de un automóvil

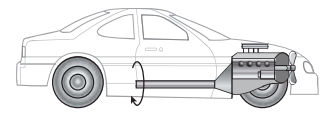
Determine la potencia transmitida por la flecha de un automóvil cuando el momento de torsión aplicado es de 200 N · m y la flecha gira a razón de 4 000 revoluciones por minuto (rpm).

SOLUCIÓN El momento de torsión y las revoluciones por minuto para un motor de automóvil son los datos. Se determinará la potencia transmitida.

Análisis En la figura 2-31 se esquematiza el automóvil. El trabajo de flecha se determina directamente a partir de

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{flecha}} &= 2\pi \dot{n}T = (2\pi) \left(4\,000 \frac{1}{\text{min}}\right) (200 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1\,000 \text{ N} \cdot \text{m}}\right) \\ &= 83.8 \text{ kW} \quad (\text{o } 112 \text{ hp}) \end{aligned}$$

Comentario La potencia que transmite la flecha es proporcional al momento de torsión y a la velocidad de rotación.



$\dot{n} = 4\,000 \text{ rpm}$
 $T = 200 \text{ N} \cdot \text{m}$

FIGURA 2-31

Esquema para el ejemplo 2-7.

Trabajo de resorte

Todos sabemos que cuando se aplica una fuerza a un resorte, la longitud de éste cambia (Fig. 2-32). Cuando esta longitud cambia en una cantidad diferencial dx bajo la influencia de una fuerza F , el trabajo efectuado es

$$\delta W_{\text{resorte}} = F dx \quad (2-27)$$

Para determinar el trabajo total del resorte es necesario conocer una relación funcional entre F y x . Para resortes elásticos lineales, el desplazamiento x es proporcional a la fuerza aplicada (Fig. 2-33). Es decir,

$$F = kx \quad (\text{kN}) \quad (2-28)$$

donde k es la constante de resorte y tiene las unidades kN/m. El desplazamiento x se mide a partir de la posición de reposo del resorte (es decir, $x = 0$ cuando $F = 0$). Al sustituir la ecuación 2-28 en la ecuación 2-27 e integrar, se obtiene

$$W_{\text{resorte}} = \frac{1}{2}k(x_2^2 - x_1^2) \quad (\text{kJ}) \quad (2-29)$$

donde x_1 y x_2 son los desplazamientos inicial y final del resorte, respectivamente, medidos a partir de la posición de reposo del resorte.

Hay muchas otras formas de trabajo mecánico. A continuación se presentan algunas brevemente.

Trabajo hecho sobre barras sólidas elásticas

Los sólidos suelen modelarse como resortes lineales debido a que bajo la acción de una fuerza se contraen o se alargan (Fig. 2-34) y cuando ésta se elimina regresan a su longitud original. Esto es cierto siempre y cuando la fuerza se mantenga dentro del límite elástico, es decir, que no sea demasiado grande como para causar deformaciones permanentes (plásticas). Por consiguiente, las ecuaciones para un resorte lineal también son aplicables a las barras sólidas elásticas. Por otro lado, el trabajo asociado con la extensión o contracción de

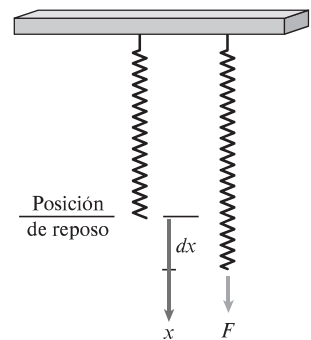


FIGURA 2-32

Elongación de un resorte bajo la influencia de una fuerza.

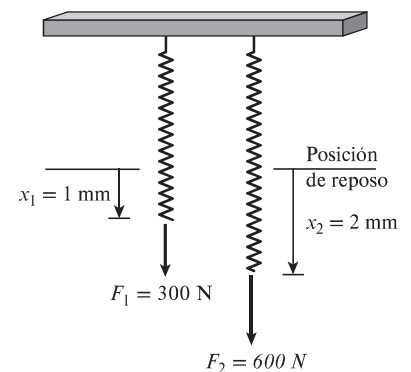


FIGURA 2-33

El desplazamiento de un resorte lineal se duplica al doblar la fuerza.

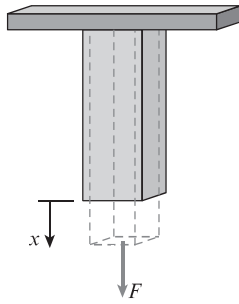


FIGURA 2-34

Las barras sólidas se comportan como resortes bajo la influencia de una fuerza.

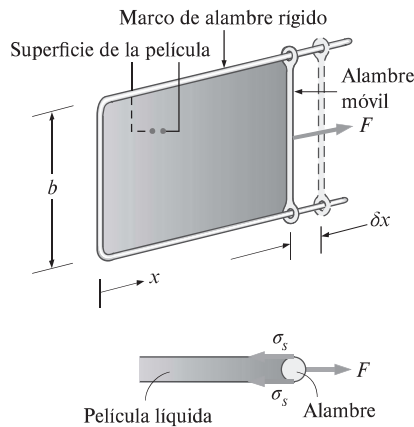


FIGURA 2-35

Estiramiento de una película líquida con un alambre en forma de U, y las fuerzas que actúan sobre el alambre móvil de longitud b .

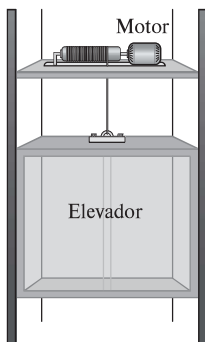


FIGURA 2-36

La energía transferida a un cuerpo mientras es elevado es igual al cambio en su energía potencial.

estas barras se puede determinar al sustituir la presión P por su contraparte en los sólidos, el *esfuerzo normal* $\sigma_n = F/A$, en la expresión para el trabajo:

$$W_{\text{elástico}} = \int_1^2 F dx = \int_1^2 \sigma_n A dx \quad (\text{kJ}) \quad (2-30)$$

donde A es el área de la sección transversal de la barra. Observe que el esfuerzo normal tiene unidades de presión.

Trabajo relacionado con el estiramiento de una película líquida

Considere una película líquida de jabón, por ejemplo, suspendida en un marco ajustable de alambre (Fig. 2-35). Se sabe por experiencia que se requiere cierta fuerza para estirar la película con el lado móvil del marco de alambre. Esta fuerza se emplea para vencer las fuerzas microscópicas entre las moléculas existentes en las interfaces líquido-aire. Estas fuerzas microscópicas son perpendiculares a cualquier línea de la superficie, y la fuerza que generan por unidad de longitud se llama **tensión superficial** σ_s , cuya unidad es N/m. Por lo tanto, el trabajo relacionado con el estiramiento de una película también se llama *trabajo de tensión superficial*, determinado por

$$W_{\text{superficial}} = \int_1^2 \sigma_s dA \quad (\text{kJ}) \quad (2-31)$$

donde $dA = 2b dx$ que es el cambio en el área superficial de la película. El factor 2 se debe a que la película tiene dos superficies en contacto con el aire. La fuerza que actúa sobre el alambre móvil como resultado de los efectos de la tensión superficial es $F = 2b\sigma_s$ donde σ_s es la fuerza de la tensión superficial por unidad de longitud.

Trabajo hecho para elevar o acelerar un cuerpo

Cuando un cuerpo se eleva en un campo gravitacional se incrementa su energía potencial. De manera similar, cuando un cuerpo es acelerado se incrementa su energía cinética. El principio de conservación de la energía requiere que sea transferida una cantidad equivalente de energía al cuerpo que está siendo elevado o acelerado. Recuerde que la energía se transfiere a una masa mediante calor o trabajo, y en este caso la energía transferida no es calor puesto que la fuerza impulsora no es producto de una diferencia de temperatura; por lo tanto, debe ser trabajo. Así, se concluye que 1) la transferencia de trabajo requerida para elevar un cuerpo es igual al cambio en la energía potencial del cuerpo y 2) la transferencia de trabajo necesaria para acelerar un cuerpo es igual al cambio de energía cinética del cuerpo (Fig. 2-36). Análogamente, la energía cinética o potencial de un cuerpo representa el trabajo que se obtiene del cuerpo a medida que éste regresa al nivel de referencia o es desacelerado a velocidad cero.

La explicación anterior junto con la consideración para el rozamiento y otras pérdidas son la base para determinar la potencia nominal de los motores usados para impulsar dispositivos como elevadores, escaleras eléctricas, bandas transportadoras y teleféricos. También desempeñan un papel primordial en el diseño de motores de aviones y automóviles y en el establecimiento de la cantidad de potencia hidroeléctrica que se puede producir a partir de un embalse de agua determinado, que es simplemente la energía potencial del agua en relación con la ubicación de la turbina hidráulica.

EJEMPLO 2-8 Potencia para subir un carrito de compras por una rampa inclinada

Un hombre que pesa 100 kg empuja un carrito de compras cuya masa, incluido su contenido, es de 100 kg hacia arriba de una rampa inclinada 20° con respecto a la horizontal (Fig. 2-37). La aceleración gravitacional local es de 9.8 m/s². Determine el trabajo, en kJ, necesario para desplazarse a una distancia de 100 m a lo largo de la rampa considerando a) el hombre y b) el carrito de compras y su contenido como el sistema.

SOLUCIÓN Un hombre empuja un carrito de compras junto con su contenido hacia arriba de una rampa inclinada 20° con respecto a la horizontal. Se va a determinar el trabajo necesario para desplazarse a lo largo de esta rampa considerando a) el hombre y b) el carrito de compras y su contenido como el sistema.

Análisis a) Si se considera el hombre como el sistema, y si l es el desplazamiento a lo largo de la rampa y θ es el ángulo de inclinación de la rampa,

$$\begin{aligned} W &= Fl \sin \theta = mgl \sin \theta \\ &= (100 + 100 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(100 \text{ m})(\sin 20^\circ) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{67.0 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Éste es el trabajo que el hombre debe realizar para elevar el peso del carrito y su contenido, además de su propio peso, una distancia de $l \sin \theta$.

b) Aplicando la misma lógica al carrito y su contenido se obtiene

$$\begin{aligned} W &= Fl \sin \theta = mgl \sin \theta \\ &= (100 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(100 \text{ m})(\sin 20^\circ) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{33.5 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Comentario El resultado en la parte a) es más real puesto que el hombre tiene que moverse a sí mismo y además al carrito.



FIGURA 2-37

Esquema para el ejemplo 2-8.

© McGraw-Hill Education/Lars A. Niki

EJEMPLO 2-9 Potencia que requiere un automóvil para acelerar

Determine la potencia requerida para acelerar un auto de 900 kg (Fig. 2-38) desde el reposo hasta una velocidad de 80 km/h en 20 s sobre una carretera plana.

SOLUCIÓN Se determinará la potencia requerida para acelerar un automóvil hasta una velocidad especificada.

Análisis El trabajo necesario para acelerar un cuerpo es el cambio de energía cinética de éste,

$$\begin{aligned} W_a &= \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} (900 \text{ kg}) \left[\left(\frac{80000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} \right)^2 - 0^2 \right] \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \\ &= \mathbf{222 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

La potencia media se determina a partir de

$$\dot{W}_a = \frac{W_a}{\Delta t} = \frac{222 \text{ kJ}}{20 \text{ s}} = \mathbf{11.1 \text{ kW}} \quad (\text{o bien } 14.9 \text{ hp})$$

Comentario Esto es adicional a la potencia requerida para vencer la fricción, la resistencia de rodamiento y otras imperfecciones.

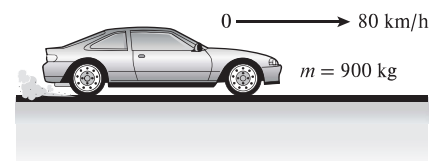


FIGURA 2-38

Esquema para el ejemplo 2-9.

Formas no mecánicas del trabajo

La sección 2-5 representa una cobertura bastante completa de las formas mecánicas del trabajo, excepto del *trabajo a través de la frontera móvil*, el cual se trata en el capítulo 4. Sin embargo, algunos modos de trabajo encontrados en la práctica son de naturaleza no mecánica, pero pueden tratarse de manera similar si se identifica una *fuerza generalizada* F que actúa en dirección de un *desplazamiento generalizado* x . Entonces, el trabajo relacionado con el desplazamiento diferencial bajo la influencia de esa fuerza se determina a partir de $\delta W = Fdx$.

Algunos ejemplos de modos no mecánicos de trabajo son el **trabajo eléctrico**, en el que la fuerza generalizada es el *voltaje* (el potencial eléctrico) y el desplazamiento generalizado es la *carga eléctrica* como se explicó antes; el **trabajo magnético**, donde la fuerza generalizada es la *intensidad del campo magnético* y el desplazamiento generalizado es el *momento dipolar magnético*, y el **trabajo de polarización eléctrica** en el que la fuerza generalizada es la *intensidad de campo eléctrico* y el desplazamiento generalizado es la *polarización del medio* (la suma de los momentos dipolares eléctricos de rotación de las moléculas). El tratamiento detallado de éstos y otros modos de trabajo no mecánico se pueden encontrar en libros especializados.

2-6 ■ LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Hasta el momento se han considerado por separado varias formas de energía como el calor Q , el trabajo W y la energía total E , y no se ha hecho ningún intento para relacionarlas entre sí durante un proceso. La *primera ley de la termodinámica*, conocida también como el *principio de conservación de la energía*, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que *la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma*. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso.

Se sabe que una roca a una altura determinada posee cierta energía potencial, y que parte de ésta se convierte en cinética cuando cae la roca (Fig. 2-39). Los datos experimentales muestran que la disminución de energía potencial ($mg\Delta z$) es exactamente igual al incremento en energía cinética [$m(V_2^2 - V_1^2)/2$] cuando la resistencia del aire es insignificante, con lo que se confirma el principio de conservación de la energía para la energía mecánica.

Considere un sistema que experimenta una serie de procesos *adiabáticos* desde un estado especificado 1 a otro estado 2. Al ser adiabáticos, es evidente que estos procesos no tienen que ver con transferencia de calor, pero sí con varias clases de interacción de trabajo. Las mediciones cuidadosas durante estos experimentos indican lo siguiente: *para todos los procesos adiabáticos entre dos estados determinados de un sistema cerrado, el trabajo neto realizado es el mismo sin importar la naturaleza del sistema cerrado ni los detalles del proceso*. Considerando que existe un número infinito de maneras para llevar a cabo interacciones de trabajo en condiciones adiabáticas, el enunciado anterior parece ser muy poderoso para tener implicaciones trascendentes. Este enunciado, basado en gran medida en los experimentos hechos por Joule en la primera mitad del siglo XIX, no se puede extraer de ningún otro principio físico conocido y se reconoce como principio fundamental o **primera ley de la termodinámica** o sólo **primera ley**.

Una consecuencia importante de la primera ley es la existencia y definición de la propiedad *energía total* E . Considerando que el trabajo neto es el mismo

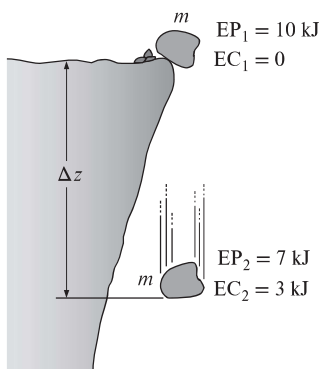


FIGURA 2-39

La energía no se crea ni se destruye, sólo cambia de forma.

para todos los procesos adiabáticos de un sistema cerrado entre dos estados determinados, el valor del trabajo neto debe depender únicamente de los estados iniciales y finales del sistema y por lo tanto debe corresponder al cambio en una propiedad del sistema; esta propiedad es la *energía total*. Observe que la primera ley no hace referencia al valor de la energía total de un sistema cerrado en un estado, tan sólo establece que el *cambio* de energía total durante un proceso adiabático debe ser igual al trabajo neto realizado. En consecuencia, se puede asignar cualquier valor arbitrario conveniente a la energía total en un estado determinado para servir como punto de referencia.

Implicita en el enunciado de la primera ley se encuentra la conservación de la energía. Aunque la esencia de la primera ley es la existencia de la propiedad *energía total*, con frecuencia se considera a la primera ley como un enunciado del principio de la *conservación de la energía*. A continuación se desarrolla la relación de la primera ley con la ayuda de algunos ejemplos familiares utilizando argumentos intuitivos.

Primero, se consideran algunos procesos en los que hay transferencia de calor pero no interacciones de trabajo. La papa cocida en el horno es un buen ejemplo para este caso (Fig. 2-40). Como resultado de la transferencia de calor a la papa, se incrementará la energía de ésta. Si se ignora cualquier transferencia de masa (la pérdida de humedad de la papa), el incremento en la energía total de la papa se vuelve igual a la cantidad de transferencia de calor. Es decir, si se transfieren 5 kJ de calor a la papa, su energía se incrementa también en 5 kJ.

Como otro ejemplo, considere el calentamiento del agua contenida en una cacerola sobre una estufa (Fig. 2-41). Si se transfieren 15 kJ de calor al agua desde el elemento de calentamiento y se pierden 3 kJ del agua al aire circundante, el incremento de energía del agua será igual a la transferencia neta de calor al agua, que es de 12 kJ.

Ahora se tiene como sistema a una habitación perfectamente aislada (es decir, adiabática) calentada mediante un calentador eléctrico (Fig. 2-42). Como resultado del trabajo eléctrico realizado se incrementará la energía del sistema. Como el sistema es adiabático y no puede haber transferencia de calor desde o hacia el exterior ($Q = 0$), el principio de conservación de la energía dicta que el trabajo eléctrico hecho sobre el sistema debe ser igual al incremento de energía del sistema.

Esta vez se sustituye el calentador eléctrico por una rueda de paletas (Fig. 2-43). Como resultado del proceso de agitación se incrementa la energía del sistema y de nuevo, como no existe interacción de calor entre el sistema y sus alrededores ($Q = 0$), el trabajo de la flecha (eje) realizado sobre el sistema debe presentarse como un incremento en la energía del sistema.

Algo notable es que la temperatura del aire aumenta cuando se comprime (Fig. 2-44) debido a que la energía se transfiere al aire en forma de trabajo a través de la frontera. En ausencia de transferencia de calor ($Q = 0$), todo el trabajo de frontera se almacena en el aire como parte de su energía total. El principio de conservación de la energía dicta que el incremento en la energía del sistema debe ser igual al trabajo de frontera realizado sobre el sistema.

Es posible extender estos criterios a sistemas en los que se tienen al mismo tiempo varias interacciones de calor y trabajo. Por ejemplo, si un sistema gana 12 kJ de calor durante un proceso mientras que el trabajo realizado sobre él es de 6 kJ, el incremento en la energía del sistema durante el proceso es de 18 kJ (Fig. 2-45). Es decir, el cambio en la energía de un sistema durante un proceso es igual a la transferencia neta de energía hacia (o desde) el sistema.

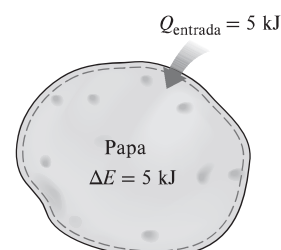


FIGURA 2-40

El incremento en la energía de una papa dentro de un horno es igual a la cantidad de calor transferido a ésta.

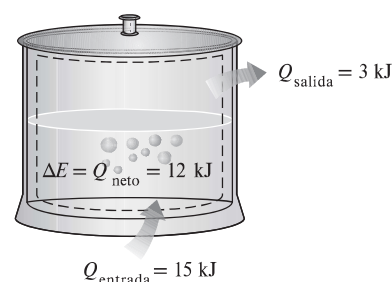


FIGURA 2-41

En ausencia de interacciones de trabajo, el cambio de energía de un sistema es igual a la transferencia neta de calor.

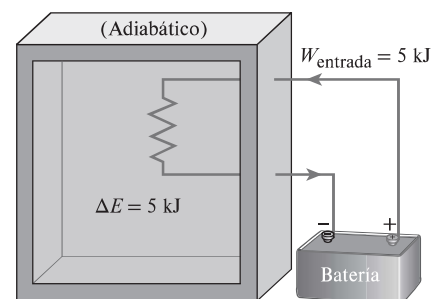


FIGURA 2-42

El trabajo (eléctrico) hecho sobre un sistema adiabático es igual al incremento en la energía del sistema.

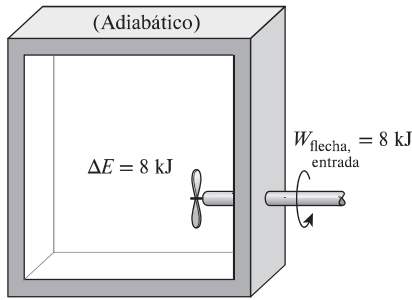


FIGURA 2-43

El trabajo (flecha) realizado sobre un sistema adiabático es igual al incremento en la energía del sistema.

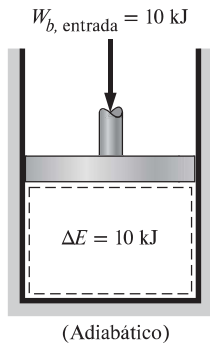


FIGURA 2-44

El trabajo (de frontera) realizado sobre un sistema adiabático es igual al incremento en la energía del sistema.

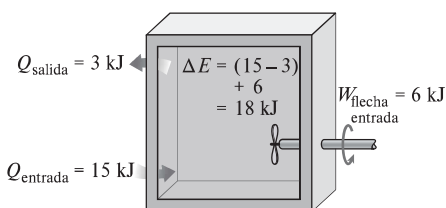


FIGURA 2-45

El cambio de energía de un sistema durante un proceso es igual al trabajo y la transferencia de calor *neto* entre el sistema y el exterior.

Balance de energía

De acuerdo con el análisis anterior, el principio de conservación de la energía se expresa como: *el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso.* Es decir,

$$\left(\text{Energía total que entra al sistema} \right) - \left(\text{Energía total que sale del sistema} \right) = \left(\text{Cambio en la energía total del sistema} \right)$$

o

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Esta relación es más conocida como **balance de energía** y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere.

Cambio de energía de un sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$

Para determinar el cambio de energía de un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al principio y al final del proceso y encontrar su diferencia. Es decir,

Cambio de energía = Energía en el estado final = Energía en el estado inicial

o

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = E_2 - E_1 \quad (2-32)$$

Observe que la energía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado del sistema. Por lo tanto, el cambio de energía de un sistema es cero si el estado no se modifica durante el proceso. También, es posible que exista energía en numerosas formas: interna (sensible, latente, química y nuclear), cinética, potencial, eléctrica y magnética, por lo que la suma de ellas constituye la *energía total E* de un sistema. En ausencia de efectos eléctricos, magnéticos y de tensión superficial (para sistemas simples compresibles), el cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios en sus energías interna, cinética y potencial, lo cual se expresa como

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \quad (2-33)$$

donde

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1)$$

Cuando se especifican los estados inicial y final, los valores de las energías internas específicas u_1 y u_2 se determinan directamente de las tablas de propiedades o de las relaciones de propiedades termodinámicas.

La mayor parte de los sistemas encontrados en la práctica son estacionarios, es decir, no tienen que ver con cambios en su velocidad o elevación durante un proceso (Fig. 2-46). Así, para **sistemas estacionarios**, los cambios en las energías cinética y potencial son cero (es decir, $\Delta EC = \Delta EP = 0$), y la relación del cambio de energía total en la ecuación 2-33 se reduce a $\Delta E = \Delta U$ para tales sistemas. También, la energía de un sistema durante un proceso cambiará incluso si únicamente una forma de su energía cambia mientras que las otras permanecen sin alteración.

Mecanismos de transferencia de energía, E_{entrada} y E_{salida}

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: *calor*, *trabajo* y *flujo másico*. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía que gana o pierde un sistema durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción de la energía relacionadas con una masa fija o sistema cerrado son las *transferencias de calor* y *de trabajo*.

- 1. Transferencia de calor, Q** La transferencia de calor hacia un sistema (ganancia de calor) incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema; asimismo, la transferencia de calor desde un sistema (pérdida de calor) la disminuye, ya que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.
- 2. Transferencia de trabajo, W** Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. Un émbolo ascendente, un eje rotatorio y un alambre eléctrico que cruzan la frontera del sistema se relacionan con interacciones de trabajo. La transferencia de trabajo a un sistema (es decir, el trabajo realizado sobre un sistema) incrementa la energía de éste, mientras que la transferencia de trabajo desde un sistema (es decir, el trabajo realizado por el sistema) la disminuye, puesto que la energía transferida como trabajo viene de la energía contenida en el sistema. Los motores de automóviles y las turbinas hidráulicas, de vapor o de gas, producen trabajo mientras que los compresores, las bombas y los mezcladores consumen trabajo.
- 3. Flujo másico, m** El flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía (de hecho, la masa es energía). De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale saca algo de energía consigo. Por ejemplo, cuando cierta cantidad de agua caliente sale de un calentador y es reemplazada por agua fría en la misma cantidad, el contenido de energía del tanque de agua caliente (el volumen de control) disminuye como resultado de esta interacción de masa (Fig. 2-47).

Como la energía puede ser transferida en las formas de calor, trabajo y masa, y su transferencia neta es igual a la diferencia entre las cantidades transferidas hacia dentro y hacia fuera, el balance de energía se expresa de modo más explícito como

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + (W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}) + (E_{\text{masa, entrada}} - E_{\text{masa, salida}}) = \Delta E_{\text{sistema}} \quad (2-34)$$

donde los subíndices *entrada* y *salida* denotan cantidades que entran y salen del sistema, respectivamente. Los seis valores del lado derecho de la ecuación representan “cantidades” y, por lo tanto, son medidas *positivas*. La dirección de cualquier transferencia de energía se describe por los subíndices *entrada* y *salida*.

La transferencia de calor Q es cero para sistemas adiabáticos, la transferencia de trabajo W es cero para sistemas en los que no intervienen interacciones de trabajo, y el transporte de energía con E_{masa} es cero para sistemas sin flujo másico a través de su frontera (es decir, sistemas cerrados).

El balance de energía para un sistema que experimenta cualquier clase de proceso se expresa de manera compacta como

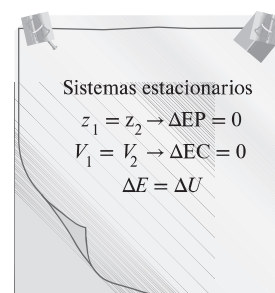


FIGURA 2-46

Para sistemas estacionarios, $\Delta EC = \Delta EP = 0$; así $\Delta E = \Delta U$.

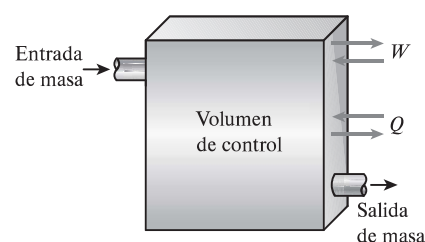


FIGURA 2-47

El contenido de energía de un volumen de control se cambia con el flujo de masa, así como con las interacciones de calor y trabajo.

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\text{Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\text{Cambio de energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \quad (\text{kJ}) \quad (2-35)$$

o, en la **forma de tasa**, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\text{Tasa de cambio de energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \quad (\text{kW}) \quad (2-36)$$

Para tasas constantes, las cantidades totales durante un intervalo de tiempo Δt se relacionan con las cantidades por unidad de tiempo mediante

$$Q = \dot{Q} \Delta t, \quad W = \dot{W} \Delta t \quad \text{y} \quad \Delta E = (dE/dt) \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (2-37)$$

El balance de energía se puede expresar **por unidad de masa** como

$$e_{\text{entrada}} - e_{\text{salida}} = \Delta e_{\text{sistema}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2-38)$$

que se obtiene dividiendo todas las cantidades de la ecuación 2-35 entre la masa m del sistema. El balance de energía se puede expresar también en forma diferencial como

$$\delta E_{\text{entrada}} - \delta E_{\text{salida}} = dE_{\text{sistema}} \quad \text{o} \quad \delta e_{\text{entrada}} - \delta e_{\text{salida}} = de_{\text{sistema}} \quad (2-39)$$

Para un sistema cerrado que experimenta un **ciclo**, los estados inicial y final son idénticos, por lo que $\Delta E_{\text{sistema}} = E_2 - E_1 = 0$. Entonces, el balance de energía para un ciclo se simplifica a $E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = 0$ o $E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}}$. Puesto que en un sistema cerrado no se tiene flujo másico en sus fronteras, el balance de energía para un ciclo se expresa en términos de interacciones de calor y de trabajo como

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{neto,entrada}} \quad \text{o} \quad \dot{W}_{\text{neto,salida}} = \dot{Q}_{\text{neto,entrada}} \quad (\text{para un ciclo}) \quad (2-40)$$

Es decir, la salida neta de trabajo durante un ciclo es igual a la entrada neta de calor (Fig. 2-48).

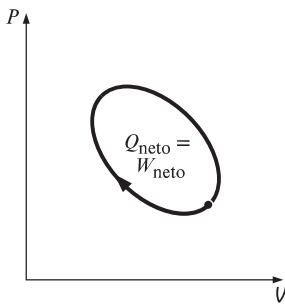


FIGURA 2-48

Para un ciclo $\Delta E = 0$, por lo tanto $Q = W$.

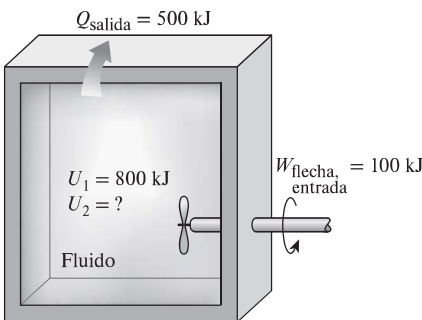


FIGURA 2-49

Esquema para el ejemplo 2-10.

EJEMPLO 2-10 Enfriamiento de un fluido caliente en un recipiente

Un recipiente rígido contiene un fluido caliente que se enfría mientras es agitado por un ventilador. Al inicio, la energía interna del fluido es de 800 kJ, pero durante el proceso de enfriamiento pierde 500 kJ de calor. Por su parte, el ventilador realiza 100 kJ de trabajo sobre el fluido. Determine la energía interna final del fluido e ignore la energía almacenada en el ventilador.

SOLUCIÓN Un fluido en un recipiente rígido pierde calor mientras se agita. Se determinará la energía interna final del fluido.

Suposiciones 1 El recipiente es estacionario, de modo que los cambios de energía cinética y potencial son cero, $\Delta EC = \Delta EP = 0$. Por consiguiente, $\Delta E = \Delta U$ y la energía interna es la única forma de energía del sistema que puede cambiar durante este proceso. 2 La energía almacenada en el ventilador es insignificante.

Análisis Considere el contenido del recipiente como el *sistema* (Fig. 2-49), el cual es *cerrado* puesto que ninguna masa cruza sus fronteras durante el proceso. Se observa que el volumen de un recipiente rígido es constante y por lo tanto no hay trabajo a través de la frontera móvil. Asimismo, se pierde calor del sistema y se realiza trabajo de flecha sobre el sistema. Al aplicar el balance de energía sobre el sistema, se obtiene

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Transferencia neta de energía} \\ \text{por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Cambio de energías interna,} \\ \text{cinética, potencial, etcétera}}}$$

$$W_{\text{flecha, entrada}} - Q_{\text{salida}} = \Delta U = U_2 - U_1$$

$$100 \text{ kJ} - 500 \text{ kJ} = U_2 - 800 \text{ kJ}$$

$$U_2 = 400 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, la energía interna final del sistema es de 400 kJ.

EJEMPLO 2-11 Aceleración de aire mediante un ventilador

Un ventilador en funcionamiento consume 20 W de potencia eléctrica y descarga aire del cuarto a ventilarse a una tasa de 1.0 kg/s y una velocidad de descarga de 8 m/s (Fig. 2-50). Determine si esta afirmación es razonable.

SOLUCIÓN Un ventilador incrementa la velocidad del aire a un valor especificado mientras consume potencia eléctrica a una velocidad determinada. Se investigará la validez de esta afirmación.

Suposiciones Como el cuarto está relativamente en calma, es insignificante la velocidad del aire ahí contenido.

Análisis Se examinan las conversiones de energía del caso: el motor del ventilador convierte parte de la potencia eléctrica que consume en potencia mecánica (flecha) empleada para hacer girar las aspas del ventilador. Las aspas están diseñadas para transmitir al aire una porción grande de la potencia mecánica de la flecha para moverlo. En el caso ideal de una permanente operación con ausencia de pérdidas (sin conversión de energía eléctrica y mecánica en energía térmica), la entrada de potencia eléctrica será igual a la tasa de incremento de la energía cinética del aire. Por lo tanto, para un volumen de control que encierra al motor, el balance de energía se expresa como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia de energía} \\ \text{neta por calor, trabajo y masa}}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\substack{\text{Tasa de cambio en las energías interna,} \\ \text{cinética, potencial, etcétera}}} \stackrel{0 \text{ (permanente)}}{=} 0 \rightarrow \dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}$$

$$\dot{W}_{\text{eléctrico, entrada}} = \dot{m}_{\text{aire}} c_{\text{salida}} = \dot{m}_{\text{aire}} \frac{V_{\text{salida}}^2}{2}$$

Si se despeja y sustituye V_{salida} se obtiene la velocidad máxima de salida de aire

$$V_{\text{salida}} = \sqrt{\frac{2\dot{W}_{\text{eléctrico, entrada}}}{\dot{m}_{\text{aire}}}} = \sqrt{\frac{2(20 \text{ J/s})}{1.0 \text{ kg/s}} \left(\frac{1 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ J/kg}} \right)} = 6.3 \text{ m/s}$$

lo cual es menor a 8 m/s. Por lo tanto, la afirmación es **falsa**.

Comentario El principio de conservación de la energía requiere que la energía se conserve cuando se convierte de una a otra forma y no permite que ninguna energía se cree ni se destruya durante un proceso. Desde el punto de vista de la primera ley, no hay ningún error con la conversión de toda la energía eléctrica en energía cinética. Por lo tanto, la primera ley no tiene objeción en que la velocidad del aire alcance 6.3 m/s, pero éste es el límite superior. Cualquier afirmación de una velocidad mayor a este límite viola la primera ley y por lo tanto es imposible. En realidad, la velocidad del aire será considerablemente menor que 6.3 m/s como resultado de las pérdidas relacionadas con la conversión de energía eléctrica en energía mecánica de flecha y la conversión de ésta en energía cinética del aire.

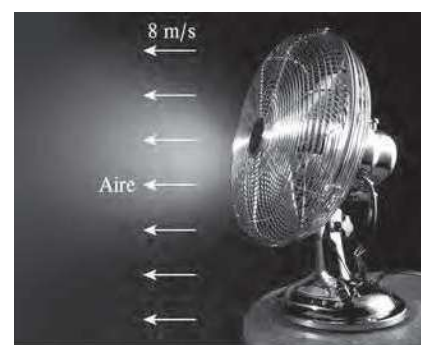


FIGURA 2-50
Esquema para el ejemplo 2-11.
© Design Pics/PunchStock RF

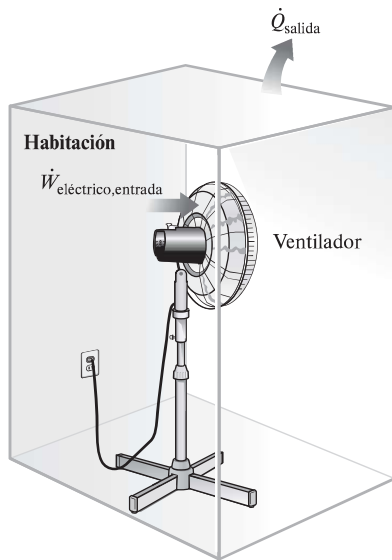


Figura 2-51

Esquema para el ejemplo 2-12.

EJEMPLO 2-12 Efecto de calentamiento de un ventilador

Una habitación se encuentra inicialmente a la temperatura ambiente de 25 °C, pero se enciende un gran ventilador que consume 200 W de electricidad cuando está funcionando (Fig. 2-51). La tasa de transferencia de calor entre el aire de la habitación y el exterior se da como $\dot{Q} = UA(T_i - T_o)$, donde $U = 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ representa el coeficiente de transferencia de calor global, mientras $A = 30 \text{ m}^2$ es la superficie expuesta de la habitación y T_i y T_o son las temperaturas del aire en el interior y el exterior, respectivamente. Determine la temperatura del aire en el interior cuando se alcance el régimen estacionario de funcionamiento.

SOLUCIÓN Se enciende un gran ventilador y se mantiene funcionando en una habitación cuyo calor perdido va hacia el exterior. La temperatura del aire interior se determinará cuando se alcancen condiciones de operación estacionarias.

Suposiciones 1 La transferencia de calor por el piso es insignificante, y 2 aparte de ésta, no hay otras interacciones de energía.

Análisis La electricidad consumida por el ventilador es la energía que entra a la habitación, por lo que ésta gana energía a una tasa de 200 W. Como resultado, la temperatura del aire en el interior tiende a subir, pero a medida que ésta aumenta la tasa de pérdida de calor desde la habitación se incrementa hasta que es igual al consumo de potencia eléctrica. En este punto, la temperatura del aire en el interior y por lo tanto el contenido de energía de la habitación, permanecen constantes, mientras la conservación de energía para la habitación se convierte en

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia de energía mediante calor, trabajo y masa}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\text{Tasa de cambio en las energías interna, cinética y potencial, etcétera}} \stackrel{0 \text{ (permanente)}}{=} 0 \rightarrow \dot{E}_{\text{entrada}} = \dot{E}_{\text{salida}}$$

$$\dot{W}_{\text{el\u00e9ctrico, entrada}} = \dot{Q}_{\text{salida}} = UA(T_i - T_o)$$

Al sustituir, se obtiene

$$200 \text{ W} = (6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C})(30 \text{ m}^2)(T_i - 25 \text{ °C})$$

Esto da

$$T_i = 26.1 \text{ °C}$$

Por lo tanto, la temperatura del aire en el interior del cuarto permanecerá constante después de alcanzar los 26.1 °C.

Comentario Un ventilador de 200 W calienta una habitación del mismo modo que un calentador con una resistencia de 200 W. En el caso de un ventilador, el motor convierte parte de la energía eléctrica en energía mecánica para que gire la flecha mientras que el resto se disipa en forma de calor hacia el aire de la habitación como resultado de la ineficiencia del motor (ningún motor convierte 100 por ciento de la energía eléctrica que recibe en energía mecánica, aunque algunos motores grandes se acercan con una eficiencia de conversión de más de 97 por ciento). Parte de la energía mecánica de la flecha se convierte en energía cinética del aire a través de las aspas, para después convertirse en energía térmica cuando las moléculas de aire disminuyen su velocidad debido al rozamiento. Al final, toda la energía eléctrica que emplea el motor del ventilador se convierte en energía térmica del aire, lo cual se manifiesta como un aumento de temperatura.



Figura 2-52

Iluminación de un salón de clases con lámparas fluorescentes, según se explicó en el ejemplo 2-13.

© PhotoLink/Getty Images RF.

EJEMPLO 2-13 Costo anual de la iluminación de un salón de clases

Para iluminar un salón de clases se utilizan 30 lámparas fluorescentes, cada una con un consumo de 80 W de electricidad (Fig. 2-52). Las luces se mantienen

encendidas durante 12 horas al día y 250 días por año. Para un costo de electricidad de 11 centavos por kWh, determine el costo anual de energía y explique los efectos que la iluminación tendrá sobre la calefacción y el sistema de aire acondicionado del aula.

SOLUCIÓN Se piensa iluminar un aula mediante lámparas fluorescentes. Se determinará el costo anual de la electricidad para iluminación y se analizará el efecto que ésta tendrá en la calefacción y en el sistema de aire acondicionado.

Suposiciones El efecto de las fluctuaciones de voltaje es insignificante porque cada lámpara fluorescente consume su potencia nominal.

Análisis La potencia eléctrica que consumen las lámparas cuando todas están encendidas y el número de horas por año que así se mantienen se expresa

$$\begin{aligned} \text{Potencia de iluminación} &= (\text{potencia que consume la lámpara}) \times \\ &\quad (\text{número de lámparas}) \\ &= (80 \text{ W/lámpara})(30 \text{ lámparas}) \\ &= 2\,400 \text{ W} = 2.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{Horas de operación} = (12 \text{ h/día})(250 \text{ días/año}) = 3\,000 \text{ h/año}$$

Entonces la cantidad y el costo de la electricidad consumida por año es

$$\begin{aligned} \text{Energía de iluminación} &= (\text{potencia de iluminación})(\text{horas de operación}) \\ &= (2.4 \text{ kW})(3\,000 \text{ h/año}) = 7\,200 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de iluminación} &= (\text{energía de iluminación})(\text{costo unitario}) \\ &= (7\,200 \text{ kWh/año})(\$0.11/\text{kWh}) = \$792/\text{año} \end{aligned}$$

Las superficies absorben la luz que incide en ellas y ésta se convierte en energía térmica. Si se ignora la luz que escapa por las ventanas, los 2.4 kW de potencia eléctrica que consumen las lámparas en algún momento se vuelven parte de la energía térmica del salón, por lo tanto el sistema de iluminación reduce los requerimientos de calefacción en 2.4 kW, pero incrementa la carga del sistema de aire acondicionado en 2.4 kW.

Comentario El costo de iluminación para el aula es mayor a \$800, lo que demuestra la importancia de las medidas de conservación de energía. Si se emplearan bombillas eléctricas incandescentes, los costos de iluminación se cuadruplicarían, ya que este tipo de lámparas usan cuatro veces más potencia para producir la misma cantidad de luz.

2-7 ■ EFICIENCIA EN LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA

Eficiencia es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones. Esto se debe a que se usa sin una definición adecuada, lo cual se aclara a continuación y se definen algunas de las eficiencias más usadas en la práctica.

La eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Salida requerida}} \quad (2-41)$$

Si acude a una tienda a comprar un calentador de agua, un vendedor experto le dirá que la eficiencia de uno eléctrico es de alrededor de 90 por ciento (Fig. 2-53).



Calentador de agua

Tipo	Eficiencia
Gas, ordinario	55%
Gas, alta eficiencia	62%
Eléctrico, ordinario	90%
Eléctrico, alta eficiencia	94%

FIGURA 2-53

Eficiencias representativas de calentadores de agua ordinarios, de alto rendimiento, eléctricos y de gas natural.

© McGraw-Hill Education/Christopher Kerrigan

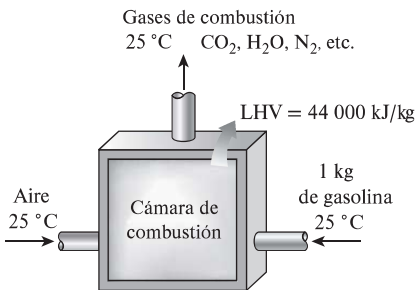


FIGURA 2-54

Definición del poder calorífico de la gasolina.

Es posible que esto sea confuso dado que los dispositivos de calentamiento de los calentadores eléctricos son resistencias, y la eficiencia de éstas es de 100 por ciento porque convierten en energía térmica toda la energía eléctrica que consumen. El vendedor aclararía todo si explicara que las pérdidas de calor del depósito de agua caliente al aire circundante equivalen a 10 por ciento de la energía eléctrica consumida, y que la **eficiencia de un calentador de agua** se define como la relación entre *la energía que el agua caliente entrega a la casa y la energía suministrada al calentador de agua*. El vendedor incluso puede sugerir la compra de un calentador de agua más caro equipado con un mejor aislamiento cuya eficiencia es de 94 por ciento. Si el consumidor está informado y cuenta con una instalación de gas natural es probable que compre un calentador de gas cuya eficiencia es de sólo 55 por ciento, ya que cuesta casi lo mismo comprar e instalar una unidad de este tipo que una eléctrica, pero el costo anual de energía de la primera será mucho menor que el de la segunda.

Quizá se pregunte cómo se define la eficiencia para un calentador de agua a base de gas y por qué es mucho menor que la de un calentador eléctrico. Por regla general, la eficiencia de equipo que quema combustible se basa en el **poder calorífico del combustible**, el cual es *la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente* (Fig. 2-54). Entonces el rendimiento del equipo de combustión se puede caracterizar por la **eficiencia del equipo de combustión** $\eta_{\text{equip.comb.}}$, la cual se define como

$$\eta_{\text{equip.comb.}} = \frac{Q_{\text{útil}}}{\text{HV}} = \frac{\text{Cantidad de calor liberado durante la combustión}}{\text{Poder calorífico del combustible quemado}} \quad (2-42)$$

Esta eficiencia puede adoptar diferentes nombres según la unidad de combustión, como eficiencia de horno η_{horno} , eficiencia de calentador $\eta_{\text{calentador}}$ o eficiencia de calefactor $\eta_{\text{calefactor}}$. Por ejemplo, una eficiencia de 70 por ciento de un calentador de carbón utilizado para calentar un edificio indica que el 70 por ciento del valor calorífico del carbón se transfiere al edificio como calor útil mientras que el 30 por ciento restante se pierde, en su mayor parte en los gases calientes que salen del calentador.

La mayor parte de los combustibles contienen hidrógeno, que forma agua durante la combustión. El poder calorífico de un combustible será diferente dependiendo de si el agua en los productos de la combustión se halla en forma líquida o de vapor. El poder calorífico se denomina *poder calorífico inferior* o LHV (*lower heating value*) cuando el agua sale como vapor, y *poder calorífico superior* o HHV (*higher heating value*) cuando el agua en los gases de combustión se condensa por completo, de manera que también se recupera el calor de vaporización. La diferencia entre estos dos poderes caloríficos es igual al producto de la cantidad de agua y la entalpía de vaporización del agua a temperatura ambiente. Por ejemplo, los poderes caloríficos inferior y superior de la gasolina son 44 000 kJ/kg y 47 300 kJ/kg, respectivamente. Una definición de eficiencia debería dejar claro si se basa en el poder calorífico inferior o superior del combustible. Las eficiencias de los motores de automóviles y aviones a reacción normalmente se basan en *poderes caloríficos inferiores* pues regularmente el agua sale en forma de vapor en los gases de escape y resulta prácticamente imposible intentar recuperar el calor de vaporización. Por otro lado, las eficiencias de los hornos se basan en *poderes caloríficos superiores*.

La eficiencia de los sistemas de calefacción de edificios residenciales y comerciales se expresa comúnmente en términos de la **eficiencia anual de utiliza-**

ción de combustible, o EAUC, la cual representa la eficiencia de combustión y otras pérdidas como las de calor hacia áreas no calentadas, de encendido y de enfriamiento. La EAUC de la mayor parte de los nuevos sistemas de calefacción es aproximadamente de 85 por ciento, mientras que la de algunos viejos sistemas es inferior a 60 por ciento. La EAUC de algunos hornos nuevos de alta eficiencia es mayor a 96 por ciento, pero el alto costo de éstos no se justifica para localidades con inviernos ligeros a moderados. Estas eficiencias se logran al recuperar la mayor parte del calor contenido en los gases residuales, condensar el vapor de agua y descargar dichos gases con temperaturas bajas de 38 °C (o 100 °F) en lugar de casi 200 °C (o 400 °F) de los modelos estándar.

Para los *motores de automóvil* la salida de trabajo se entiende como la potencia entregada por el cigüeñal, pero para las centrales eléctricas el trabajo producido puede ser la potencia mecánica en la salida de la turbina, o la salida de potencia eléctrica del generador.

Un generador es un dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica, y su efectividad se caracteriza por la **eficiencia del generador**, que es la relación entre la *salida de potencia eléctrica* y la *entrada de potencia mecánica*. La *eficiencia térmica* de una central eléctrica, la cual es de primordial interés en termodinámica, se define como la relación entre la salida neta de trabajo en la flecha de la turbina y la entrada de calor al fluido de trabajo. Los efectos de otros factores se incorporan mediante la definición de una **eficiencia global** para la central eléctrica, a partir de la relación entre la *salida neta de potencia eléctrica* y la *tasa de entrada de energía del combustible*. Es decir,

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{equip.comb.}} \eta_{\text{térmica}} \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto,eléctrico}}}{\text{HHV} \times \dot{m}_{\text{neto}}} \quad (2-43)$$

Las eficiencias globales están entre 25 y 30 por ciento para motores de automóviles de gasolina, entre 35 y 40 por ciento para los de diésel y hasta 60 por ciento para las grandes centrales eléctricas.

De algún modo todo mundo está familiarizado con la conversión de energía eléctrica en *luz* mediante focos incandescentes, fluorescentes y lámparas de descarga de alta intensidad. La eficiencia para la conversión de electricidad en luz se define como la relación entre la energía convertida en luz y la energía eléctrica consumida. Por ejemplo, los focos incandescentes comunes convierten en luz casi 5 por ciento de la energía eléctrica que consumen, mientras el resto se disipa como calor y se suma a la carga de enfriamiento de los sistemas de aire acondicionado durante el verano. Sin embargo, es más común expresar la efectividad de este proceso de conversión mediante la **eficacia de iluminación**, la cual se define como la *cantidad de luz producida en lúmenes por W de electricidad consumida*.

En la tabla 2-1 se presenta la eficacia de diferentes sistemas de iluminación. Como se puede observar, una lámpara fluorescente compacta produce por W aproximadamente cuatro veces la luz de una incandescente y, en consecuencia, una fluorescente de 15 W puede reemplazar a otra incandescente de 60 W (Fig. 2-55). Además, una lámpara fluorescente compacta dura alrededor de 10 000 h, 10 veces la duración de una incandescente, y se conecta directamente en el mismo receptáculo de esta última. Así, a pesar de su elevado costo inicial, las fluorescentes compactas reducen los costos de iluminación al reducir de manera considerable el consumo de electricidad. Las lámparas de descarga de alta intensidad llenas de sodio proporcionan la mayor eficiencia de iluminación, pero su uso está limitado al exterior debido al tono amarillento de la luz que emiten.

TABLA 2-1

Eficacia de diferentes sistemas de iluminación

Tipo de iluminación	Eficacia, lúmenes/W
<i>Combustión</i>	
Vela	0.3
Lámpara de queroseno	1-2
<i>Incandescente</i>	
Ordinaria	6-20
Halógeno	15-35
<i>Fluorescente</i>	
Compacto	40-87
Tubo	60-120
<i>Descarga de alta intensidad</i>	
Vapor de mercurio	40-60
Haluro metálico	65-118
Sodio a alta presión	85-140
Sodio a baja presión	70-200
<i>Estado sólido</i>	
LED	20-160
OLED	15-60
Límite teórico	300*

* Este valor depende de la distribución espectral de la fuente ideal de la luz supuesta. Para fuentes de luz blanca, el límite superior es alrededor de 300 lm/W para haluro metálico, 350 lm/W para fluorescentes y 400 lm/W para LED. El máximo espectral tiene lugar a una longitud de onda de 555 nm (color verde), con producción de luz de 683 lm/W.

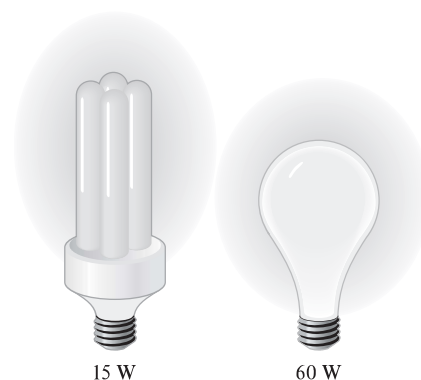
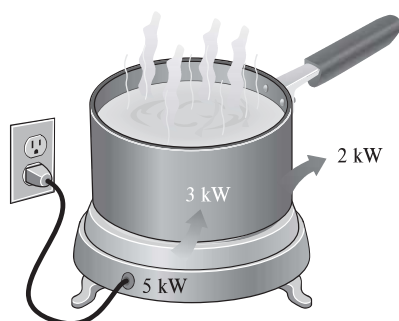


FIGURA 2-55

Una lámpara fluorescente compacta de 15 W provee mucha más luz que un foco incandescente de 60 W.



$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía utilizada}}{\text{Energía suministrada al aparato}}$$

$$= \frac{3 \text{ kWh}}{5 \text{ kWh}} = 0.60$$

FIGURA 2-56

La eficiencia de un aparato de cocina representa la fracción de la energía suministrada a éste que se transfiere a la comida.

Es posible definir la eficiencia de aparatos para cocer alimentos ya que convierten la energía eléctrica o química en calor. La **eficiencia de un aparato para cocinar** se define como la relación entre *la energía útil transferida a los alimentos y la energía que consume el aparato* (Fig. 2-56). Las estufas eléctricas son más eficientes que las de gas, pero es mucho más barato cocinar con gas natural que con electricidad, debido al menor costo unitario del gas (tabla 2-2).

La eficiencia de cocción depende de los hábitos del usuario, así como de cada uno de los aparatos. Los hornos de convección y de microondas son inherentemente más eficientes que los hornos estándar: de media, los de convección ahorran aproximadamente *un tercio* y los de microondas *dos tercios* de la energía que usan los estándares. La eficiencia se incrementa con el uso de hornos más pequeños, ollas de presión, utensilios eléctricos de cocimiento lento para estofados y sopas, cacerolas más pequeñas, elementos calefactores más pequeños para cacerolas pequeñas en estufas eléctricas, sartenes de fondo plano sobre quemadores eléctricos para asegurar buen contacto, mantener limpias y brillantes las charolas de escurrimiento de los quemadores, descongelar los alimentos antes de cocinarlos, evitar el precalentamiento a menos que sea necesario, mantener las cacerolas tapadas durante la cocción, usar cronómetros y termómetros para evitar el sobrecalentamiento, emplear las características de autolimpieza de los hornos justo después de cocinar, y conservar limpias las superficies internas de los hornos de microondas.

Usar aparatos eficientes en relación con el uso de la energía y poner en práctica medidas para la conservación de ésta ayudan a ahorrar dinero y a proteger el **ambiente** al reducir la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera por el uso de combustible tanto en casa como en las centrales eléctricas. La combustión de cada *termia de gas natural* produce 6.4 kg de dióxido de carbono, el cual provoca el cambio climático global; 4.7 de óxidos de nitrógeno y 0.54 de hidrocarburos, productores de esmog; 2.0 de monóxido de carbono, que es tóxico, y 0.030 de dióxido de azufre, causante de lluvia ácida. Cada termia de gas natural ahorrada no sólo elimina la emisión de estos contaminantes, sino que al mismo tiempo un consumidor promedio estadounidense ahorra \$0.60. Cada kWh de electricidad conservado ahorra el consumo de 0.4 kg de carbón y evita la emisión de 1.0 kg de CO₂ y de 15 de SO₂.

TABLA 2-2

Costos de la energía para cocinar un guiso en diferentes electrodomésticos*

Electrodoméstico para cocción	Temperatura de cocción	Tiempo de cocción	Energía usada	Costo de la energía
Horno eléctrico	350 °F (177 °C)	1 h	2.0 kWh	\$0.19
Horno de convección (eléct.)	325 °F (163 °C)	45 min	1.39 kWh	\$0.13
Horno de gas	350 °F (177 °C)	1 h	0.112 termia	\$0.13
Sartén	420 °F (216 °C)	1 h	0.9 kWh	\$0.09
Horno tostador	425 °F (218 °C)	50 min	0.95 kWh	\$0.09
Olla eléctrica	200 °F (93 °C)	7 h	0.7 kWh	\$0.07
Horno de microondas	“Alta”	15 min	0.36 kWh	\$0.03

* Supone un costo unitario de 0.095/kWh de electricidad y \$1.20/termia de gas.

[Tomada de J. T. Amann, A. Wilson y K. Ackerly, *Consumer Guide to Home Energy Savings*, 9a. ed. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, D.C., 2007, pág. 163]

EJEMPLO 2-14 Costo de la energía para cocinar con estufas eléctricas y de gas

La eficiencia de los aparatos para cocinar afecta la ganancia de calor interna puesto que un aparato ineficiente consume una mayor cantidad de energía para la misma tarea, mientras el exceso de energía consumida se manifiesta como calor en el espacio cercano. La eficiencia de los quemadores abiertos se determina como 73 por ciento para las unidades eléctricas y 38 por ciento para las de gas (Fig. 2-57). Considere un quemador eléctrico de 2 kW en un lugar donde el costo unitario de la electricidad y el gas natural es de \$0.12/kWh y \$1.20/termia, respectivamente. Determine la tasa de consumo de energía y el costo unitario de ésta, tanto para el quemador eléctrico como el de gas.

SOLUCIÓN Se considera la operación de estufas eléctricas y de gas. Se determinarán la tasa de consumo de energía y el costo unitario de la energía utilizada.

Análisis La eficiencia del calentador eléctrico es de 73 por ciento. Así, un quemador que consume 2 kW de electricidad dará

$\dot{Q}_{\text{utilizada}} = (\text{entrada de energía}) \times (\text{eficiencia}) = (2 \text{ kW})(0.73) = 1.46 \text{ kW}$ de energía útil. El costo unitario de la energía utilizada es inversamente proporcional a la eficiencia, y se determina a partir de

$$\text{Costo de la energía utilizada} = \frac{\text{Costo de energía consumida}}{\text{Eficiencia}} = \frac{\$0.12/\text{kWh}}{0.73} = \$0.164/\text{kWh}$$

Si se toma en cuenta que la eficiencia de un quemador de gas es de 38 por ciento, la energía que entra a éste, el cual suministra energía utilizada a la misma tasa (1.46 kW), es

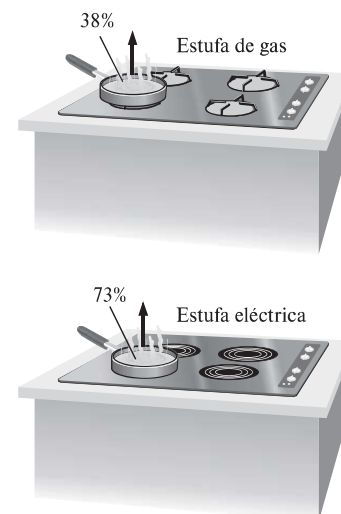
$$\dot{Q}_{\text{entrada,gas}} = \frac{\dot{Q}_{\text{utilizada}}}{\text{Eficiencia}} = \frac{1.46 \text{ kW}}{0.38} = 3.84 \text{ kW} \quad (= 13\,100 \text{ Btu/h})$$

dado que 1 kW = 3 412 Btu/h. Por lo tanto, un quemador de gas debe tener una capacidad nominal de por lo menos 13 100 Btu/h para que funcione igual que el eléctrico.

Como 1 termia = 29.3 kWh, el costo unitario de la energía utilizada en el caso de un quemador de gas se determina como

$$\begin{aligned} \text{Costo de la energía utilizada} &= \frac{\text{Costo de energía consumida}}{\text{Eficiencia}} = \frac{\$1.20/29.3 \text{ kWh}}{0.38} \\ &= \$0.108/\text{kWh} \end{aligned}$$

Comentario El costo del gas utilizado es menos de la mitad del costo unitario de la electricidad consumida. Por lo tanto, a pesar de su mayor eficiencia, cocinar con un quemador eléctrico costará 52 por ciento más en comparación con el de gas. Esto explica por qué los consumidores conscientes del costo siempre piden aparatos de gas, y por qué no es aconsejable usar electricidad para fines de calefacción.

**FIGURA 2-57**

Esquema de la unidad de calentamiento eléctrico con una eficiencia de 73 por ciento y un quemador de gas con 38 por ciento, analizados en el ejemplo 2-14.

Eficiencia de dispositivos mecánicos y eléctricos

La transferencia de energía mecánica normalmente se lleva a cabo mediante una flecha rotatoria; de ahí que el trabajo mecánico se denomine *trabajo de flecha*. Una bomba o un ventilador reciben trabajo de flecha (comúnmente de un motor eléctrico) y lo transfiere al fluido como energía mecánica (menos las pérdidas

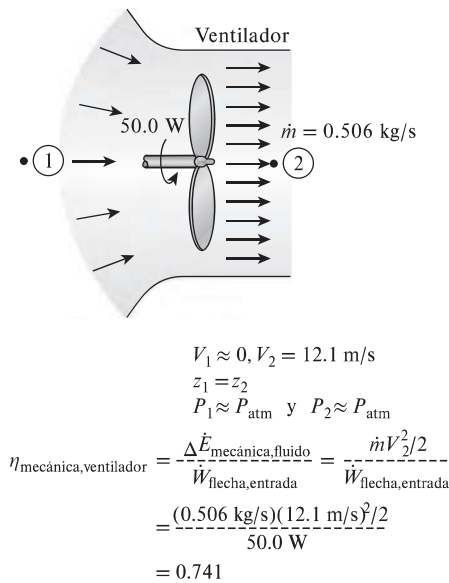


FIGURA 2-58

La eficiencia mecánica de un ventilador es la relación entre la energía cinética del aire que sale del ventilador y la entrada de potencia mecánica.

por fricción). Por otro lado, una turbina convierte la energía mecánica de un fluido en trabajo de flecha. En ausencia de irreversibilidades como la fricción, la energía mecánica se puede convertir por completo de una forma de energía mecánica a otra, y la **eficiencia mecánica** de un dispositivo o proceso se puede definir como (Fig. 2-58)

$$\eta_{\text{mecánica}} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{E_{\text{mecánica, salida}}}{E_{\text{mecánica, entrada}}} = 1 - \frac{E_{\text{mecánica, pérdida}}}{E_{\text{mecánica, entrada}}} \quad (2-44)$$

Una eficiencia de conversión menor a 100 por ciento indica que la conversión es menos perfecta y han ocurrido algunas pérdidas durante ésta; una eficiencia mecánica de 97 por ciento indica que 3 por ciento del aporte de energía mecánica se convirtió en energía térmica como resultado del calentamiento por fricción, lo cual se manifiesta como un ligero aumento en la temperatura del fluido.

Regularmente, en los sistemas de fluidos el interés se halla en incrementar en un fluido la presión, la velocidad o la elevación. Esto se consigue mediante el *suministro de energía mecánica* al fluido con una bomba, un ventilador o un compresor (nos referiremos a todos como bombas). O bien, el interés está en el proceso inverso de *extraer energía mecánica* de un fluido mediante una turbina y producir potencia mecánica en la forma de una flecha que gira y propulsa un generador o cualquier otro dispositivo rotatorio. El grado de perfección del proceso de conversión entre el trabajo mecánico suministrado o extraído y la energía mecánica del fluido se expresa mediante la **eficiencia de bomba** y la **eficiencia de turbina**, definidas como

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\text{Incremento de energía mecánica del fluido}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}}{\dot{W}_{\text{flecha, entrada}}} = \frac{\dot{W}_{\text{bomba, u}}}{\dot{W}_{\text{bomba}}} \quad (2-45)$$

donde $\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}} = \dot{E}_{\text{mecánica, salida}} - \dot{E}_{\text{mecánica, entrada}}$ es la tasa de incremento en la energía mecánica del fluido, la cual equivale a la **potencia de bombeo útil** $\dot{W}_{\text{bomba, u}}$ suministrada al fluido, y

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Disminución de energía mecánica del fluido}} = \frac{\dot{W}_{\text{flecha, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|} = \frac{\dot{W}_{\text{turbina}}}{\dot{W}_{\text{turbina, e}}} \quad (2-46)$$

donde $|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}| = \dot{E}_{\text{mecánica, entrada}} - \dot{E}_{\text{mecánica, salida}}$ es la tasa de disminución en la energía mecánica del fluido, equivalente a la potencia mecánica extraída del fluido por la turbina $\dot{W}_{\text{turbina, e}}$, y se usa el signo de valor absoluto para evitar valores negativos en la eficiencia. En bombas o turbinas, una eficiencia de 100 por ciento indica conversión perfecta entre el trabajo de flecha y la energía mecánica del fluido, valor al que es posible aproximarse (pero nunca alcanzar) cuando se reducen los efectos de fricción.

La energía eléctrica se convierte comúnmente en *energía mecánica rotatoria* mediante motores eléctricos para impulsar ventiladores, compresores, brazos robóticos, arrancadores de automóviles, etc. La efectividad de este proceso de conversión se caracteriza por la *eficiencia del motor* η_{motor} , que es la relación entre la *salida de energía mecánica* del motor y la *entrada de energía eléctrica*. La eficiencia de motores a plena carga varía entre alrededor de 35 por ciento para motores pequeños y más de 97 por ciento para los grandes de alta eficiencia. La diferencia entre la energía eléctrica consumida y la energía mecánica entregada se disipa como calor de desecho.

La eficiencia mecánica no debe confundirse con la **eficiencia del motor** y la **eficiencia del generador**, definidas como

$$\text{Motor: } \eta_{\text{motor}} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{\text{flecha, salida}}}{\dot{W}_{\text{eléctrica, entrada}}} \quad (2-47)$$

y

$$\text{Generador: } \eta_{\text{generador}} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{\dot{W}_{\text{flecha, entrada}}} \quad (2-48)$$

Una bomba normalmente viene provista de un motor, y una turbina de un generador. Por lo tanto, normalmente el interés está en la **eficiencia combinada** o **global** de las combinaciones entre bomba-motor y turbina-generador (Fig. 2-59), la cual se define como

$$\eta_{\text{bomba-motor}} = \eta_{\text{bomba}} \eta_{\text{motor}} = \frac{\dot{W}_{\text{bomba, u}}}{\dot{W}_{\text{eléctrica, entrada}}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}}{\dot{W}_{\text{eléctrica, entrada}}} \quad (2-49)$$

y

$$\eta_{\text{turbina-generador}} = \eta_{\text{turbina}} \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{\dot{W}_{\text{turbina, e}}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|} \quad (2-50)$$

Las eficiencias recién definidas varían entre 0 y 100 por ciento: el límite inferior de 0 por ciento corresponde a la conversión de toda la energía mecánica o eléctrica que entra en energía térmica, y el dispositivo en este caso funciona como un calentador de resistencia. El límite superior de 100 por ciento corresponde al caso de conversión perfecta sin fricción u otras irreversibilidades y, por lo tanto, ninguna conversión de energía mecánica o eléctrica en energía térmica.

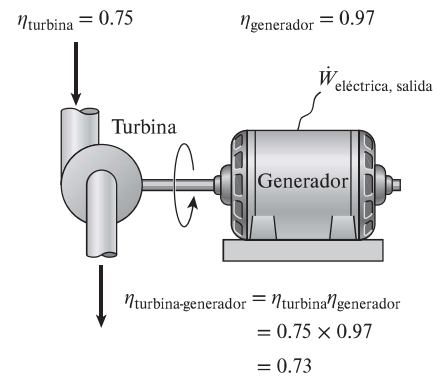


FIGURA 2-59

La eficiencia global de un conjunto de turbina y generador es el producto de las eficiencias de una y otro, y representa la fracción de la energía mecánica del fluido convertida en energía eléctrica.

EJEMPLO 2-15 Generación de potencia en una central hidráulica

Se va a generar potencia eléctrica instalando un generador de turbina hidráulica en un sitio ubicado a 70 m debajo de la superficie libre de un embalse grande de agua que puede suministrar agua a razón de 1 500 kg/s uniformemente (Fig. 2-60). Si la salida de potencia mecánica de la turbina es de 800 kW y la generación de potencia eléctrica es de 750 kW, determine la eficiencia de la turbina y la eficiencia combinada turbina-generador de esta planta. Ignore las pérdidas en tuberías.

SOLUCIÓN Para generar electricidad se instalará un conjunto turbina-generador en la parte baja de un gran embalse. Se va a determinar la eficiencia combinada de la turbina-generador y la eficiencia de la turbina.

Suposiciones 1 La elevación del agua en el embalse permanece constante. 2 La energía mecánica del agua a la salida de la turbina es insignificante.

Análisis Se toma la superficie libre del agua en el embalse como el punto 1 y a la salida de la turbina como el 2. Se toma también la salida de la turbina como el nivel de referencia ($z_2 = 0$) de manera que las energías potenciales 1 y 2 sean $ep_1 = gz_1$ y $ep_2 = 0$. La energía de flujo P/rp en ambos puntos es cero ya que 1 y 2 están abiertos a la atmósfera ($P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$). Además, la energía cinética en ambos puntos es cero ($ec_1 = ec_2 = 0$) ya que el agua en el punto 1 está prácticamente sin movimiento, y se supone que la energía cinética del agua a la salida de la turbina es muy pequeña. La energía potencial del agua en el punto 1 es

$$ep_1 = gz_1 = (9.81 \text{ m/s}^2)(70 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1\,000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 0.687 \text{ kJ/kg}$$

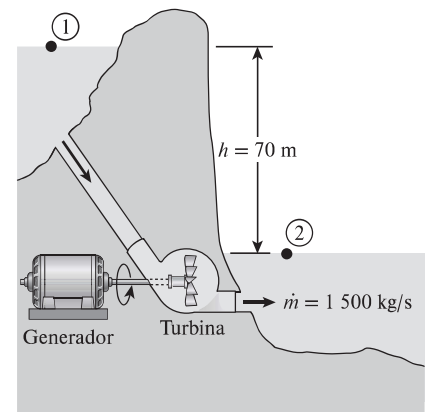


FIGURA 2-60

Esquema para el ejemplo 2-15.

Entonces, la tasa a la cual se suministra energía mecánica del agua hacia la turbina es

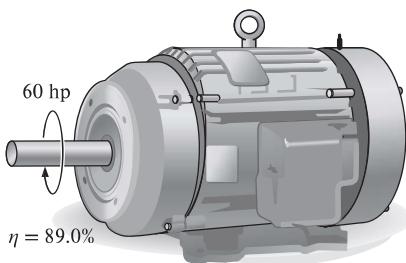
$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}} &= \dot{m}(e_{\text{mecánica, entrada}} - e_{\text{mecánica, salida}}) = \dot{m}(ep_1 - 0) = \dot{m}ep_1 \\ &= (1\,500 \text{ kg/s})(0.687 \text{ kJ/kg}) \\ &= 1\,031 \text{ kW} \end{aligned}$$

La eficiencia combinada de la turbina-generator y la eficiencia de la turbina se determinan a partir de sus definiciones

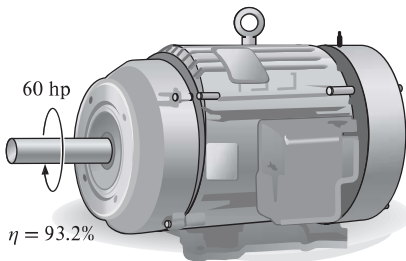
$$\begin{aligned} \eta_{\text{turbina-gen}} &= \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|} = \frac{750 \text{ kW}}{1\,031 \text{ kW}} = 0.727 \text{ o } 72.7\% \\ \eta_{\text{turbina}} &= \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|} = \frac{800 \text{ kW}}{1\,031 \text{ kW}} = 0.776 \text{ o } 77.6\% \end{aligned}$$

Por lo tanto, el embalse suministra 1 031 kW de energía mecánica hacia la turbina, donde ésta convierte 800 kW como potencia de flecha que impulsa al generador, donde se obtienen 750 kW de potencia eléctrica.

Comentario Este problema también se puede resolver tomando el punto 1 como el de entrada a la turbina, y usando la energía de flujo en vez de la energía potencial. De esta forma se obtiene el mismo resultado, ya que la energía de flujo a la entrada de la turbina es igual a la energía potencial en la superficie libre del lago.



Motor estándar



Motor de alta eficiencia

FIGURA 2-61

Esquema para el ejemplo 2-16.

EJEMPLO 2-16 Ahorros de costo relacionados con motores de alta eficiencia

Un motor eléctrico de 60 hp (es decir, que entrega 60 hp de potencia de flecha a plena carga) con una eficiencia de 89 por ciento está inservible y debe ser reemplazado por otro de alta eficiencia: 93.2 por ciento (Fig. 2-61). El motor opera 3 500 horas al año a plena carga. Tomando el costo unitario de la electricidad como \$0.08/kWh, determine la cantidad de energía y dinero ahorrados como resultado de instalar el motor de alta eficiencia en lugar del estándar. También determine el periodo de reembolso simple si los precios de compra de los motores estándar y de alta eficiencia son de \$4 520 y \$5 160, respectivamente.

SOLUCIÓN Se reemplazará un motor inservible estándar por uno de alta eficiencia y se determinará la cantidad de energía eléctrica y el dinero ahorrado, así como el periodo de reembolso simple.

Suposiciones El factor de carga del motor permanece constante en 1 (plena carga) mientras opera.

Análisis La potencia eléctrica que extrae cada motor y su diferencia se expresan como

$$\dot{W}_{\text{eléctrica entrada, estándar}} = \dot{W}_{\text{flecha}} / \eta_{\text{estándar}} = (\text{potencia nominal})(\text{factor de carga}) / \eta_{\text{estándar}}$$

$$\dot{W}_{\text{eléctrica entrada, eficiente}} = \dot{W}_{\text{flecha}} / \eta_{\text{eficiente}} = (\text{potencia nominal})(\text{factor de carga}) / \eta_{\text{eficiente}}$$

$$\text{Ahorro de energía} = \dot{W}_{\text{eléctrica entrada, estándar}} - \dot{W}_{\text{eléctrica entrada, eficiente}}$$

$$= (\text{potencia nominal})(\text{factor de carga}) \left(\frac{1}{\eta_{\text{estándar}}} - \frac{1}{\eta_{\text{eficiente}}} \right)$$

donde $\eta_{\text{estándar}}$ es la eficiencia del motor estándar y $\eta_{\text{eficiente}}$ es la del de alta eficiencia. Entonces los ahorros de costo y energía anuales relacionados con la instalación del motor de alta eficiencia son

$$\begin{aligned}
 \text{Costos de energía} &= (\text{ahorros de potencia})(\text{horas de operación}) \\
 &= (\text{potencia nominal})(\text{horas de operación}) \\
 &\quad (\text{factor de carga})(1/\eta_{\text{estándar}} - 1/\eta_{\text{eficiente}}) \\
 &= (60 \text{ hp})(0.7457 \text{ kW/hp})(3\,500 \text{ h/año})(1)(1/0.89 - 1/0.932) \\
 &= 7\,929 \text{ kWh/año}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ahorros de costo} &= (\text{ahorros de energía})(\text{costo unitario de energía}) \\
 &= (7\,929 \text{ kWh/año})(\$0.08/\text{kWh}) \\
 &= \$634/\text{año}
 \end{aligned}$$

Asimismo,

$$\begin{aligned}
 \text{Costo inicial extra} &= \text{diferencia del precio de compra} \\
 &= \$5\,160 - \$4\,520 = \$640
 \end{aligned}$$

Esto da un periodo de reembolso simple de

$$\text{Periodo de reembolso simple} = \frac{\text{Costo inicial extra}}{\text{Ahorros de costo anual}} = \frac{\$640}{\$634/\text{año}} = 1.01 \text{ años}$$

Comentario El motor de alta eficiencia paga su diferencia de precio dentro de un año debido a la energía eléctrica que ahorra. Como la vida útil de los motores eléctricos es de varios años, en este caso la compra del de mayor eficiencia es definitivamente la indicada.

2-8 ■ ENERGÍA Y AMBIENTE

La conversión de una energía a otra(s) afecta frecuentemente y en diversas formas al ambiente y al aire que respiramos, de ahí que el estudio de la energía no esté completo si se omite su impacto ambiental (Fig. 2-62). Desde 1700 los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural se han utilizado para impulsar el desarrollo industrial y las comodidades de la vida moderna, pero ha sido imposible evitar efectos colaterales indeseables. Desde la tierra para cultivo, hasta el agua para consumo humano y el aire que respiramos, el ambiente ha pagado un costo muy elevado. Efectos como el smog, la lluvia ácida, el calentamiento global y el cambio climático se deben a la combustión de los fósiles. La contaminación ambiental ha alcanzado niveles tan altos que se ha vuelto una seria amenaza para la vegetación, los animales y los seres humanos; por ejemplo, el aire contaminado es la causa de numerosas enfermedades como el asma y el cáncer. Se estima que en Estados Unidos mueren más de 60 000 personas cada año por padecimientos cardíacos y pulmonares relacionados con la contaminación del aire.

Se sabe que cientos de elementos y compuestos como el benceno y el formaldehído se emiten durante la combustión de carbón, petróleo, gas natural y leña, realizada en centrales eléctricas, motores de vehículos, hornos e incluso chimeneas. Existen varias razones para añadir ciertos compuestos a los combustibles líquidos (por ejemplo, el MTBE aumenta el índice de octano del combustible, además de que durante el invierno se usa para oxigenarlo y así reducir el smog). La fuente más grande de contaminación del aire son los motores de los vehículos, los cuales liberan contaminantes que se agrupan como hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) (Fig. 2-63). El HC es un componente importante de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y ambos términos se utilizan de manera indistinta para referirse a las emisiones hechas por los automóviles. Una parte significativa de las emisiones de HC o COV se origina por evaporación o derrame de combustible durante la recarga, o por evaporación en depósitos de gasolina con tapo-



FIGURA 2-62

Los procesos de conversión de energía suelen ir acompañados de contaminación ambiental.

© Comstock Images/Alamy RF



FIGURA 2-63

Los vehículos motorizados son la fuente más grande de contaminación del aire.

nes defectuosos que no cierran herméticamente. Los disolventes, propulsores y productos de limpieza domésticos contienen benceno, butano y otras sustancias de HC, por lo que son fuentes importantes de estas emisiones.

El incremento de la contaminación ambiental a tasas alarmantes y el aumento de la percepción del peligro que provocan hacen necesario su control por medio de leyes y tratados internacionales. En Estados Unidos, la Clean Air Act (Ley de Aire Limpio) de 1970 (cuya aprobación fue favorecida por los 14 días de alerta por smog vividos ese año en Washington) estableció límites sobre las emisiones de contaminantes hechas por las grandes centrales y los vehículos. Estos estándares se centraron en las emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, con lo que se ordenó la instalación de convertidores catalíticos en el sistema de escape de los autos nuevos para reducir emisiones de HC y CO. Además, la eliminación de plomo de la gasolina para permitir el uso de convertidores catalíticos condujo a una reducción importante de emisiones tóxicas.

Desde 1970, cada vez son menores los límites para las emisiones de HC, NO_x y CO de los automóviles: en la Ley de Aire Limpio de 1990 se establecieron requerimientos más estrictos, en particular para ozono, CO, dióxido de nitrógeno y partículas en suspensión (PM). Como resultado, instalaciones industriales y vehículos de la actualidad emiten sólo una fracción de los contaminantes que solían emitir hace algunas décadas. Las emisiones de HC de los automóviles, por ejemplo, disminuyeron cerca de 8 gpm (gramos por milla) en 1970 a 0.33 gpm en 2010. Esto representa una reducción significativa ya que muchos de los tóxicos gaseosos provenientes de los motores de los vehículos y de los combustibles líquidos son hidrocarburos.

Los niños son más susceptibles a los daños que causan los contaminantes del aire porque sus organismos están aún en desarrollo; también están más expuestos a la contaminación, ya que como suelen tener mayor actividad respiran más rápido. Las personas con problemas coronarios y pulmonares, en especial los que sufren de asma, son a quienes más les afecta el aire contaminado, lo cual es más evidente cuando aumentan los niveles de contaminación en la región donde viven.

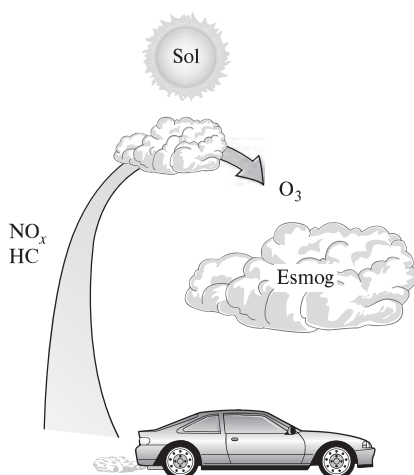


FIGURA 2-64

El ozono que se halla al nivel del suelo, componente principal del smog, se forma cuando HC y NO_x reaccionan en presencia de luz solar en días calurosos y tranquilos.

Ozono y smog

Quiénes habitan en un área metropolitana como Los Ángeles, California, probablemente están familiarizados con el smog, una neblina de color amarillo oscuro o café que durante los días calurosos y calmados del verano se acumula como una gran masa de aire estancada. El *smog* está constituido sobre todo de ozono ubicado al nivel del suelo (O_3), pero también contiene numerosas sustancias químicas, entre las que se hallan monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión, tales como hollín y polvo, y compuestos orgánicos volátiles (COV) como benceno, butano y otros hidrocarburos. El ozono dañino ubicado al nivel del suelo no debe confundirse con la alta capa de ozono útil de la estratosfera, y que protege a la Tierra de los dañinos rayos ultravioleta del Sol. El ozono ubicado al nivel del suelo es un contaminante con varios efectos adversos para la salud.

La principal fuente de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos son los motores de los automóviles. Estas sustancias reaccionan en presencia de luz solar en los días calurosos y tranquilos para formar ozono al nivel del suelo, principal componente del smog (Fig. 2-64). La formación de smog normalmente alcanza su máximo en las tardes, cuando las temperaturas son más altas y hay gran cantidad de luz solar. Aunque el smog y el ozono del nivel del suelo se forman en áreas urbanas con mucha circulación automovilística e industrias, el viento los

traslada a varios cientos de kilómetros y a otras ciudades. Esto muestra que la contaminación no sabe de límites y que es un problema global.

El *ozono* irrita los ojos y daña los alvéolos de los pulmones en los que se intercambia oxígeno y dióxido de carbono; un tejido suave y esponjoso que se va endureciendo. También causa insuficiencia respiratoria, jadeo, fatiga, dolor de cabeza y náusea, y agrava trastornos respiratorios como el asma. Toda exposición al ozono hace un poco de daño a los pulmones, al igual que el humo del cigarro, y finalmente reduce la capacidad de éstos; permanecer en interiores y reducir la actividad física durante los días con mucho smog reduce el daño. El ozono también afecta a la vegetación al dañar los tejidos de las hojas. Para mejorar la calidad del aire en áreas con los peores problemas de ozono, se introdujo la gasolina reformulada (RFG) que contiene al menos 2 por ciento de oxígeno, y cuyo uso obligatorio en muchas zonas proclives al smog ha dado como resultado una reducción importante en la emisión no sólo de ozono sino también de otros contaminantes.

Otro de los grandes contaminantes del smog es el *monóxido de carbono*, un gas venenoso sin olor ni color producido sobre todo por los motores de vehículos y que se acumula en grandes cantidades en áreas con congestión de tránsito. Evita que los órganos del cuerpo se oxigenen lo suficiente al enlazarse con los glóbulos rojos portadores de oxígeno. En bajas concentraciones, el monóxido de carbono disminuye la cantidad de oxígeno suministrada al cerebro y otros órganos y músculos, deteriora las reacciones y reflejos del cuerpo y daña el juicio; por tales razones representa una amenaza seria para las personas con alguna enfermedad del corazón derivada de la frágil condición de su sistema circulatorio, y para los fetos, cuyo cerebro en desarrollo tiene ciertos requerimientos de oxígeno. En concentraciones altas, el monóxido de carbono puede ser fatal, de acuerdo con las numerosas evidencias de muertes causadas por automóviles encendidos en garajes cerrados, o por los gases de escape que entran a los automóviles.

El smog también contiene partículas suspendidas como polvo y hollín emitidas por autos e instalaciones industriales. Esta clase de partículas irritan los ojos y los pulmones porque contienen ácidos y metales.

Lluvia ácida

Los combustibles fósiles son mezclas de varias sustancias químicas, entre las que se hallan pequeñas cantidades de azufre que reaccionan con el oxígeno para formar dióxido de azufre (SO_2), un contaminante del aire. La fuente principal de SO_2 son las centrales eléctricas que queman carbón mineral con un alto contenido de azufre. La Ley de Aire Limpio de 1970 limitó en gran medida las emisiones de SO_2 , lo que obligó a las centrales a instalar purificadores de SO_2 , gasificar el carbón (para recuperar el azufre) o cambiarlo por uno con bajo contenido de azufre. Los automóviles también emiten SO_2 puesto que la gasolina y el diésel contienen pequeñas cantidades de azufre. Las erupciones volcánicas y los manantiales calientes también liberan óxidos de azufre reconocibles por su peculiar olor a huevo podrido.

Los óxidos de azufre y los óxidos nítricos reaccionan en lo alto de la atmósfera con vapor de agua y otras sustancias químicas, en presencia de luz solar, para formar ácidos sulfúrico y nítrico (Fig. 2-65). Estos ácidos normalmente se disuelven en las gotas de agua suspendidas en las nubes o la niebla, volviéndolas tan ácidas como el jugo de limón, para después ser transportadas del aire al suelo por la lluvia o la nieve. Este fenómeno se conoce como **lluvia ácida**. El suelo es capaz de neutralizar cierta cantidad de ácido, pero las cantidades que producen las centra-

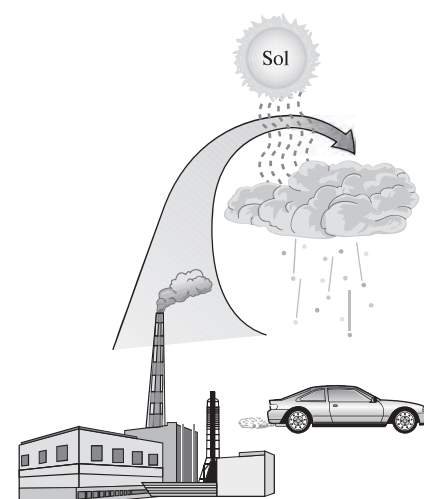


FIGURA 2-65

El ácido sulfúrico y el ácido nítrico se forman cuando los óxidos de azufre y los óxidos nítricos reaccionan en presencia de luz solar con vapor de agua y otras sustancias químicas que están en la atmósfera.

les eléctricas que usan carbón mineral barato con alto contenido de azufre superan esta capacidad y, como resultado, muchos lagos y ríos en áreas industriales como Nueva York, Pennsylvania y Michigan se han vuelto demasiado ácidos para que vivan los peces. Los bosques de estas áreas también experimentan una muerte lenta debido a que absorben los ácidos por sus hojas, nervaduras y raíces. Incluso las estructuras construidas con mármol se deterioran debido a la lluvia ácida. La magnitud del problema no se reconoció sino hasta principios de la década de los años 1970 y desde entonces se han tomado medidas importantes para reducir en forma drástica las emisiones de dióxido de azufre mediante la instalación de purificadores en plantas industriales y a través de la desulfurización del carbón antes de su combustión.

Efecto invernadero: calentamiento global y cambio climático

Es probable que haya notado que cuando deja su auto bajo la luz solar directa en un día soleado, el interior se calienta mucho más que el aire del exterior, y quizá se ha preguntado por qué el carro actúa como una trampa de calor. Esto se debe a que el espesor del vidrio transmite más de 90 por ciento de la radiación visible y es prácticamente opaco (no transparente) a la radiación infrarroja situada en el intervalo de mayor longitud de onda. Por lo tanto, el vidrio permite que la radiación solar entre libremente pero bloquea la radiación infrarroja que emiten las superficies interiores. Esto causa en el interior un aumento de la temperatura como resultado de la acumulación de energía térmica. Este efecto de calentamiento se conoce como **efecto invernadero**, puesto que se aprovecha sobre todo en los invernaderos.

El efecto invernadero también se experimenta a gran escala en la Tierra, cuya superficie se calienta durante el día como resultado de la absorción de energía solar y se enfría por la noche al radiar parte de su energía hacia el espacio en forma de radiación infrarroja. El dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua y algunos otros gases como el metano y los óxidos de nitrógeno actúan como una sábana y mantienen caliente a nuestro planeta durante la noche al bloquear el calor que éste irradia (Fig. 2-66). Por consiguiente, se les llama “gases de efecto invernadero”, de los cuales el CO_2 es el principal componente. Comúnmente, el vapor de agua se elimina de esta lista dado que desciende en forma de lluvia o nieve como parte del ciclo del agua; por lo tanto, las actividades humanas para producir agua (por ejemplo, quemar combustibles fósiles) no marcan la diferencia en su concentración dentro de la atmósfera (que sobre todo se debe a la evaporación de ríos, lagos, océanos, etc.). Sin embargo, el CO_2 es diferente, porque las actividades de la gente sí marcan una diferencia en la concentración de esta sustancia en la atmósfera.

Aunque el efecto invernadero hace posible la vida en la Tierra, ya que éste la mantiene caliente (cerca de $30\text{ }^\circ\text{C}$ más caliente), pero las cantidades excesivas de estos gases de efecto invernadero perturban el delicado equilibrio al atrapar demasiada energía, lo que causa el incremento de la temperatura promedio del planeta y cambios en el clima de algunos lugares. Estas consecuencias indeseables del efecto invernadero se denominan **calentamiento global** o **cambio climático global**.

El cambio climático global se debe al uso excesivo de combustibles fósiles como carbón, derivados del petróleo y gas natural en las centrales eléctricas, transporte, construcción y fabricación, y ha sido motivo de preocupación en décadas recientes. En 2016 fue liberado a la atmósfera en forma de CO_2 un total de 9 900 millones de toneladas de carbón. La concentración actual de CO_2 en la



Figura 2-66

El efecto invernadero en la Tierra.

atmósfera es de alrededor de 400 ppm (o 0.04 por ciento), es decir, 30 por ciento más que la concentración de hace un siglo, y se prevé que aumentará a más de 700 ppm en 2100. En condiciones normales, la vegetación consume CO₂ y libera O₂ durante la fotosíntesis, con lo que mantiene bajo control la concentración de CO₂ en la atmósfera. Un árbol maduro en desarrollo consume 12 kg de CO₂ al año y exhala suficiente oxígeno para mantener a una familia de cuatro integrantes. Sin embargo, la deforestación y el enorme incremento en la producción de CO₂ en las últimas décadas han perturbado este equilibrio.

En un informe de 1995, los principales científicos del mundo que estudian el clima concluyeron que la Tierra ya se ha calentado cerca de 0.5 °C durante el último siglo, y estiman que la temperatura de nuestro planeta aumentará otros 2 °C para el año 2100. Se teme que un aumento de esta magnitud cause graves daños en los patrones climáticos: intensas tormentas y lluvias que provocarán inundaciones en algunos sitios y sequías en otros, grandes inundaciones debidas al derretimiento del hielo en los polos, pérdida de zonas húmedas y áreas costeras por el aumento del nivel del mar, variaciones en el suministro de agua, cambios en el ecosistema por la incapacidad de algunos animales y especies vegetales para ajustarse a los cambios, aumento de las enfermedades epidémicas debido a las mayores temperaturas, efectos secundarios adversos en la salud humana y malas condiciones socioeconómicas en algunas regiones.

La gravedad de esta amenaza ha llevado a las Naciones Unidas a establecer un comité a cargo del cambio climático. Una reunión cumbre en 1992 en Río de Janeiro, Brasil, atrajo la atención mundial sobre el problema. El acuerdo que preparó el comité para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero fue firmado por 162 naciones. En la reunión de 1997 en Kyoto (Japón), los países industrializados adoptaron el Protocolo de Kyoto que los compromete a reducir, entre 2008 y 2012, en 5 por ciento menos a los niveles registrados en 1990 sus emisiones de CO₂ y otros gases causantes del efecto invernadero. En diciembre de 2011, en Durban, Sudáfrica, algunos países acordaron suscribir un nuevo tratado que obligará a los principales países contaminantes a limitar sus emisiones de gases invernadero. El periodo del Protocolo de Kioto se extendió y concedió cinco años más para finalizar un convenio más amplio. Los países acordaron trabajar en un nuevo tratado jurídicamente vinculante que tuviera la finalidad de reducir los gases invernadero. El nuevo tratado será decidido para el año 2015 y entrará en vigor en 2020.

En 2015, la Conferencia sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas se llevó a cabo en París, y el resultado fue el *Acuerdo de París* sobre la reducción del cambio climático. La conferencia incluyó participantes de 196 países. El resultado principal de la conferencia fue limitar la advertencia global a menos de 2 °C comparada con la de los tiempos preindustriales. Conforme al acuerdo, deben eliminarse las emisiones tipo invernadero de origen humano durante la segunda mitad del siglo XXI.

Las emisiones de gases de invernadero pueden reducirse incrementando los esfuerzos de conservación y mejorando las eficiencias de conversión, mientras se cubren las nuevas demandas energéticas mediante el uso de energía renovable (como la hidroeléctrica, solar, eólica y geotérmica) en lugar de combustibles fósiles.

Estados Unidos es el principal país productor de gases invernadero, con más de cinco toneladas de emisiones de carbono por persona al año. Las principales fuentes de emisiones de gas son el sector industrial y del transporte. Cada kilowatt-hora de electricidad producida por una planta de energía alimentada por combustible fósil produce entre 0.6 y 1.0 kg (1.3 a 2.2 lbm) de bióxido de carbono. Cada litro de gasolina quemado por un vehículo produce aproximadamente 2.5 kg de

**FIGURA 2-67**

El automóvil común produce varias veces su peso en CO_2 cada año (si se conduce 13 500 millas al año, se consumen 600 galones de gasolina y produce 20 lbm de CO_2 por galón).

© milehightraveler/Stockphoto/Getty Images RF

**FIGURA 2-68**

Las energías renovables como la eólica se llaman “energías verdes” ya que no emiten contaminantes o gases de invernadero.

© Bear Dancer Studios/Mark Dierker RF

CO_2 (es decir, cada galón de gasolina quemada produce alrededor de 20 lbm de CO_2). Un automóvil promedio en Estados Unidos viaja casi 13 500 millas al año y consume cerca de 600 galones de gasolina. Por lo tanto, un automóvil libera cerca de 12 000 lbm de CO_2 a la atmósfera cada año, lo que es aproximadamente cuatro veces el peso de un automóvil típico (Fig. 2-67). Adquirir un automóvil de consumo eficiente de energía, que quemé menos combustible al recorrer la misma distancia, así como una conducción vehicular consciente, son medidas que podrían reducir significativamente esta y otras emisiones. Restringir el consumo de combustible también ahorra dinero y salva al medio ambiente. Por ejemplo, elegir un vehículo que rinda 30 en lugar de 20 millas por galón impedirá que dos toneladas de CO_2 se liberen en la atmósfera cada año, lo que a su vez reduciría el gasto en combustible unos 500 dólares al año (en condiciones de conducción normales de 13 500 millas al año y con un costo de combustible de 2.2 dólares/gal).

Tras explicar que las considerables cantidades de contaminantes emitidas debido a que la energía química de los combustibles fósiles es convertida vía la combustión en energía térmica, mecánica o eléctrica, parece claro que tanto las centrales eléctricas, como los vehículos motorizados e incluso las estufas tienen la culpa de la contaminación del aire. En contraste, ninguna contaminación es producida cuando la electricidad se convierte en energía térmica, química o mecánica; entonces, se promueve a los automóviles eléctricos como vehículos de “cero emisiones” y a la generalización de su uso como la solución última para el problema de la contaminación del aire. Sin embargo, se debe recordar que la electricidad usada por estos automóviles se genera en alguna otra parte quemando combustible y, por lo tanto, emitiendo contaminación. Así, cada vez que un automóvil eléctrico consume 1 kWh de electricidad, tiene responsabilidad en la contaminación emitida debido a que en alguna otra parte se generó el 1 kWh (más las pérdidas de conversión y transmisión). Sólo es posible afirmar que los automóviles eléctricos son vehículos de cero emisiones cuando la electricidad que consumen se genera mediante recursos renovables libres de emisiones como la energía hidroeléctrica, solar, eólica y geotérmica (Fig. 2-68). De ahí que se deba alentar a nivel mundial el uso de energía renovable, con incentivos y según sea necesario, para hacer de la Tierra un mejor lugar para vivir. En décadas recientes, los avances en termodinámica han contribuido en gran medida a mejorar las eficiencias de conversión (en algunos casos duplicándolas) y, por consiguiente, a reducir la contaminación. Como individuos podemos contribuir tomando medidas de conservación de energía y haciendo de la eficiencia energética una prioridad grande al momento de realizar alguna compra.

EJEMPLO 2-17 Reducción de la contaminación del aire mediante calentamiento geotérmico

Una planta de energía geotérmica en Nevada, Estados Unidos, genera electricidad por medio de agua geotérmica extraída a $180\text{ }^\circ\text{C}$ y reinyectada de nuevo al suelo a $85\text{ }^\circ\text{C}$. Se propone utilizar la salmuera reinyectada para calentar edificios residenciales y comerciales y de acuerdo con los cálculos se prevé que con el sistema de calentamiento geotérmico es posible ahorrar 18 millones de termias de gas natural al año. Determine la cantidad de las emisiones de NO_x y CO_2 que el sistema geotérmico ahorrará al año. Considere que el promedio de emisiones de NO_x y CO_2 de los hornos de gas es de 0.0047 kg/termia y 6.4 kg/termia , respectivamente.

SOLUCIÓN Los sistemas de calentamiento de gas de cierta área están siendo reemplazados por otro de calentamiento geotérmico. Se determinarán las cantidades de las emisiones de NO_x y CO_2 ahorradas por año.

Análisis Las emisiones ahorradas por año son equivalentes a las cantidades que emiten los hornos cuando se queman 18 millones de termias de gas natural,

$$\begin{aligned} \text{Ahorros de NO}_x &= (\text{emisión de NO}_x \text{ por termia}) (\text{número de termias por año}) \\ &= (0.0047 \text{ kg/termia})(18 \times 10^6 \text{ termias/año}) \\ &= 8.5 \times 10^4 \text{ kg/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ahorros de CO}_2 &= (\text{emisión de CO}_2 \text{ por termia}) (\text{número de termias por año}) \\ &= (6.4 \text{ kg/termia})(18 \times 10^6 \text{ termias/año}) \\ &= 1.2 \times 10^8 \text{ kg/año} \end{aligned}$$

Comentario Un automóvil común genera en carretera casi 8.5 kg del NO_x y 6 000 kg de CO₂ al año. Por lo tanto, el impacto ambiental de reemplazar los sistemas de calentamiento de gas en el área por el sistema de calentamiento geotérmico equivale a retirar 10 000 automóviles por emisión de NO_x y sacar 20 000 automóviles por emisión de CO₂. El sistema propuesto tendría un efecto importante en la reducción del smog en el área.

TEMA DE INTERÉS ESPECIAL*

Mecanismos de transferencia de calor

El calor se puede transferir de tres formas distintas: *conducción*, *convección* y *radiación*; se dará una descripción breve de cada uno de éstas para familiarizar al lector con los mecanismos básicos de transferencia de calor. Todos los modos de transferencia de calor requieren que exista una diferencia de temperatura y todos pasan del ámbito de alta temperatura a uno de menor temperatura.

La **conducción** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases; en estos últimos dos la conducción se debe a las colisiones de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe a la combinación de la vibración de las moléculas en una red y el transporte de energía mediante electrones libres. Por ejemplo, una bebida enlatada fría que se halla en una habitación caliente, alcanza por conducción la temperatura de la habitación como resultado de la transferencia de calor de ésta a la bebida, a través de la lata de aluminio (Fig. 2-69).

Se observa que la tasa de conducción de calor \dot{Q}_{cond} por una capa de espesor constante Δx es proporcional a la diferencia de temperatura ΔT en la capa y el área A normal a la dirección de transferencia de calor, mientras que es inversamente proporcional al espesor de la capa. Por lo tanto,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (2-51)$$

donde la constante de proporcionalidad k es la **conductividad térmica** del material, la cual es una medida de la capacidad del material para conducir calor (tabla 2-3). Materiales como el cobre y la plata, que son buenos conductores eléctricos, también lo son del calor y por lo tanto tienen valores altos de k . El hule, la madera y el poliestireno son malos conductores del calor y, por consiguiente, tienen valores bajos de k .

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación anterior se reduce a la forma diferencial

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (2-52)$$

* Se puede prescindir de esta sección sin que se pierda continuidad.

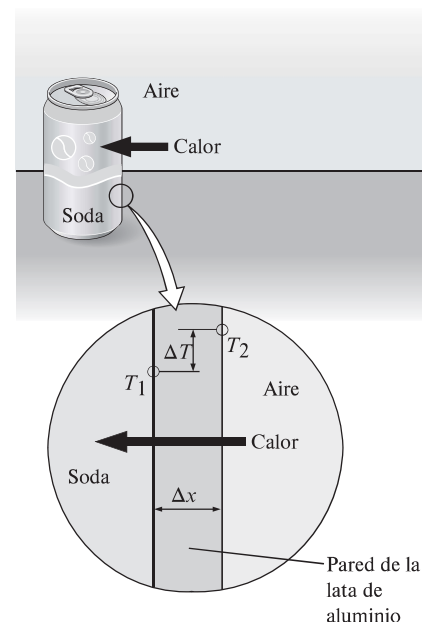


FIGURA 2-69

Conducción de calor del aire caliente a una lata fría de bebida carbonatada a través de la pared de aluminio de la lata.

TABLA 2-3

Conductividades térmicas de algunos materiales en condiciones ambiente

Material	Conductividad térmica, $W/m \cdot K$
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (t)	8.54
Vidrio	1.4
Ladrillo	0.72
Agua (t)	0.613
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Hule suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

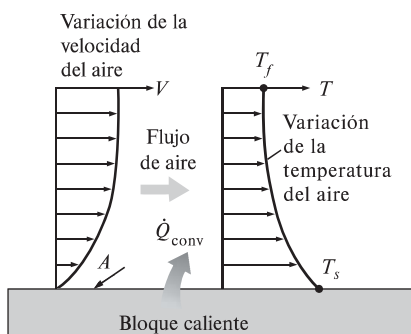


FIGURA 2-70

Transferencia de calor por convección desde una superficie caliente hacia el aire.

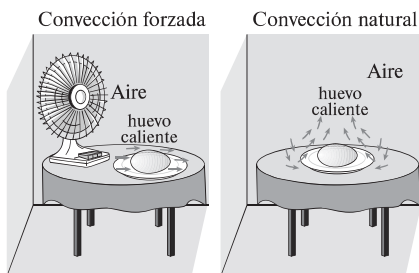


FIGURA 2-71

Enfriamiento de un huevo hervido por convección forzada y natural.

que se conoce como **ley de Fourier de conducción de calor**, e indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al *gradiente de temperatura* en esa misma dirección. El calor es conducido en la dirección de temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando la temperatura disminuye con x creciente. Por consiguiente, se agrega un signo negativo en la ecuación 2-52 para hacer de la transferencia de calor en la dirección x positiva una cantidad positiva.

La temperatura es una medida de la energía cinética de las moléculas. En un líquido o gas, esta energía se debe al movimiento aleatorio de sus moléculas, así como a sus movimientos de vibración y rotación. Cuando colisionan dos moléculas que poseen energías cinéticas distintas, parte de esta energía proveniente de la molécula más energética (mayor temperatura) se transfiere a la de menor energía (menor temperatura), de modo muy similar a cuando colisionan dos bolas elásticas de igual masa a diferentes velocidades: parte de la energía cinética de la bola más rápida se transfiere a la más lenta.

En los sólidos, la conducción de calor se debe a dos efectos: a las ondas vibratorias de la red inducidas por los movimientos vibratorios de las moléculas situadas en una posición relativamente fija en una forma periódica llamada red *crystalina*, y a la energía transportada a través del flujo libre de electrones en el sólido. La conductividad térmica de un sólido se obtiene al sumar las componentes de la red y electrónicos. La conductividad térmica de los metales puros se debe sobre todo al componente electrónico, mientras que la de los no metales se debe más que nada al componente de la red cristalina. El componente de la red cristalina de la conductividad térmica depende en gran medida de la forma en que están dispuestas las moléculas; por ejemplo, la de un sólido cristalino altamente ordenado como el diamante es mucho mayor que las de metales puros (tabla 2-3).

La **convección** es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de *conducción* y *movimiento del fluido*: mientras más rápido sea éste mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento en masa del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. El movimiento de la masa del fluido incrementa la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las tasas de transferencia de calor.

Considere el enfriamiento de un bloque caliente mediante aire frío aplicado sobre su superficie (Fig. 2-70). La energía se transfiere primero a la capa de aire adyacente a la superficie del bloque por conducción. Esta energía se transfiere después desde la superficie por convección; es decir, por los efectos combinados de conducción dentro del aire, debidos al movimiento aleatorio de sus moléculas y a su movimiento macroscópico o en masa, que elimina el aire caliente cerca de la superficie y lo reemplaza por aire frío.

Hay **convección forzada** si el fluido es *forzado* a fluir en un tubo o sobre una superficie por medios externos, como un ventilador, una bomba o el viento. En cambio, se trata de **convección libre** (o **natural**) si el movimiento del fluido es ocasionado por las fuerzas de flotación inducidas por diferencias de densidad debidas a la variación de temperatura en el fluido (Fig. 2-71). Por ejemplo, en ausencia de un ventilador, la transferencia de calor desde la superficie del bloque caliente en la figura 2-70 será por convección natural puesto que en este caso cualquier movimiento del aire se deberá al ascenso del aire más caliente (y, por lo tanto, más ligero) cercano a la superficie, y al descenso del aire más frío (por consiguiente, más denso) para ocupar su lugar. La transferencia de calor entre el bloque y el aire circundante será por conducción si la diferencia

de temperatura entre el aire y el bloque no es demasiado grande para vencer la resistencia del aire a moverse y así iniciar las corrientes de convección natural.

Los procesos de transferencia de calor en los que hay un *cambio de fase* de un fluido se consideran también como convección debido al movimiento del fluido durante el proceso; por ejemplo, el ascenso de las burbujas de vapor durante la *ebullición* o el descenso de gotas de líquido durante la *condensación*.

La tasa de transferencia de calor por convección \dot{Q}_{conv} se determina a partir de la **ley de enfriamiento de Newton**, expresada como

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_s - T_f) \quad (\text{W}) \quad (2-53)$$

donde h es el **coeficiente de transferencia de calor por convección**, A es la superficie en la cual tiene lugar la transferencia de calor, T_s es la temperatura de la superficie y T_f es la temperatura del fluido lejos de la superficie. (En la superficie, la temperatura del fluido es igual a la temperatura superficial del sólido.)

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido, sino un parámetro determinado de modo experimental cuyo valor depende de todas las variables que afectan la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad volumétrica del fluido. Los valores representativos de h , en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, se encuentran en el intervalo entre 2 y 25 para la convección libre de gases, 50 y 1 000 para la convección libre de líquidos, 25 y 250 para la convección forzada de gases, 50 a 20 000 para la convección forzada de líquidos y 2 500 a 100 000 para la convección en procesos de ebullición y condensación.

La **radiación** es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio (Fig. 2-72). De hecho, este tipo de transferencia es la más rápida (se lleva a cabo a la velocidad de la luz) y no experimenta ninguna atenuación en el vacío. Éste es exactamente el modo como la energía del Sol llega a la Tierra.

En los estudios de transferencia de calor, el interés se halla en la **radiación térmica**, que es la forma de radiación que emiten los cuerpos debido a su temperatura, y difiere de las otras formas de radiación electromagnética como los rayos X, gamma, microondas, ondas de radio y televisión que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica.

La radiación es un **fenómeno volumétrico**, y los sólidos, líquidos y gases, emiten, absorben o transmiten radiación de distintos grados. Sin embargo, la radiación es considerada en general como un **fenómeno superficial** para sólidos opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, puesto que la radiación emitida por las regiones interiores de estos materiales nunca alcanza la superficie, mientras que la radiación que incide en esos cuerpos se absorbe comúnmente dentro de unas micras desde la superficie.

La tasa máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura absoluta T_s se determina mediante la **ley de Stefan-Boltzmann** como

$$\dot{Q}_{\text{emitida,máx}} = \sigma AT_s^4 \quad (\text{W}) \quad (2-54)$$

donde A es el área superficial y $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta tasa máxima se llama **cuerpo negro**, y la radiación emitida por un cuerpo negro se denomina **radiación de cuerpo negro**. La radiación que emiten todas las

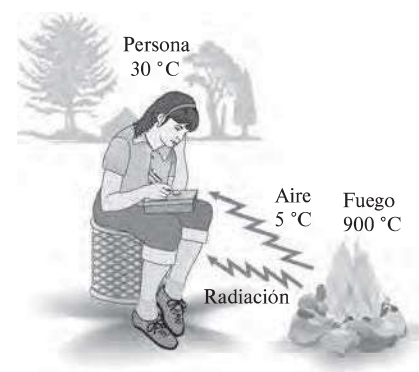


FIGURA 2-72

A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos, incluso cuando están separados por un medio más frío que ambos.

TABLA 2-4

Emisividad de algunos materiales a 300 K

Material	Emisividad
Papel aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

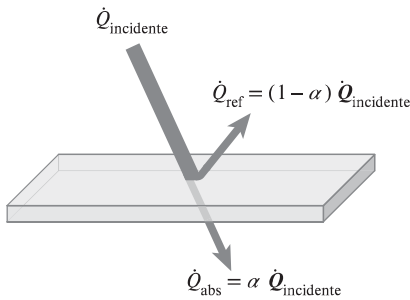


FIGURA 2-73

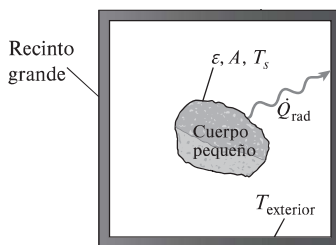
Absorción de radiación incidente sobre una superficie opaca de absorbancia α .

FIGURA 2-74

Transferencia de calor por radiación entre un cuerpo y las superficies internas de un recinto mucho más grande que lo rodea por completo.

superficies *reales* es menor que la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (2-55)$$

donde ε es la **emisividad** de la superficie. Esta propiedad, cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, es una medida de qué tan cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro, para el cual $\varepsilon = 1$. En la tabla 2-4 se dan las emisividades de algunas superficies.

Otra propiedad de radiación importante de una superficie es su **absorbancia**, α , que es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie absorbida por ésta, y al igual que la emisividad, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él. Esto es, un cuerpo negro es tanto un absorbedor perfecto ($\alpha = 1$) como un emisor perfecto.

En general ε y α de una superficie dependen de la temperatura y la longitud de onda de la radiación. La **ley de Kirchhoff** de la radiación establece que la emisividad y la absorbancia de una superficie son iguales con las mismas temperatura y longitud de onda. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas se ignora la dependencia que ε y α tienen de la temperatura y la longitud de onda, por lo que la absorbancia promedio de la superficie se considera igual a su emisividad promedio. La tasa a la que una superficie absorbe radiación se determina a partir de (Fig. 2-73)

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incidente}} \quad (\text{W}) \quad (2-56)$$

donde $\dot{Q}_{\text{incidente}}$ es la tasa a la que la radiación incide sobre la superficie y α es la absorbancia de la superficie. En superficies opacas (no transparentes), la porción de la radiación incidente no absorbida se refleja.

La diferencia entre las tasas de radiación emitida por la superficie y de radiación absorbida es la transferencia *neta* de calor por radiación. Si la tasa de absorción de radiación es mayor que la de emisión de radiación, se dice que la superficie está *ganando* energía por radiación. De otro modo, se afirma que la superficie está *perdiendo* energía por radiación. Determinar la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre dos superficies generalmente es complicado porque depende de las propiedades de las superficies, la orientación relativa entre ellas y la interacción del medio entre las superficies con la radiación. Sin embargo, en el caso especial de una superficie relativamente pequeña de emisividad ε y de área superficial A a temperatura absoluta T_s , que está completamente encerrada por una superficie mucho más grande a temperatura absoluta $T_{\text{alrededores}}$, separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación (es decir, la cantidad de radiación emitida, absorbida o dispersada por el medio es insignificante), la tasa neta de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se determina a partir de (Fig. 2-74)

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{exterior}}^4) \quad (\text{W}) \quad (2-57)$$

Para este caso especial, la emisividad y el área de la superficie circundante no tienen ningún efecto en la transferencia neta de calor por radiación.

EJEMPLO 2-18 Transferencia de calor desde una persona

Una persona está de pie en una habitación con brisa a 20 °C. Determine la tasa total de transferencia de calor desde esta persona, si el área superficial expuesta y la temperatura de su piel son 1.6 m² y 29 °C, respectivamente,

y el coeficiente de transferencia de calor por convección es 6 de $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (Fig. 2-75).

SOLUCIÓN Una persona está quieta en un cuarto con brisa y se debe determinar la tasa de pérdida total de calor desde la persona.

Suposiciones **1** El coeficiente de transferencia de calor y la emisividad son constantes y uniformes. **2** La conducción de calor a través de los pies es insignificante. **3** La pérdida de calor por evaporación es insignificante.

Análisis La transferencia de calor entre la persona y el aire en la habitación será por convección (en lugar de conducción), puesto que es concebible que el aire en la vecindad de la piel o ropa se calentará y ascenderá como resultado de la transferencia térmica del cuerpo, iniciando corrientes naturales de convección. Al parecer, en este caso el valor determinado experimentalmente para la rapidez de transferencia de calor por convección es de 6 W por unidad de área superficial (m^2) por unidad de diferencia de temperatura (en K o $^\circ\text{C}$) entre la persona y el aire en la lejanía de ésta. De modo que la tasa de transferencia de calor por convección desde la persona hacia el aire de la habitación se obtiene de la ecuación 2-53,

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{conv}} &= hA(T_s - T_f) \\ &= (6 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(1.6 \text{ m}^2)(29 - 20) ^\circ\text{C} \\ &= 86.4 \text{ W}\end{aligned}$$

La persona también perderá calor por radiación hacia las superficies de las paredes circundantes. Para simplificar, considere las temperaturas de las superficies de las paredes, el techo y el piso iguales a la temperatura del aire, pero observe que esto no es necesariamente correcto, ya que estas superficies pueden hallarse a una temperatura mayor o menor que la temperatura promedio del aire de la habitación, dependiendo de las condiciones exteriores y de la estructura de las paredes. Si se considera que el aire no interviene con la radiación y que la persona está completamente encerrada por las superficies que la rodean, la tasa neta de transferencia de calor por radiación del cuerpo a las paredes circundantes, el techo y el piso, de acuerdo con la ecuación 2-57, es

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad}} &= \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{\text{entorno}}^4) \\ &= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.6 \text{ m}^2) \times [(29 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{ K}^4 \\ &= 81.7 \text{ W}\end{aligned}$$

Observe que deben usarse temperaturas *absolutas* en los cálculos de radiación y que se utilizó el valor de emisividad para piel y ropa a temperatura ambiente, porque se espera que esta propiedad no cambie de manera considerable a una temperatura ligeramente más alta.

Así, la rapidez de transferencia de calor total del cuerpo se determina al sumar estas dos cantidades, lo que da como resultado

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = 86.4 + 81.7 = \mathbf{168.1 \text{ W}}$$

La transferencia de calor sería mucho mayor si la persona no hubiera estado vestida, pues la temperatura de la superficie expuesta sería mayor. Por esto la ropa cumple con una importante función: servir como una barrera aislante contra la transferencia de calor.

Comentario En los cálculos anteriores se ignoró la transferencia de calor por conducción que se da de los pies hacia el suelo, que suele ser muy pequeña. Tampoco se consideró la transferencia de calor desde la piel por transpiración, que es el modo dominante de transferencia de calor en ambientes calientes.

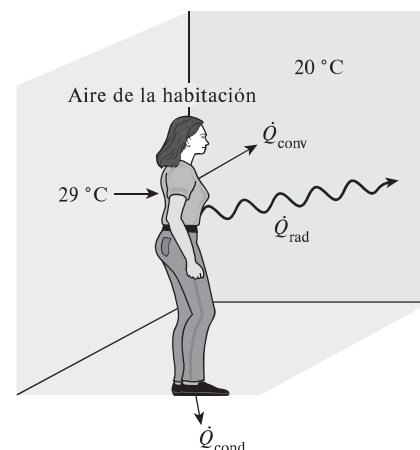


FIGURA 2-75

Transferencia de calor desde una persona, descrita en el ejemplo 2-18.

RESUMEN

La suma de todas las formas de energía de un sistema se llama *energía total*, que consta de las energías interna, cinética y potencial para sistemas simples compresibles. La *energía interna* representa la energía molecular de un sistema y puede existir en las formas sensible, latente, química y nuclear.

El *flujo másico* \dot{m} se define como la cantidad de masa que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, y se relaciona con el *flujo volumétrico* \dot{V} , el cual es el volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, mediante

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho A_1 V_{\text{promedio}}$$

La tasa de flujo de energía relacionada con un fluido que fluye a una tasa de \dot{m} es

$$\dot{E} = \dot{m}e$$

que es análoga a $E = me$.

La *energía mecánica* se define como *la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como puede ser una turbina ideal*. Se expresa por unidad de masa y en forma de tasa como

$$e_{\text{mecánica}} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz$$

y

$$\dot{E}_{\text{mecánica}} = \dot{m}e_{\text{mecánica}} = \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

donde P/ρ es la *energía de flujo*, $V^2/2$ es la *energía cinética* y gz es la *energía potencial* del fluido por unidad de masa.

La energía puede cruzar las fronteras de un sistema cerrado en la forma de calor o trabajo. Para los volúmenes de control, la energía se puede transportar también mediante la masa. Si la transferencia de energía se debe a una diferencia de temperatura entre un sistema cerrado y el exterior, es *calor*; de lo contrario, es *trabajo*.

El trabajo es la energía transferida cuando una fuerza actúa sobre un sistema a lo largo de una distancia. Varias formas de trabajo se expresan como sigue:

$$\text{Trabajo eléctrico: } W_e = VI\Delta t$$

$$\text{Trabajo de flecha: } W_{\text{flecha}} = 2\pi nT$$

$$\text{Trabajo de resorte: } W_{\text{resorte}} = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$$

La *primera ley de la termodinámica* es en esencia una expresión del principio de la conservación de la energía, conocido también como *balance de energía*. El balance de masa y energía generales para *cualquier sistema* que experimenta *cualquier proceso* se puede expresar como

$$\underbrace{E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}}}_{\text{Transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\text{Cambio en las energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \quad (\text{kJ})$$

También se puede expresar en la *forma de tasa* como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia neta de energía por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{dE_{\text{sistema}}/dt}_{\text{Tasa de cambio en las energías interna, cinética, potencial, etcétera}} \quad (\text{kW})$$

Las eficiencias de varios dispositivos se definen como

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}}{\dot{W}_{\text{flecha, entrada}}} = \frac{\dot{W}_{\text{bomba, u}}}{\dot{W}_{\text{bomba}}}$$

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{\dot{W}_{\text{flecha, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|} = \frac{\dot{W}_{\text{turbina}}}{\dot{W}_{\text{turbina, e}}}$$

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{\text{flecha, salida}}}{\dot{W}_{\text{eléctrica, entrada}}}$$

$$\eta_{\text{generador}} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{\dot{W}_{\text{flecha, entrada}}}$$

$$\eta_{\text{bomba-motor}} = \eta_{\text{bomba}} \eta_{\text{motor}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}}{\dot{W}_{\text{eléctrica, entrada}}}$$

$$\eta_{\text{turbina-generador}} = \eta_{\text{turbina}} \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica, salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica, fluido}}|}$$

La conversión de energía de una forma a otra está asociada con frecuencia con efectos adversos en el medio, y el impacto ambiental debe ser una consideración importante en la conversión y utilización de energía.

REFERENCIAS Y LECTURAS RECOMENDADAS

1. ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, versión SI, Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993.
2. Y. A. Çengel, "An Intuitive and Unified Approach to Teaching Thermodynamics", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Atlanta, Georgia, AES-Vol. 36, pp. 251-260, 17-22 de noviembre, 1996.

PROBLEMAS*

Formas de energía

2-1C ¿Cuál es la diferencia entre las formas de energía macroscópica y microscópica?

2-2C ¿Qué es la energía total? Identifique las diferentes formas de energía que constituyen la energía total.

2-3C Mencione las formas de energía que contribuyen a la energía interna de un sistema.

2-4C ¿Cómo se relacionan entre sí las energías calorífica, interna y térmica?

2-5C ¿Qué es energía mecánica? ¿En qué difiere de la energía térmica? ¿Cuáles son las formas de energía mecánica en un flujo de fluido?

2-6C Para calentar habitaciones pequeñas suelen utilizarse calentadores eléctricos portátiles. Explique la transformación energética implicada durante este proceso de calefacción.

2-7C El gas natural, compuesto en su mayor parte de metano CH_4 es un combustible y una fuente importante de energía. ¿Se puede decir lo mismo del gas hidrógeno, H_2 ?

2-8C Considere una roca que cae de un acantilado al mar y que se asienta en el fondo. Comenzando con la energía potencial de la roca, identifique las transferencias y transformaciones de energía que ocurren durante el proceso.

2-9 Se va a generar potencia eléctrica con un generador-turbina hidráulicos instalados en un sitio a 120 m bajo la superficie libre de un gran embalse de agua que puede suministrar agua a razón de 1500 kg/s de forma permanente. Determine el potencial de generación de potencia.

2-10E La energía cinética específica de una masa en movimiento se expresa como $ke = V^2/2$ donde V es la velocidad de la masa. Determine la energía cinética específica de una masa cuya velocidad es de 100 pies/s, en Btu/lbm. *Respuesta:* 0.2 Btu/lbm

2-11 Determine la energía cinética específica de una masa cuya velocidad es de 30 m/s, en kJ/kg.

2-12E Calcule la energía potencial total, en Btu, de un objeto de 100 lbm que se encuentra a 20 pies por debajo de un nivel de referencia en un lugar donde $g = 31.7 \text{ pie/s}^2$.

2-13 Determine la energía potencial específica, en kJ/kg, de un objeto situado a 50 m por encima de un nivel de referencia en un lugar donde $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

2-14 Un objeto cuya masa es de 100 kg se encuentra a 20 m por encima un nivel de referencia en un lugar donde la aceleración gravitacional es estándar. Determine la energía potencial total, en kJ, de este objeto.

2-15 Un chorro de agua que sale por una boquilla a 60 m/s, con una tasa de flujo de 120 kg/s, y se va a usar para generar electricidad, al chocar con los cangilones situados en la periferia de una rueda. Calcule el potencial de generación de potencia de este chorro de agua.

2-16 Considere un río que corre hacia un lago a una velocidad promedio de 3 m/s, con un caudal de 500 m³/s, en una ubicación a 90 m arriba de la superficie del lago. Determine la energía mecánica total del agua del río por unidad de masa, y el potencial de generación de potencia de todo el río en esa ubicación.

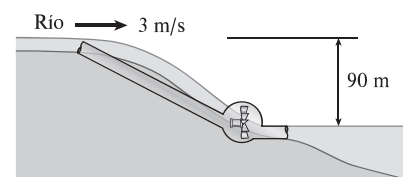


FIGURA P2-16

2-17 En un cierto lugar, el viento sopla de forma constante a 10 m/s. Determine la energía mecánica del aire por unidad de masa y el potencial de generación de potencia de una turbina eólica con aspas de 60 m de diámetro en ese lugar. Considere que la densidad del aire es de 1.25 kg/m³.

Transferencia de energía mediante calor y trabajo

2-18C ¿Qué es la teoría calorífica? ¿Cuándo y por qué se abandonó?

2-19C ¿En qué formas la energía puede cruzar las fronteras de un sistema cerrado?

2-20C ¿Qué es un proceso adiabático? ¿Qué es un sistema adiabático?

2-21C ¿Cuándo la energía que cruza las fronteras de un sistema cerrado es calor y cuándo es trabajo?

2-22C Considere un automóvil que se desplaza a una velocidad constante por una carretera. Determine la dirección de las interacciones de calor y trabajo, considerando lo siguiente como sistema: *a)* el radiador del automóvil, *b)* el motor del automóvil, *c)* las llantas del automóvil, *d)* la carretera y *e)* el aire alrededor del automóvil.

2-23C Una habitación se calienta por una plancha que se dejó conectada. ¿Es esto una interacción de calor o trabajo? Considere toda la habitación, incluida la plancha, como el sistema.

2-24C Una habitación se calienta como consecuencia de la radiación solar que entra por las ventanas. ¿Es esta una interacción calorífica o de trabajo para la habitación?

2-25C Un gas contenido en un dispositivo de pistón-cilindro se comprime, y su temperatura se eleva. ¿Se trata de una interacción de calor o trabajo?

* 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 icono son extensos y se recomienda emplear un software apropiado para resolverlos.

2-26 Un pequeño motor eléctrico produce 5 W de potencia mecánica. Exprese la potencia *a*) en unidades de N, m y s; y *b*) en unidades de kg, m y s? *Respuesta:* a) $5 \text{ N} \cdot \text{m/s}$, b) $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$

Formas mecánicas de trabajo

2-27C Un auto se acelera desde el reposo y alcanza 85 km/h en 10 s. ¿Sería diferente la energía transferida al auto si alcanzara la misma velocidad en 5 s?

2-28E Una grúa de construcción levanta una viga de concreto pretensado, que pesa 3 toneladas desde el suelo hasta la punta de las pilastras, a 24 pies sobre el suelo. Calcule la cantidad de trabajo efectuado suponiendo que el sistema es *a*) la viga y *b*) la grúa. Exprese sus respuestas en lbf · pie y en Btu.

2-29E Determine el momento de torsión aplicado a la flecha de un carro que transmite 225 hp y gira a una velocidad de 3 000 rpm.

2-30E Un resorte cuya constante es 200 lbf/pulg soporta una fuerza inicial de 100 lbf. Determine el trabajo, en Btu, requerido para comprimirlo una pulgada más.

2-31 ¿Cuánto trabajo, en kJ, puede producir un resorte cuya constante es 3 kN/cm una vez que se ha comprimido 3 cm a partir de su longitud sin carga?

2-32 Un elevador para esquiadores tiene una longitud de trayectoria de una vía de 1 km, y una elevación vertical de 200 m. Las sillas están espaciadas 20 m entre sí, y cada silla puede admitir tres personas. El elevador está operando a una velocidad uniforme de 10 km/h. Si se ignoran la fricción y la resistencia del aire y suponiendo que la masa promedio de cada silla cargada es 250 kg, determine la potencia necesaria para operar este elevador. También estime la potencia necesaria para acelerar este elevador en 5 s a su rapidez de operación cuando se echa a andar por primera vez.

2-33 El motor de un automóvil de 1 500 kg tiene una potencia nominal de 75 kW. Determine el tiempo requerido para acelerar este automóvil desde el reposo a 100 km/h a toda la potencia sobre un camino nivelado. ¿Es realista su respuesta?

2-34 Un carro descompuesto que pesa 1 200 kg está siendo remolcado por una grúa. Ignorando la fricción, la resistencia del aire y la resistencia al rodamiento, determine la potencia adicional necesaria para *a*) una velocidad constante sobre un camino nivelado, *b*) una velocidad constante de 50 km/h sobre un camino con pendiente de 30° y *c*) acelerar sobre un camino nivelado desde el reposo hasta 90 km/h en 12 s.

Respuesta: a) 0, b) 81.7 kW, c) 31.3 kW

2-35 A medida que una burbuja de vapor de amoníaco esférica se eleva en amoníaco líquido, su diámetro cambia de 1 a 3 cm. Calcule la cantidad de trabajo producido por la burbuja, en kJ, si la tensión superficial del amoníaco es de 0.02 N/m.

Respuesta: $5.03 \times 10^{-8} \text{ kJ}$

2-36 Una barra de acero de 0.5 cm de diámetro y 10 m de longitud se estira 3 cm. El módulo de Young de este acero es de 21 kN/cm². ¿Cuánto trabajo, en kJ, se requiere para estirar esta barra?

La primera ley de la termodinámica

2-37C ¿Cuáles son los diferentes mecanismos para transferir energía hacia un volumen de control o a partir de él?

2-38C Durante un ciclo, ¿es el trabajo necesariamente cero? ¿Para qué clases de sistema será éste el caso?

2-39C En un día cálido de verano, un estudiante pone en marcha su ventilador cuando sale de su habitación por la mañana. Cuando regrese por la tarde, ¿el cuarto estará más caliente o más fresco que los cuartos vecinos? ¿Por qué? Suponga que todas las puertas y ventanas se mantienen cerradas.

2-40 Se calienta agua en una sartén cerrada encima de una estufa, mientras es agitada por una hélice. Durante el proceso se transmiten 30 kJ de calor al agua 5 kJ de calor se pierden en el aire circundante. El trabajo de la hélice equivale a 500 N · m. Determine la energía final del sistema si su energía inicial es de 12.5 kJ. *Respuesta:* 38.0 kJ

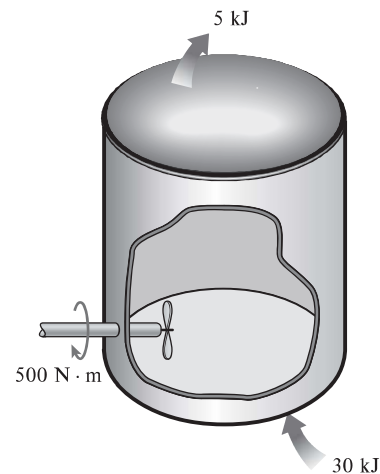


FIGURA P2-40

2-41 Un sistema cerrado adiabático se acelera desde 0 m/s hasta 30 m/s. Determine el cambio de energía específica de este sistema en kJ/kg.

2-42 Un ventilador debe acelerar aire quiescente a una velocidad de 8 m/s a razón de 9 m³/s. Determine la potencia mínima que debe suministrarse al ventilador. Considere que la densidad del aire es de 1.18 kg/m³. *Respuesta:* 340 W

2-43E Un dispositivo vertical de pistón-cilindro contiene agua y se va a calentar en una estufa. Durante el proceso, 6.5 Btu de calor se transfieren al agua, y las pérdidas de calor a través de las paredes laterales ascienden a 8 Btu. El pistón sube debido a la evaporación, y el vapor realiza 5 Btu de trabajo. Determine el cambio de la energía del agua en este proceso. *Respuesta:* 52 Btu

2-44E Para condiciones de diseño invernales, se proyecta una casa para que pierda calor a razón de 60 000 Btu/hora. Se estima que la ganancia de calor interno a causa de las personas, luces y aparatos domésticos es de 6 000 Btu/h. Si la casa se va a calentar con calefactores de resistencia eléctrica,

determine la potencia requerida de estos calefactores en kW para mantener la casa a una temperatura constante.

2-45E Una bomba de agua incrementa la presión del agua de 15 psia a 70 psia. Calcule la potencia de entrada requerida, en hp, para bombear $0.8 \text{ pie}^3/\text{s}$ de agua. ¿Tiene la temperatura del agua de entrada algún efecto significativo en la potencia de flujo requerida? *Respuesta:* 11.5 hp

2-46 Las necesidades de iluminación de un almacén se satisfacen con seis elementos de luz fluorescente y cada elemento contiene cuatro lámparas de 60 W cada una. Todas las lámparas permanecen encendidas durante las horas laborales del almacén, de 6 a.m. a 6 p.m., los 365 días del año. El almacén en realidad de utiliza durante un promedio de 3 h al día. Si el precio de la electricidad es de \$0.11/kWh, determine la cantidad de energía y el dinero que se ahorrarán con la instalación de sensores de movimiento. Asimismo, determine el periodo de reembolso simple si el precio de compra del sensor es de \$32 y se requiere 1 h para instalarlo a un costo de \$40.

2-47 Un campus universitario tiene 200 salones de clase y 400 oficinas de docentes. Los salones de clase tienen 12 tubos fluorescentes, y cada uno consume 110 W, incluyendo la electricidad consumida por los balastos. Las oficinas de los docentes tienen, en promedio, la mitad de tubos. El campus abre 240 días por año, los salones de clase y las oficinas docentes no se ocupan durante un promedio de 4 h por día, pero las luces se mantienen encendidas. Si el costo unitario de la electricidad es \$0.11 kWh, calcule cuánto se ahorra en un año, en ese campus, si las luces de los salones de clase y las oficinas se apagan mientras están desocupados.

2-48 Un recinto está inicialmente a la misma temperatura que el exterior, que es de 20°C . En él hay una lámpara de 40 W, una TV de 110 W, un refrigerador de 300 W y una plancha de 1 200 W. Suponiendo que no se transfiere calor a través de las paredes, calcule la rapidez de aumento del contenido de energía en el recinto, cuando todos estos electrodomésticos están encendidos.

2-49 En un centro comercial, una escalera eléctrica está diseñada para mover a 50 personas de 75 kg cada una, a una velocidad constante de 0.6 m/s, por una pendiente de 45° . Determine el consumo mínimo de potencia necesario para mover la escalera. ¿Cuál sería su respuesta si aumentara al doble la velocidad de la escalera?

2-50 Considere un automóvil de 2 100 kg que viaja a una velocidad constante de 70 km/s. Ahora el automóvil comienza a rebasar a otro, acelerando a 110 km/h en 5 s. Determine la potencia adicional necesaria para alcanzar esta aceleración. ¿Cuál sería su respuesta si la masa total del automóvil fuera de sólo 700 kg? *Respuestas:* 117 kW, 38.9 kW

2-51E Una forma de mejorar la eficiencia de combustible de un auto es utilizar llantas de baja resistencia al rodamiento; llantas que rueden con menos resistencia. Pruebas en carretera a 65 mph demostraron que las llantas con la menor resistencia al rodamiento pueden mejorar la eficiencia de combustible en casi 2 mpg (millas por galón). Considere un auto que rinde 35 mpg con llantas de alta resistencia al rodamiento y que recorre 15 000 millas por año. Si el costo del combustible es

de \$3.5/gal, determine cuanto dinero se ahorrará por año si utiliza llantas de baja resistencia al rodamiento.

Eficiencias de conversión de energía


2-52C ¿Qué es la eficiencia mecánica? ¿Qué significa una eficiencia mecánica de 100 por ciento para una turbina hidráulica?

2-53C ¿Cómo se define la eficiencia combinada de una bomba acoplada con un motor? ¿Puede la eficiencia combinada del motor bomba ser mayor que la eficiencia del motor o de la bomba?

2-54C ¿Puede ser mayor la eficiencia combinada de un turbogenerador, que la eficiencia de su turbina o de su generador? Explique.

2-55 Un quemador eléctrico abierto de 2.4 kW, con campana, está instalado en un área donde los costos unitarios de electricidad y gas natural son \$0.10/kWh y \$1.20/termia (1 termia = 105 500 kJ), respectivamente. Se puede suponer que la eficiencia de los quemadores abiertos es 73 por ciento para los eléctricos, y 38 por ciento para los de gas. Calcule la tasa de consumo de energía y el costo unitario de la energía utilizada en el quemador eléctrico y en el de gas.

2-56E Los requerimientos de vapor de una fábrica se satisfacen con una caldera cuya entrada de calor nominal es de 5.5×10^6 Btu/h. La eficiencia de combustión de la caldera es de 0.7 medida con un analizador de gas de chimenea portátil. Después de ajustarla, la eficiencia de combustión se eleva a 0.8. La caldera funciona 4 200 h por año de forma intermitente. Considerando que el costo unitario de la energía es de \$13/10⁶ Btu, determine el costo anual de la energía y los ahorros en los costos a consecuencia del ajuste de la caldera.

2-57E  Reconsidere el problema 2-56E, y use un software apropiado para estudiar los efectos del costo unitario de la energía, los efectos de la nueva eficiencia de combustión en la energía anual y los ahorros en costos. La eficiencia varía de 0.7 a 0.9 y el costo unitario varía de \$12 a \$14 por millón de Btu. Grafique la energía anual y los ahorros en costos contra la eficiencia para los costos unitarios de \$12, \$13 y \$14 por millón de Btu y analice los resultados.

2-58 Un motor de 75 hp (potencia en el eje) cuya eficiencia es 91.0 por ciento, se ha gastado, y se va a sustituir por uno de alta eficiencia, con 95.4 por ciento de eficiencia. Determine la reducción de la ganancia de calor de la habitación debido a la mayor eficiencia en condiciones de plena carga.

2-59 Un auto eléctrico de 90 hp (salida de eje) es propulsado por un motor eléctrico montado en el compartimiento del motor. Si la eficiencia promedio del motor es de 91 por ciento, determine la tasa de suministro de calor del motor al compartimiento a plena carga.

2-60 Un gimnasio cuenta con seis máquinas de levantar pesas sin motor y siete caminadoras cada una equipada con un motor de 2.5 hp (salida de eje). Los motores funcionan con un factor de carga promedio de 0.7 y eficiencia de 0.77. Durante las horas vespertinas pico, los 13 aparatos se utilizan de forma continua, y hay dos personas haciendo ejercicios

ligeros mientras esperan que se desocupe uno de los aparatos. Suponiendo que la tasa promedio de disipación de calor debido a las personas presentes en un gimnasio es de 600 W, determine la tasa de ganancia de calor del gimnasio por las personas y el equipo en condiciones de carga pico.


2-61 Una habitación se enfría haciendo que circule agua helada a través de un intercambiador de calor instalado en ella. Un ventilador de 0.25 hp (salida de eje) hace circular el aire a través del intercambiador de calor. La eficiencia típica de los motores eléctricos pequeños que impulsan equipo de 0.25 hp es de 60 por ciento. Determine la tasa de suministro de calor del ensamble ventilador-motor a la habitación.

2-62 El agua de un lago grande se va a usar para generar electricidad mediante la instalación de un sistema turbina hidráulica-generador en una ubicación donde la profundidad del agua es de 50 m. Se va a suministrar agua a razón de 5 000 kg/s. Si la potencia eléctrica generada se mide como 1 862 kW, y la eficiencia del generador es de 95 por ciento, determine *a*) la eficiencia general del sistema turbina-generador, *b*) la eficiencia mecánica de la turbina y *c*) la potencia de eje suministrada por la turbina al generador.

2-63 Se utiliza una bomba (eje) de 7 hp para elevar agua 15 m. Si la eficiencia mecánica de la bomba es de 82 por ciento, determine el máximo caudal de volumen del agua.

2-64 Se utiliza una bomba geotérmica para bombear salmuera cuya densidad es de $1\,050\text{ kg/m}^3$ a razón de $0.3\text{ m}^3/\text{s}$ desde una profundidad de 200 m. Para que la bomba sea 74 por ciento eficiente, determine la entrada de potencia requerida a la bomba. Ignore las pérdidas por fricción en las tuberías, y suponga que el agua geotérmica a 200 m de profundidad está expuesta a la atmósfera.

2-65 En cierta ubicación, el viento sopla constantemente a 7 m/s. Determine la energía mecánica del aire por unidad de masa y el potencial de generación de potencia de un aerogenerador con aspas de 80 m de diámetro en ese sitio. También determine la generación efectiva de potencia suponiendo una eficiencia total de 30 por ciento. Tome la densidad del aire como 1.25 kg/m^3 .

2-66  Reconsidere el problema 2-65. Usando el software apropiado, investigue el efecto de la velocidad del viento y el diámetro de envergadura de las aspas en la generación eólica de potencia. Suponga que la velocidad varía de 5 a 20 m/s en incrementos de 5 m/s, y que el diámetro varía de 20 a 120 m en incrementos de 20 m. Tabule los resultados y explique su importancia.

2-67 Se bombea agua de un embalse inferior a otro superior mediante una bomba que provee 20 kW de potencia de flecha. La superficie libre del embalse superior está 45 m más arriba respecto a la del inferior. Si el caudal medido de agua es de $0.03\text{ m}^3/\text{s}$, determine la potencia mecánica que se convierte en energía térmica durante este proceso debido a efectos de rozamiento.

2-68E Una bomba 80 por ciento eficiente con una entrada de potencia de 20 hp bombea agua de un lago a un estanque cercano a razón de $1.5\text{ pies}^3/\text{s}$ a través de una tubería de diámetro constante. La superficie del está 80 pies más arriba que

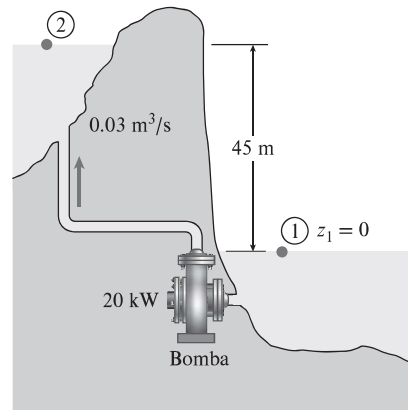


FIGURA P2-67

el lago. Determine la potencia mecánica utilizada para superar los efectos de fricción en la tubería. *Respuesta:* 2.37 hp

2-69 Se bombea agua de un lago a un tanque de almacenamiento que está 15 m más arriba que el lago a razón de 70 L/s mientras se consumen 15.4 kW de potencia eléctrica. Ignorando las pérdidas por fricción en las tuberías y algún cambio de energía cinética, determine *a*) la eficiencia global de la unidad de bomba-motor y *b*) la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la bomba.

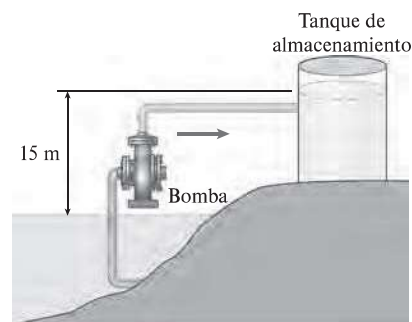


FIGURA P2-69

2-70 Se dispone de grandes turbinas eólicas con una capacidad de potencia de 80 MW y diámetros de aspas de más de 160 m para generar potencia eléctrica. Considere una turbina eólica con aspas de 100 m de diámetro instalada en un sitio sometido a vientos constantes de 8 m/s. Considerando que la eficiencia global de la turbina eólica es de 32 por ciento y la densidad del aire es de 1.25 kg/m^3 , determine la potencia eléctrica generada por esta turbina eólica. Asimismo, suponiendo vientos constantes de 8 m/s durante un periodo de 24 h, determine la cantidad de energía eléctrica y el ingreso generado por día para un precio unitario de $\$0.09/\text{kWh}$ de la electricidad.

2-71 Una turbina hidráulica tiene una diferencia de elevación de 85 m disponible con un caudal de $0.25\text{ m}^3/\text{s}$ y la eficiencia de la unidad turbina-generador es de 91 por ciento. Determine la generación de potencia eléctrica de esta turbina.

2-72 El agua represada en la Presa Hoover, en Nevada, Estados Unidos, está a 206 m de altura con respecto a la superficie

del río Colorado. ¿Qué caudal de agua debe pasar por las turbinas hidráulicas de esta presa para producir 50 MW de potencia, si la eficiencia de las turbinas es de 100 por ciento?



FIGURA P2-72

Fotografía de Lynn Betts, USDA Natural Resources Conservation Service.

2-73 Una bomba de aceite consume 44 kW de potencia eléctrica al bombear $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ de aceite con $\rho = 860 \text{ kg/m}^3$. Los diámetros de los tubos de succión y descarga son 8 cm y 12 cm, respectivamente. Si se determina que el aumento de presión del aceite en la bomba es 500 kPa, y la eficiencia del motor es 90 por ciento, calcule la eficiencia mecánica de la bomba.

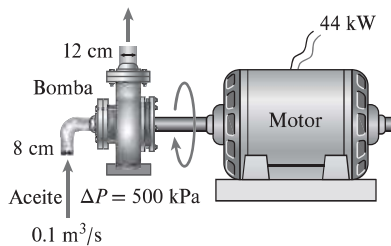


FIGURA P2-73

2-74 Un aerogenerador gira a rpm con vientos constantes que fluyen a través de él a razón de $42\,000 \text{ kg/s}$. La velocidad de la punta del aspa del aerogenerador es de 250 km/h . Si el aerogenerador produce 180 kW de potencia, determine *a*) la velocidad promedio del aire y *b*) la eficiencia de conversión del aerogenerador. Considere que la densidad del aire es de 1.31 kg/m^3 .

Energía y ambiente

2-75C ¿Cómo afecta la conversión de energía al ambiente? ¿Cuáles son las principales sustancias que contaminan el aire? ¿Cuál es la fuente principal de esos contaminantes?

2-76C ¿Qué es lluvia ácida? ¿Por qué se llama “lluvia”? ¿Cómo se forman los ácidos en la atmósfera? ¿Cuáles son los efectos adversos de la lluvia ácida sobre el medio ambiente?

2-77C ¿Por qué el monóxido de carbono es un contaminante peligroso en el aire? ¿Cómo afecta a la salud humana, a bajas y a altas concentraciones?

2-78C ¿Qué es el efecto invernadero? Describa cómo el exceso de CO_2 en la atmósfera causa el efecto invernadero. ¿Cuáles son las consecuencias potenciales del efecto invernadero a largo plazo? ¿Cómo podemos combatir este problema?

2-79C ¿Qué es esmog? ¿De qué está formado? ¿Cómo se forma ozono al nivel cercano al suelo? ¿Cuáles son los efectos adversos del ozono sobre la salud humana?

2-80E En una vivienda se usan $14\,000 \text{ kWh}$ de electricidad al año, y 900 galones de combustóleo durante la estación fría, para calefacción. La cantidad promedio de CO_2 producida es 26.4 lbm/galón de combustóleo, y 1.54 lbm/kWh de electricidad. Si en este hogar se reduce el uso de electricidad y combustible en 15 por ciento como resultado de la implementación de medidas de conservación de energía, calcule la reducción en las emisiones de CO_2 en un año, debidas a ese hogar.

2-81 Cuando se quema un hidrocarburo combustible, casi todo su carbono se quema y forma CO_2 (dióxido de carbono), el principal gas causante del efecto invernadero, y por consiguiente del cambio climático global. En promedio, se produce 0.59 kg de CO_2 por cada kWh de electricidad generado en una central eléctrica donde se quema gas natural. Un refrigerador típico doméstico usa unos 700 kWh de electricidad por año. Calcule la cantidad de CO_2 producido para que funcionen los refrigeradores en una ciudad con $300\,000$ hogares.

2-82 Repita el problema 2-81, suponiendo que la electricidad proviene de una central donde se quema carbón. En este caso, la producción promedio de CO_2 es 1.1 kg por kWh .

2-83 Un automóvil normal rueda $20\,000 \text{ km}$ por año, y emite unos 11 kg de NO_x (óxidos de nitrógeno) por año a la atmósfera. El gas natural que se quema en una estufa emite unos 4.3 g de NO_x por termia ($1 \text{ termia} = 105\,000 \text{ kJ}$); las centrales eléctricas emiten unos 7.1 g de NO_x por kWh de electricidad que producen. Imagine una familia que posee dos automóviles y cuya casa consume $9\,000 \text{ kWh}$ de electricidad y $1\,200$ termias de gas natural. Calcule la cantidad de NO_x emitidos a la atmósfera por año, por la casa y los automóviles de esa familia.

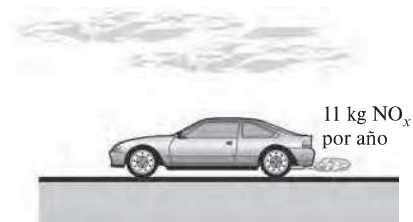


FIGURA P2-83

2-84E Un Ford Taurus que recorre $12\,000$ millas por año consume cerca de 650 gal de gasolina comparado con un Ford Explorer que consume 850 gal . Cuando se quema un galón de gasolina se emiten a la atmósfera más o menos 19.7 lbm de CO_2 responsable del calentamiento global. Determine la cantidad adicional de CO_2 producido de la cual sería responsable una persona durante un periodo de cinco años si cambia su Taurus por un Explorer.

Tema especial: mecanismos de transferencia de calor

2-85C ¿Cuáles son los mecanismos de transferencia de calor?

2-86C ¿Cuál conduce mejor el calor, el diamante o la plata?

2-87C ¿En qué difiere la convección forzada de la convección natural?

2-88C ¿Qué es un cuerpo negro? ¿En qué difieren los cuerpos reales de un cuerpo negro?

2-89C Defina emisividad y absorbanza. ¿Cuál es la ley de Kirchhoff de la radiación?

2-90C ¿Llega alguna parte de energía solar a la Tierra por conducción o convección?

2-91 Las superficies interna y externa de un muro de ladrillo, de $5\text{ m} \times 6\text{ m}$, con 30 cm de espesor y conductividad térmica $0.69\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, se mantienen a las temperaturas de 20 y 5°C , respectivamente. Calcule la tasa de transferencia de calor a través de la pared, en W .

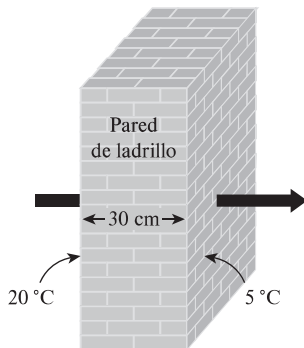


FIGURA P2-91

2-92 Las superficies interna y externa del vidrio de una ventana de $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.5\text{ cm}$ de dimensiones están a 15 y 6°C , respectivamente, en invierno. Si la conductividad térmica del vidrio es $0.78\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, calcule la cantidad de pérdida de calor, en kJ , a través del vidrio, durante 10 h . ¿Cuál sería su respuesta si el vidrio tuviera 1 cm de espesor?

2-93 Regrese al problema 2-92. Use un programa apropiado para investigar el efecto del espesor del vidrio sobre la pérdida de calor, para las temperaturas especificadas en las caras del vidrio. Varíe el espesor del vidrio, de 0.2 a 2 cm . Trace la gráfica de la pérdida de calor en función del espesor del vidrio, y explique los resultados.

2-94 Un perol de aluminio, cuya conductividad térmica es $237\text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, tiene un fondo plano de 20 cm de diámetro y 0.6 cm de espesor. Se transmite constantemente calor a agua hirviendo en el perol, por su fondo, a una tasa de 700 W . Si la superficie interna del fondo del perol está a 105°C , calcule la temperatura de la superficie externa de ese fondo de perol.

2-95 Los vidrios interno y externo de una ventana de doble vidrio de $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ están a 18°C y 6°C , respectivamente. Si el espacio de 1 cm entre los dos vidrios está lleno de aire inmóvil, determine la tasa de transferencia de calor a través de la capa de aire por conducción en kW .

2-96 Dos superficies de una placa de 2 cm de espesor se mantienen a 0 y 100°C , respectivamente. Se determina que el calor atraviesa la placa a una tasa de 500 W/m^2 . Calcule la conductividad térmica de la placa.

2-97 Se sopla aire caliente a 80°C sobre una superficie plana de $2\text{ m} \times 4\text{ m}$, a 30°C . Si el coeficiente de transferencia de calor por convección es $55\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, determine la tasa de transferencia de calor del aire a la placa, en kW .

2-98 Para fines de transferencia de calor, se puede modelar a un hombre quieto como un cilindro de 30 cm de diámetro y 175 cm de longitud, con las superficies superior e inferior aisladas, y la superficie lateral a 34°C en promedio. Calcule la tasa de pérdida de calor de este hombre, para un coeficiente de transferencia de calor por convección de $10\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, en un ambiente a 20°C .

Respuesta: 231 W

2-99 Una esfera de 9 cm de diámetro, cuya superficie se mantiene a la temperatura de 110°C , está colgada en el centro de un recinto a 20°C . Si el coeficiente de transferencia de calor por convección es $15\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, y la emisividad de la superficie es 0.8 , calcule la tasa total de transferencia de calor desde la esfera.

2-100 Regrese al problema 2-99. Use un programa apropiado para investigar el efecto del coeficiente de transferencia de calor por convección, y de la emisividad de la superficie, en la tasa de transferencia de calor desde la esfera. Varíe el coeficiente de transferencia de calor desde 5 hasta $30\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Haga una gráfica de la tasa de transferencia de calor en función del coeficiente de transferencia de calor por convección, para emisividades de superficie de 0.1 , 0.5 , 0.8 y 1 , y explique los resultados.

2-101 Se deja una plancha de 1000 W sobre la tabla de planchar, con su base al aire, que está a 23°C . El coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre la superficie de la base y el aire que la rodea es $20\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Si la emisividad de la base es 0.4 , y su área es 0.02 m^2 , calcule la temperatura de la base de la plancha.

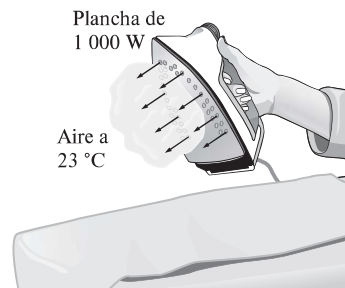


FIGURA P2-101

2-102 Un tubo de 7 cm de diámetro externo y 18 m de longitud, con agua a 80°C , pierde calor al aire que la rodea, a 5°C , por convección natural; el coeficiente de transferencia de calor es $25\text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Calcule la tasa de pérdida de calor del tubo, por convección natural, en kW .

2-103 Una chapa metálica delgada está aislada en su cara trasera, y su cara delantera está expuesta a la radiación solar. La superficie expuesta de la chapa tiene 0.8 de absorbanza, para radiación solar. Si esta radiación incide sobre la placa con una potencia de 450 W/m^2 , y la temperatura del aire que la rodea es 25°C , determine la temperatura de la chapa, cuando la pér-

didada de calor por convección es igual a la energía solar absorbida por la placa. Suponga que el coeficiente de transferencia de calor por convección es $50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, e ignore la pérdida de calor por radiación.

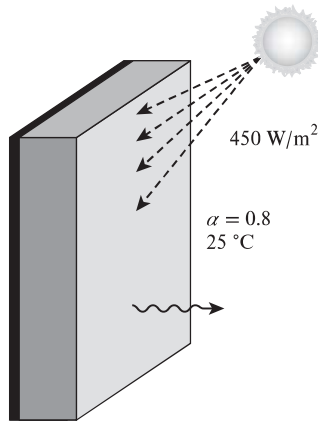


FIGURA P2-103

2-104 Regrese al problema 2-103. Use un programa apropiado para investigar el efecto del coeficiente de transferencia de calor por convección, sobre la temperatura superficial de la placa. Haga variar el coeficiente de transferencia de calor de 10 a $90 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Trace la gráfica de la temperatura superficial en función del coeficiente de transferencia de calor por convección, y explique los resultados.

2-105 La superficie externa de una nave en el espacio exterior tiene 0.6 de emisividad, y 0.2 de absorptancia para la radiación solar. Si esta radiación incide sobre la nave a una tasa de $1\,000 \text{ W/m}^2$, determine la temperatura superficial de la nave, cuando la radiación emitida es igual a la energía solar absorbida.

2-106 Regrese al problema 2-105. Use un programa apropiado para investigar el efecto de la emisividad y absorptancia superficial de la nave, sobre la temperatura superficial de equilibrio. Trace una gráfica de la temperatura superficial en función de la emisividad, para absorptancias de radiación solar de 0.1 , 0.5 , 0.8 y 1 , y describa los resultados.

2-107 Un recipiente esférico de acero, cuyo diámetro exterior es 40 cm , y cuya pared hueca tiene el espesor de 0.4 cm , se llena con agua y hielo a 0°C . La superficie externa está a 3°C . Calcule la tasa aproximada de pérdida de calor a través

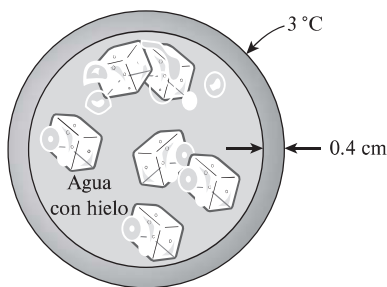


FIGURA P2-107

de la esfera, y la rapidez con que se funde el hielo en el recipiente.

Problemas de repaso

2-108 Algunos ingenieros desarrollaron un dispositivo para uso interno que produce iluminación en áreas rurales que no tienen acceso a la red de electricidad. Es impulsado por gravedad, y funciona como sigue: una persona iza un saco de arena o rocas a una cierta altura. A medida que el saco desciende lentamente, hace que un piñón también gire con lentitud. Un mecanismo de engranes convierte este movimiento lento en uno de alta velocidad, el cual impulsa un generador de CD. La producción eléctrica del generador se utiliza para encender un foco LED.

Considere un foco LED activado por gravedad que produce 16 lúmenes de iluminación. El dispositivo utiliza un saco de arena de 10 kg que es izado por una persona a 2 m de altura. Para una iluminación continua se tiene que izar el saco cada 20 minutos. Si se utiliza un foco LED con eficacia de 150 lúmenes por watt, determine *a*) la velocidad del saco de arena a medida que desciende y *b*) la eficacia global del dispositivo.

2-109 Considere un salón de clases para 55 estudiantes y un instructor, donde cada uno genera calor a razón de 100 W . Dieciocho lámparas fluorescentes de 40 W cada una proporcionan la iluminación, y los balastos consumen un 10 por ciento adicional. Determine la tasa de generación de calor interno en este salón de clases cuando está totalmente ocupado.

2-110 Una persona va a sustituir su calentador de gas natural, con 25 años de antigüedad, por uno cuya eficiencia es 55 por ciento. Esa persona piensa en un calentador convencional, con 82 por ciento de eficiencia, que cuesta $1\,600$ dólares, y en otro cuya eficiencia es 95 por ciento, que cuesta $2\,700$ dólares. La persona quisiera comprar el de alta eficiencia, si el ahorro en los pagos de gas natural recompensa la diferencia de costos en menos de ocho años. Si la persona paga actualmente $1\,200$ dólares al año por gas natural, determine si debe comprar el modelo convencional o el de alta eficiencia.

2-111 Un propietario está analizando la adquisición de alguno de estos sistemas de calefacción para su casa: calentamiento mediante resistencia eléctrica con $\$0.12/\text{kWh}$ y $1 \text{ kWh} = 3\,600 \text{ kJ}$, calentamiento a base de gas con $\$1.24/\text{unidad térmica}$ y $1 \text{ termia} = 105\,500 \text{ kJ}$, y calentamiento a base de petróleo con $\$2.3/\text{gal}$ y $1 \text{ gal de petróleo} = 138\,500 \text{ kJ}$. Suponiendo eficiencias de 100 por ciento para el horno eléctrico y de 87 por ciento para los de gas y petróleo, determine el sistema de calefacción con el costo mínimo de energía.

2-112 El Departamento de Energía de Estados Unidos estima que se ahorrarían $570\,000$ barriles de petróleo cada día si cada hogar del país bajara 6°F (3.3°C) a la configuración de su termostato durante el invierno. En el supuesto que la temporada promedio de calefacción consistiera en 180 días y el costo del barril de petróleo fuera de $\$55/\text{barril}$, determine cuánto dinero se ahorraría al año.

2-113 Una familia típica gasta cerca de $\$1\,200$ al año en facturas de electricidad y el Departamento de Energía de Estados Unidos estima que el 46 por ciento de esta energía se utiliza para calefacción y enfriamiento, el 15 para calentar agua, el 15 por ciento para refrigeración y congelación, y el 24 por ciento

restante para iluminación, cocción y el funcionamiento de otros aparatos domésticos. Los costos de calefacción y enfriamiento de una casa eficientemente aislada se pueden reducir hasta un 30 por ciento si se utiliza un aislamiento adecuado. Si el costo del aislamiento es de \$200, determine en cuanto tiempo se pagará el aislamiento con la energía que ahorra.

2-114 Un motor diésel, con volumen de cilindros 4.0 L y velocidad de motor 2 500 rpm, trabaja con una relación aire-combustible igual a 18 kg de aire/kg de combustible. Usa diésel ligero, que contiene 500 ppm (partes por millón) de azufre, en masa. Todo ese azufre se descarga al ambiente, donde se convierte en ácido sulfuroso, H_2SO_3 . Si el flujo de aire que entra al motor es 336 kg/h, calcule el flujo másico de masa de azufre en el escape. También determine el flujo másico de ácido sulfuroso agregado al ambiente, si por cada kmol de azufre en el escape se formará un kmol de ácido sulfuroso en el ambiente.

2-115 La fuerza F para comprimir un resorte una distancia x es $F - F_0 = kx$ donde k es la constante de resorte y F_0 es la precarga. Determine el trabajo, en kJ, requerido para comprimir un resorte una distancia de 1 cm cuando su constante es 300 N/cm y el resorte inicialmente se comprime con una fuerza de 100 N.

2-116 La fuerza requerida para expandir el gas contenido en un amortiguador de gas a una distancia x está dada por

$$F = \frac{\text{Constante}}{x^k}$$

donde la geometría de este dispositivo determina la constante y el gas utilizado determina k . El amortiguador de gas se diseña para que tenga una constante de $1\,000\text{ N} \cdot \text{m}^{1.3}$ y $k = 1.3$. Determine el trabajo en kJ, requerido para comprimirlo de 0.1 a 0.3 m. *Respuesta: 1.87 kJ*

2-117 Considere un aparato de televisión que consume 120 W de energía eléctrica cuando está encendido y que se mantiene así un promedio de seis horas al día. Para un costo unitario de electricidad de 12 centavos por kWh, determine el costo de la electricidad que consume esta televisión al mes (30 días).

2-118E Se bombea agua desde un pozo de 200 pies de profundidad, hasta un recipiente de almacenamiento de 100 pies de altura. Calcule la potencia, en kW, que se necesitaría para bombear 200 galones por minuto.

2-119 Considere un elevador vertical cuya cabina tiene una masa total de 800 kg cuando está completamente lleno y 150 kg cuando está vacío. El peso de la cabina del elevador está parcialmente equilibrado por un contrapeso de 400 kg que está conectado a la parte superior de la cabina por cables que pasan por una polea ubicada en la parte superior del pozo del elevador. Ignore el peso de los cables y suponga que los rieles guía y las poleas no producen fricción alguna. Determine *a*) la potencia requerida mientras la cabina completamente llena se eleva a una velocidad constante de 1.2 m/s y *b*) la potencia requerida cuando la cabina vacía desciende a una velocidad constante de 1.2 m/s. ¿Cuál sería su respuesta *a*) si no se utilizara ningún contrapeso y *b*) si se produjera una fuerza de fricción de 800 N entre la cabina y los rieles guía?

2-120 En un molino de maíz del siglo XIX se empleaba una rueda hidráulica de 14 m de altura. Cerca de la parte superior de la rueda caía agua a 480 litros por minuto. ¿Cuánta potencia, en kW, podría haber producido esa rueda hidráulica? *Respuesta: 1.10 kW*

2-121 En una central hidroeléctrica bajan $65\text{ m}^3/\text{s}$ de agua, desde una altura de 90 m, hasta una turbina generadora de electricidad. La eficiencia general del turbogenerador es 84 por ciento. Sin tener en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería, calcule la producción de potencia en esta planta. *Respuesta: 48.2 MW*

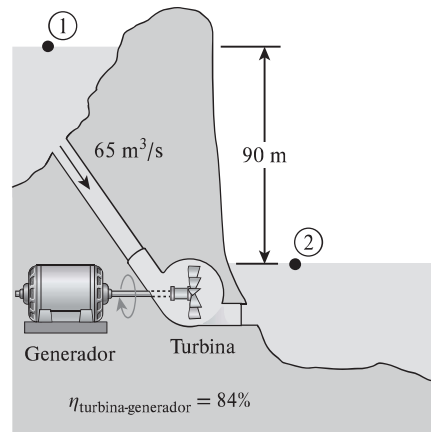


FIGURA P2-121

2-122 La demanda de energía eléctrica suele ser mucho mayor durante el día que por la noche, y las empresas eléctricas venden, con frecuencia, la energía eléctrica por la noche a precios mucho menores, para estimular a los consumidores para usar la capacidad disponible de generación, y para evitar construir nuevas y costosas plantas generadoras que sólo se usen durante cortos periodos. También, las empresas están dispuestas a comprar energía producida por empresas privadas durante el día, a altos precios.

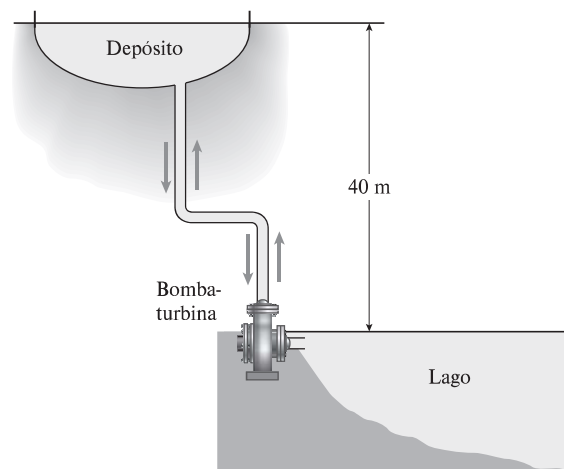


FIGURA P2-122

Suponga que una empresa eléctrica vende energía a \$0.05/kWh por la noche, y puede pagar a \$0.12/kWh electricidad durante el día. Para aprovechar esta oportunidad, un productor considera construir un gran depósito a 40 m de altura sobre el nivel de un lago, bombeando el agua al depósito durante la noche, con energía poco costosa, y dejar regresar el agua al lago durante el día, produciendo electricidad al hacer que la motobomba trabaje como turbogenerador, cuando se invierte el flujo. En un análisis preliminar se demuestra que se puede usar una tasa de flujo de agua de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, en ambas direcciones. Se espera que las eficiencias combinadas de la motobomba y el turbogenerador sean 75 por ciento cada una. Sin tener en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería, y suponiendo que el sistema funciona durante 10 h en cada modo durante un día normal, calcule el ingreso potencial de este sistema de bomba y generador, durante un año.

2-123 La bomba de un sistema de distribución de agua está alimentada por un motor eléctrico de 15 kW cuya eficiencia es de 90 por ciento. El caudal de agua a través de la bomba es de 50 L/s. Los diámetros de la entrada y salida de las tuberías son los mismos, y la diferencia de elevación a través de la bomba es insignificante. Si las presiones en la entrada y salida de la bomba son de 100 y 300 kPa (absolutos), respectivamente, determine la eficiencia mecánica de la bomba.

Respuesta: 74.1 por ciento

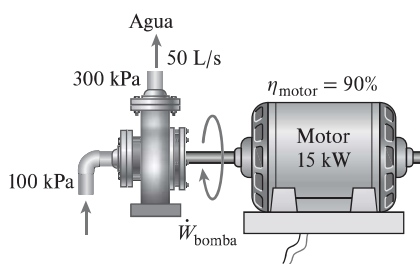


FIGURA P2-123

2-124 Un automóvil que viaja a través del aire reduce la velocidad de éste (medida con respecto a él) y llena un canal de flujo más grande. Un automóvil tiene un área de canal de flujo efectiva de 3 m^2 . El vehículo se desplaza a 90 km/h en un día en que la presión barométrica es de 70 cm de mercurio y la temperatura es de 20°C . Detrás del carro, la velocidad del aire (con respecto a él) es de 82 km/h, y la temperatura es de 20°C . Determine la potencia requerida para mover el vehículo a través del aire y el área del canal de flujo efectivo detrás de él.

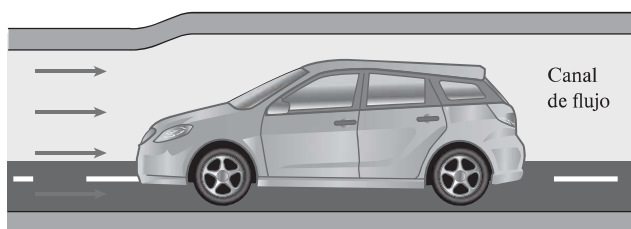


FIGURA P2-124

Problemas para el examen de fundamentos de ingeniería

2-125 Una calefacción eléctrica de resistencia, de 2 kW, está en un recinto, y se enciende durante 50 min. La cantidad de energía transferida de la calefacción al recinto es

- a) 2 kJ
- b) 100 kJ
- c) 3 000 kJ
- d) 6 000 kJ
- e) 12 000 kJ

2-126 Un refrigerador consume 320 W de potencia cuando está trabajando. Si sólo trabaja la cuarta parte del tiempo, y el costo de la electricidad es \$0.13 /kWh, el costo mensual (30 días) para este refrigerador es

- a) \$4.9
- b) \$5.8
- c) \$7.5
- d) \$8.3
- e) \$9.7

2-127 En una instalación, un compresor de 75 hp trabaja a plena carga durante 2 500 h por año, y está impulsado por un motor eléctrico cuya eficiencia es 93 por ciento. Si el costo unitario de la electricidad es \$0.11/kWh, el costo anual de electricidad para este compresor es

- a) \$14 300
- b) \$15 380
- c) \$16 540
- d) \$19 180
- e) \$22 180

2-128 En un cálido día de verano, un ventilador de 0.50 hp impulsado por un motor 65 por ciento eficiente hace circular el aire en una habitación bien sellada. (Observe que el motor suministra 0.50 hp de potencia de flecha neta al ventilador.) La tasa de suministro de energía del conjunto ventilador-motor a la habitación es

- a) 0.769 kJ/s
- b) 0.325 kJ/s
- c) 0.574 kJ/s
- d) 0.373 kJ/s
- e) 0.242 kJ/s

2-129 Un ventilador debe acelerar aire en reposo a una velocidad de 9 m/s a razón de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Si la densidad del aire es $1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$, la potencia mínima que debe suministrarse al ventilador es

- a) 41 kW
- b) 122 W
- c) 140 W
- d) 206 W
- e) 280 W

2-130 Un automóvil de 900 kg que va a una velocidad constante de 60 km/h, y debe acelerar a 100 km/h en 4 s. La potencia adicional para tener esta aceleración es

- a) 56 kW
- b) 222 kW
- c) 2.5 kW
- d) 62 kW
- e) 90 kW

2-131 El elevador de un edificio alto debe subir una masa neta de 550 kg a una velocidad constante 12 m/s, y usa un motor eléctrico. La potencia nominal mínima del motor debe ser

- a) 0 kW
- b) 4.8 kW
- c) 12 kW
- d) 45 kW
- e) 65 kW

2-132 Se debe generar potencia eléctrica en una planta hidroeléctrica que recibe agua a razón de $70 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, desde una altura de 65 m, y utiliza un turbogenerador con 85 por ciento de eficiencia. Si se ignoran las pérdidas por fricción en las tuberías, la producción de potencia eléctrica en esa planta es

- a) 3.9 MW
- b) 38 MW
- c) 45 MW
- d) 53 MW
- e) 65 MW

2-133 Para bombear queroseno ($\rho = 0.820 \text{ kg/L}$) de un recipiente en el piso hasta un recipiente elevado, se usa una bomba de 2 kW. Ambos recipientes están abiertos a la atmósfera, y la diferencia de altura entre las superficies libres de los recipientes es de 30 m. La tasa máxima de flujo volumétrico del queroseno es

- a) 8.3 L/s b) 7.2 L/s c) 6.8 L/s
d) 12.1 L/s e) 17.8 L/s

2-134 Una bomba de glicerina está impulsada por un motor eléctrico de 5 kW. Si se mide la diferencia de presiones entre la descarga y la succión de la bomba, a plena carga, resulta ser 211 kPa. Si la tasa de flujo por la bomba es de 18 L/s, y no se toman en cuenta los cambios de elevación y de velocidad de flujo a través de la bomba, la eficiencia total de la misma es

- a) 69 por ciento b) 72 por ciento c) 76 por ciento
d) 79 por ciento e) 82 por ciento

Los siguientes problemas se basan en el tema especial opcional de transferencia de calor

2-135 Una tarjeta de circuito tiene 10 cm de altura y 20 cm de ancho, contiene 100 chips muy juntos; cada uno genera calor, a una tasa de 0.08 W, y lo transfiere por convección al aire que lo rodea, que está a 25 °C. La transferencia de calor de la cara posterior de la tarjeta es insignificante. Si el coeficiente de transferencia de calor por convección, en la superficie anterior es $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, y es insignificante la transferencia de calor por radiación, la temperatura superficial promedio de los chips es

- a) 26 °C b) 45 °C c) 15 °C
d) 80 °C e) 65 °C

2-136 Una resistencia eléctrica de 50 cm de longitud y 0.2 cm de diámetro, sumergida en agua, se usa para determinar el coeficiente de transferencia de calor en agua hirviendo, a 1 atm. Se mide la temperatura superficial de la resistencia, y resulta ser 130 °C cuando un wattmetro indica que el consumo de potencia eléctrica es 4.1 kW. Entonces, el coeficiente de transferencia de calor es

- a) 43 500 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ b) 137 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
c) 68 330 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ d) 10 038 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
e) 37 540 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

2-137 Una superficie negra y caliente de $\times \text{ m}^2$, a 80 °C, pierde calor a 25 °C al aire que la rodea, por convección, y el coeficiente de transferencia de calor por convección es $12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; también pierde calor por radiación a las superficies vecinas a 15 °C. La tasa total de pérdida de calor de la superficie es

- a) 1 987 W b) 2 239 W c) 2 348 W
d) 3 451 W e) 3 811 W

2-138 A través de un muro de 8 m \times 4 m de dimensiones y de 0.2 m de espesor, se transfiere calor a una tasa de 2.4 kW. Las temperaturas superficiales interna y externa del muro se miden, y resultan 15 y 5 °C, respectivamente. La conductividad térmica promedio del muro es

- a) 0.002 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ b) 0.75 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
c) 1.0 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ d) 1.5 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
e) 3.0 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

2-139 El tejado de una casa con calefacción eléctrica mide 7 m de longitud, 10 m de ancho y 0.25 m de espesor. Es una losa plana de concreto, cuya conductividad térmica es $0.92 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Durante cierta noche invernal se miden las temperaturas interna y externa del tejado, y son 15 y 4 °C, respectivamente. La tasa promedio de pérdida de calor a través del tejado, durante la noche, fue

- a) 41 W b) 177 W c) 4 894 W
d) 5 567 W e) 2 834 W

Problemas de diseño y ensayo

2-140 Un vehículo promedio adiciona a la atmósfera casi 20 lbm de dióxido de carbono por cada galón de combustible que consume, por lo que una acción que se puede hacer para reducir el calentamiento global es comprar un vehículo con mayor economía de combustible. En una publicación gubernamental, en Estados Unidos, se dice que un vehículo que da 25, en lugar de 20, millas por galón, descargará 10 toneladas menos de dióxido de carbono a lo largo de su vida útil. Haga unas suposiciones razonables y evalúe si esta afirmación es válida, o es una gran exageración.

2-141 Su vecino vive en una casa antigua de 2 500 pies cuadrados (aproximadamente 250 m^2) calentada por gas natural. Su calentador de gas actual fue instalado a principios de 1980 y tiene una eficiencia (llamada calificación del uso eficiente anual de combustible, o AFUE, por sus siglas en inglés) de 65 por ciento. Ha llegado el momento de reemplazarlo y su vecino está decidiendo entre un horno convencional con una eficiencia de 80 por ciento y precio de \$1 500, o un horno que tiene una alta eficiencia de 95 por ciento y un precio de \$2 500. Su vecino ofrece pagarle \$100 si le ayuda a tomar la decisión correcta. Considerando los datos del clima, las cargas de calefacción típicas y el precio del gas natural en su área, haga una recomendación a su vecino basada en un análisis económico convincente.

2-142 Indague los precios del combustible para calefacción, gas natural y electricidad donde usted vive, y determine el costo de cada uno por kWh de energía suministrada a la casa, en forma de calor. Revise sus cuentas de servicio, y determine cuánto dinero gastó en calefacción durante el último enero. También determine cuánto de su factura por calentamiento en enero pagaría con cada uno de los sistemas de calefacción, si tuviera usted instalado el último y más eficiente sistema de cada uno de ellos.

2-143 Haga un informe sobre los sistemas de calefacción que se ofrecen en su localidad para construcciones residenciales. Describa las ventajas y desventajas de cada uno, y compare sus costos iniciales y de operación. ¿Cuáles son los factores más importantes para seleccionar un sistema de calefacción? Redacte algunos lineamientos. Identifique las condiciones bajo las cuales cada sistema sería la mejor opción en su localidad.

2-144 Los techos de muchos hogares en Estados Unidos están cubiertos por celdas solares fotovoltaicas que se asemejan a las

tejas de techo y generan electricidad de manera silenciosa a partir de la energía solar. Según un artículo, durante su vida de servicio proyectada de 30 años, un sistema de celdas fotovoltaicas de 4 kW en California reduciría 433 000 lbm en la producción de CO₂ que ocasiona el calentamiento global, disminuiría 2 900 lbm los sulfatos que ocasionan la lluvia ácida y 1 660 lbm los nitratos que ocasionan el smog. El artículo también afirma que un techo fotovoltaico ahorraría 253 000 lbm de carbón, 21 000 galones de petróleo y 27 millones de pies³ de gas natural. Formule supuestos razonables acerca de la radiación solar incidente, la eficiencia y las emisiones y evalúe estas afirmaciones y corrijalas si fuera necesario.

2-145 Los cambios de presión a través de frentes climáticos atmosféricos por lo general son de unos cuantos centímetros de mercurio, mientras que los cambios de temperatura por lo general son de 2 a 20 °C. Elabore una gráfica de cambios de presión en función de cambios de temperatura que provocarán una velocidad máxima del viento de 10 m/s o más.

2-146 El desempeño de un dispositivo se define como la relación entre la salida deseada y la entrada requerida, y está defi-

nición se puede ampliar a los campos no técnicos. Por ejemplo, su desempeño en este curso se puede considerar como la calificación que obtuvo en relación con el esfuerzo realizado. Si ha estado invirtiendo mucho tiempo a este curso y sus calificaciones no lo reflejan, su desempeño es deficiente. En este caso quizá debería tratar de indagar la causa subyacente y cómo corregir el problema. Dé otras tres definiciones de desempeño de campos no técnicos y explíquelas.

2-147 Algunos ingenieros han sugerido que el aire comprimido almacenado en tanques se puede usar para impulsar vehículos de transporte personal. La tecnología de tanques de aire comprimido actual permite comprimir y mantenerlo con seguridad a una presión de 4 000 psia. Los tanques hechos de materiales compuestos requieren aproximadamente 10 lbm de materiales de construcción por cada pie³ de gas almacenado. Se requiere aproximadamente 0.01 hp por libra de peso del vehículo para moverlo a una velocidad de 30 millas por hora. ¿Cuál es la autonomía máxima que este vehículo puede tener? Tenga en cuenta sólo el peso de los tanques y suponga una conversión perfecta de la energía en el aire comprimido.