unidades comerciales tienen coeficientes de eficiencia comprendidos entre 2 y 7 aproximadamente. El diseño, instalación y mantenimiento de dichas unidades constituyen actualmente una rama importante de la ingeniería.

El funcionamiento de un frigorífico puede simbolizarse de forma esquemática como indica la Figura 6.9, que debe compararse con el de la Figura 6.5 que corresponde a un motor. Para hacer pasar calor de una fuente fría a otra caliente siempre se necesita trabajo. En los frigoríficos domésticos este trabajo lo realiza usualmente un motor eléctrico, cuyo consumo aparece regularmente en la facturación mensual. Sería una suerte para la humanidad que no fuese necesario el suministro externo de energía, pero ha de admitirse, ciertamente, que la experiencia indica lo contrario. Este enunciado negativo nos conduce al *enunciado de Clausius para el segundo principio:*

No es posible proceso alguno cuyo único *resultado sea la transferencia de calor desde un cuerpo frío a otro más caliente.*

A primera vista, los enunciados de Kelvin-Planck y de Clausius parecen no estar relacionados entre sí, pero veremos en seguida que son equivalentes en todos sus aspectos.

6.7. EQUIVALENCIA DE LOS ENUNCIADOS DE KELVIN-PLANCK Y DE CLAUSIUS

Adoptemos la notación siguiente:

K = veracidad del enunciado de Kelvin-Planck,
$-K$ = falsedad del enunciado de Kelvin-Planck,
C = veracidad del enunciado de Clausius,
$-C$ = falsedad del enunciado del Clausius.

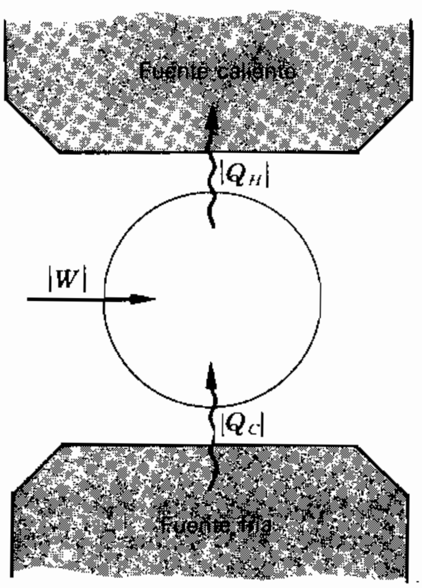

Figura 6.9. Representación simbólica de un frigorífico.

Dos proposiciones o enunciados se dice que son equivalentes cuando la veracidad de uno implica la del segundo y la veracidad del segundo implica la del primero. Utilizando el símbolo $\supset$ para significar «implica» y el símbolo $\equiv$ para designar equivalencia, tenemos, por definición,

$$K \equiv C$$

si $$K \supset C \quad \text{y} \quad C \supset K.$$

Ahora bien, puede demostrarse fácilmente que

$$K \equiv C$$

si $$-K \supset -C \quad \text{y} \quad -C \supset -K.$$

Así, para probar la equivalencia de K y C, debemos demostrar que la contradicción de un enunciado implica la del segundo y viceversa.

1. Para probar que $-C \supset -K$, consideremos un frigorífico, representado en el lado izquierdo de la Figura 6.10, que *no necesita trabajo* para pasar $|Q_2|$ unidades de calor desde una fuente fría a una fuente caliente y que, por tanto, contradice el enunciado de Clausius. Supongamos que un motor térmico (a la derecha) trabaja también entre las dos mismas fuentes de modo que se cede el calor $|Q_2|$ a la fuente fría. Naturalmente, el motor no contradice ningún principio, pero el frigorífico y el motor *en conjunto* constituyen un dispositivo autónomo cuyo único efecto es tomar el calor $Q_1 - Q_2$ de la fuente caliente y convertirlo *todo* en trabajo. En consecuencia, el conjunto de frigorífico y motor constituyen una contradicción del enunciado de Kelvin-Planck.

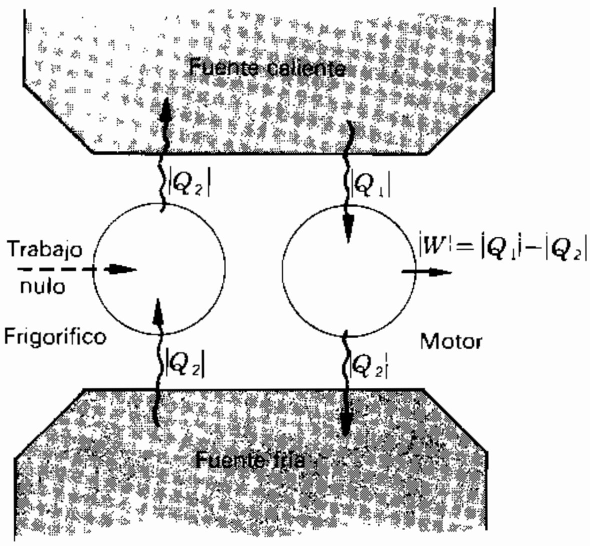

Figura 6.10. Demostración de que $-C \supset -K$. El frigorífico de la izquierda es una contradicción de C; el frigorífico y el motor actuando conjuntamente constituyen una contradicción de K.

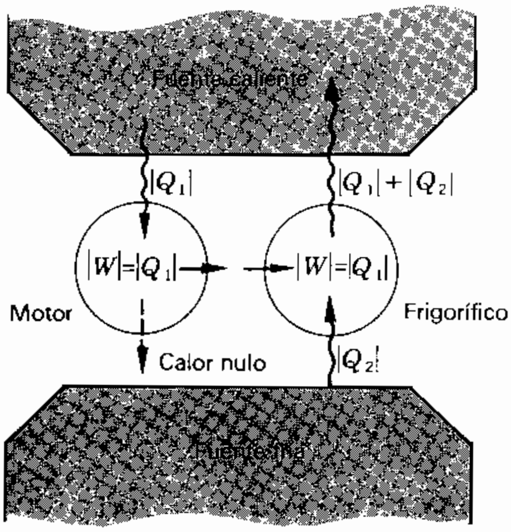

Figura 6.11. Demostración de que $-K \supset -C$. El motor de la izquierda es una contradicción de K; el motor y el frigorífico actuando conjuntamente constituyen una contradicción de C.

2. Para probar que $-K \supset -C$, consideremos un motor, representado en el lado izquierdo de la Figura 6.11, que no cede calor a la fuente fría y que, por consiguiente, contradice el enunciado de Kelvin-Planck. Supongamos que un frigorífico (a la derecha) trabaja también entre las dos mismas fuentes y utiliza todo el trabajo suministrado por el motor. El frigorífico no contradice ningún principio, pero el motor y el frigorífico *en conjunto* constituyen un dispositivo autónomo cuyo único efecto es pasar el calor $|Q_2|$ de la fuente fría a la caliente. Por tanto, el conjunto de motor y frigorífico constituyen una contradicción del enunciado de Clausius.

Llegamos, por tanto, a la conclusión de que ambos enunciados del segundo principio son equivalentes. En cada razonamiento en particular puede usarse uno u otro.

PROBLEMAS

6.1. La Figura P6.1 representa un diagrama PV simplificado del ciclo Joule para un gas ideal. Todos los procesos son cuasi-estáticos y C_P es constante. Demostrar que el rendimiento térmico de un motor que realiza este ciclo es

$$1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

6.2. La Figura P6.2 representa un diagrama PV simplificado del ciclo Sargent para un gas ideal. Todos los procesos son cuasi-estáticos y las capacidades caloríficas son constantes. Demostrar que el rendimiento térmico de un motor que realiza este ciclo es