Termodinámica

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

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

CALOR Y TRABAJO

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

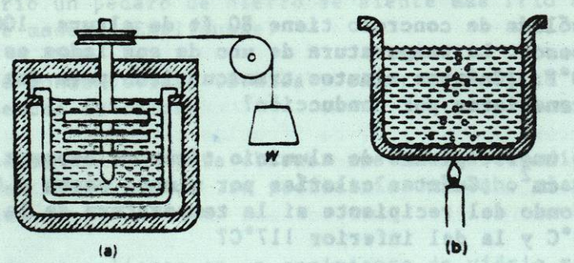

Figura 21-1 Incremento de la energía interna de un sistema por medio de *a)* trabajo mecánico efectuado sobre el sistema; *b)* suministrando calor al sistema.

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

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

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

PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

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

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

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

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

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

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

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

Solución Aplicando la primera ley se obtiene

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

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

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

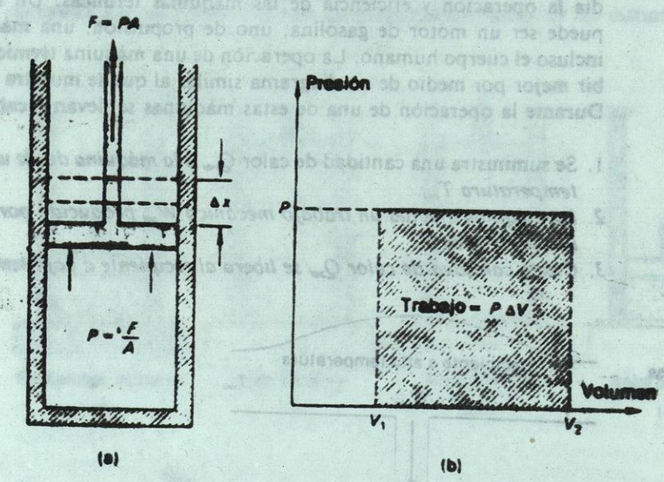

Figura 21-3 *a)* Cálculo del trabajo realizado por un gas al expandirse a presión constante. *b)* El trabajo es igual al área bajo la curva de un diagrama *P-V*.

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

SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

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

$$\Delta W = \Delta Q$$

Tal transformación puede continuarse indefinidamente en tanto se suministre trabajo.

Considérese el proceso inverso. ¿Será posible transformar energía térmica en trabajo mecánico con una eficiencia del 100%? En el ejemplo anterior, ¿es posible todo el calor transferido al aire y regresarlo a las manos, ocasionando que

ellas se froten indefinidamente en forma espontánea? En un día frío de invierno, este proceso sería beneficioso para los cazadores que tengan las manos frías. Desafortunadamente, tal proceso no puede ocurrir aun cuando no se viola la primera ley. Tampoco es posible recuperar el calor perdido al frenar un automóvil a fin de que las ruedas comiencen a rodar nuevamente.

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

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

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

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

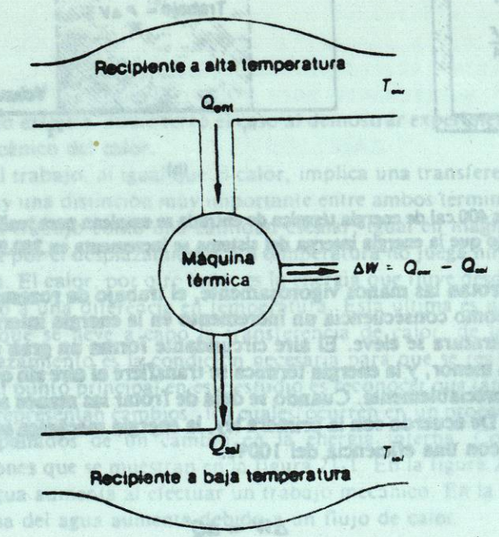

Figura 21-9 Diagrama esquemático de una máquina térmica.

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

Trabajo de salida = calor de entrada - calor de salida

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

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

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

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

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

LA EFICIENCIA DE UNA MÁQUINA IDEAL

La eficiencia de una máquina real es difícil de predecir a partir de la ecuación (21-8), porque es difícil calcular las cantidades Q_{ent} y Q_{sal}. Las pérdidas por fricción y calor a través de las paredes del cilindo y alrededor del pistón, la combustión incompleta del combustible y aun las propiedades físicas de los distintos combustibles impiden que se mida la eficiencia de dichas máquinas. No obstante, se puede imaginar una *máquina ideal* que no tenga obstáculos en lo que se refiere a dificultades prácticas. La eficiencia de dicha máquina dependerá sólo de las cantidades de calor absorbido y liberado entre dos fuentes de calor bien definidas, y no de las propiedades térmicas del combustible utilizado; en otras palabras, independientemente de los cambios internos de presión, volumen, longitud u otros factores, toda máquina ideal tiene la misma eficiencia cuando opera entre dos temperaturas iguales (T_{ent} y T_{sal}).

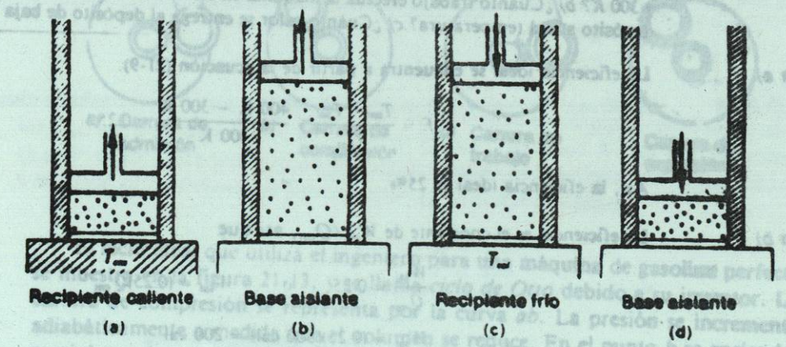

Figura 21-10 Ciclo de Carnot: *a)* expansión isotérmica, *b)* expansión adiabática, *c)* compresión isotérmica, y *d)* compresión adiabática.

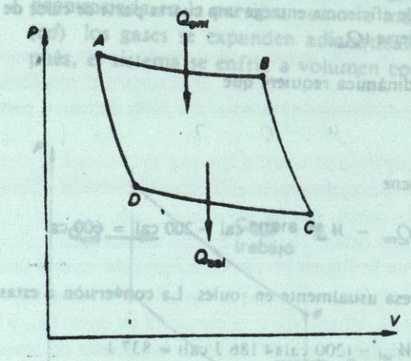

Figura 21-11 Diagrama *P-V* de un ciclo de Carnot ideal.

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

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

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

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

EJEMPLO 21-2 *a)* ¿Cuál es la diferencia de una máquina ideal que opera entre dos depósitos de calor a 400 y 300 *K*? *b)* ¿Cuánto trabajo efectúa la máquina en un ciclo completo si absorbe 800 cal del depósito a alta temperatura? *c)* ¿Cuánto calor se entrega al depósito de baja temperatura?

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

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

Así, la eficiencia ideal es 25%.

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

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

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

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

Solución c) La primera ley de la termodinámica requiere que

$$Q_{ent} = Q_{sal} + W_{sal}$$

Al resolver para Q_{sal} se obtiene

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

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

$$W_{sal} = (200\ \text{cal})(4\ 186\ \text{J/cal}) = 837\ \text{J}$$

MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN INTERNA

Una máquina de combustión interna genera el calor de entrada dentro de la misma. La más común de este tipo es el motor de gasolina en el cual una mezcla de gasolina y aire se inflama mediante una bujía en cada cilindro. La energía térmica liberada se convierte en trabajo útil por la presión que ejercen sobre el émbolo los gases en expansión. En la figura 21-12 se muestra el proceso de cuatro tiempos. Durante la *carrera de admisión* (Fig. 21-12*a*) entra una mezcla de aire y vapor de gasolina al cilindro a través de la válvula de admisión. Ambas válvulas se cierran durante *la carrera de compresión* (Fig. 21-12*b*) y el pistón se mueve hacia arriba, causando una elevación de la presión. Justo antes de que el pistón llegue al extremo superior, se efectúa el encendido de la mezcla, ocasionando un cambio abrupto tanto en la temperatura como en la presión. En la *carrera de trabajo* (Fig. 21-12*c*) la fuerza de los gases en expansión impulsan al pistón hacia abajo, efectuando trabajo externo. En la carrera de expulsión (Fig. 21-12*d*), se expulsan los gases quemados fuera del cilindro a través de la válvula de escape. A continuación se repite todo el ciclo nuevamente, en tanto se suministre combustible al cilindro.

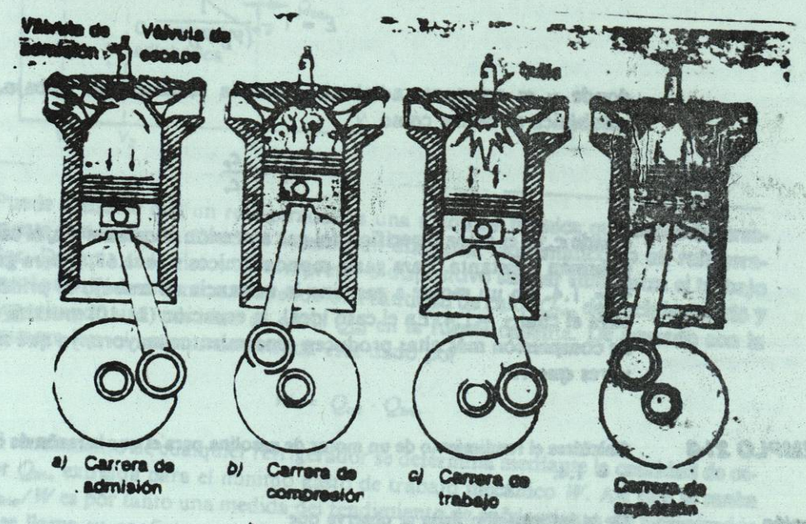

Figura 21-12 Máquina de gasolina de cuatro tiempos: *a)* admisión, *b)* compresión, *c)* trabajo, *d)* expulsión.

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

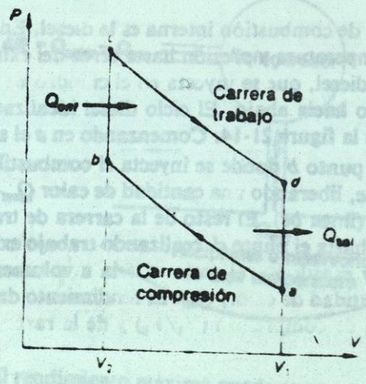

Figura 21-13 El ciclo de Otto para un motor de gasolina de cuatro tiempos.