

## MOTORES, FRIGORIFICOS Y SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

### 6.1. TRANSFORMACION DE TRABAJO EN CALOR, Y VICEVERSA

Si se frotran entre sí dos piedras debajo del agua, el trabajo contra el rozamiento se transforma en energía interna que tiende a elevar su temperatura. Sin embargo, tan pronto como la temperatura de las piedras es superior a la del agua que las rodea, hay un flujo de calor hacia el agua. Si la masa de ésta es suficientemente grande o está fluyendo continuamente, no habrá elevación apreciable de temperatura, y el agua puede considerarse como fuente de calor. Dado que el estado de las piedras es el mismo al final del proceso que al principio, el resultado neto del mismo es simplemente la transformación de trabajo mecánico en calor. Análogamente, si se hace circular una corriente eléctrica por una resistencia sumergida, ya sea en agua corriente o en una gran masa de agua, existe una transformación de trabajo eléctrico en calor, sin modificación de las coordenadas termodinámicas del cable de la resistencia. En general, puede realizarse trabajo de cualquier clase  $W$  sobre un sistema en contacto con una fuente, dando origen a un flujo de calor  $Q$  sin alterar el estado del sistema. El sistema actúa simplemente como intermediario. Es evidente, según el primer principio, que el trabajo  $W$  es igual al calor  $Q$ ; o, dicho de otra forma, la transformación de trabajo en calor se realiza con un rendimiento del 100 por 100. Además, esta transformación puede seguir indefinidamente.

Para estudiar el fenómeno inverso, o sea, la transformación de calor en trabajo, debemos disponer también de un proceso o de una serie de procesos

mediante los cuales puede tener lugar tal transformación indefinidamente y sin suponer cambios en el estado de un sistema cualquiera. En principio, pudiera parecer que la expansión isotérmica de un gas ideal es un proceso adecuado para considerarlo en el estudio de la transformación de calor en trabajo. En este caso no hay cambio de energía interna, ya que la temperatura permanece constante y, por tanto,  $-W=Q$ , o sea, que el calor se ha convertido íntegramente en trabajo. Sin embargo, este proceso implica un cambio de estado del gas. El volumen aumenta y la presión disminuye hasta alcanzar la atmosférica, momento en que se detiene el proceso. Por consiguiente, no puede utilizarse indefinidamente.

Lo que se requiere es una serie de procesos mediante los cuales un sistema sea llevado de nuevo a su estado inicial, es decir, un *ciclo*. Cada uno de los procesos que constituye un ciclo puede suponer paso de calor hacia o desde el sistema, así como la realización de trabajo por o sobre el sistema. Así, para un ciclo completo

el número total de unidades de calor absorbido por el sistema lo designaremos mediante el símbolo  $|Q_H|$ ,

el número total de unidades de calor cedido por el sistema lo designaremos mediante el símbolo  $|Q_C|$ , y

el número total de unidades de trabajo realizado por el sistema lo designaremos mediante el símbolo  $|W|$ .

Las tres magnitudes  $|Q_H|$ ,  $|Q_C|$  y  $|W|$  deben expresarse *en las mismas unidades*. Cuando se hace así son *valores absolutos* representados solamente por *números positivos*.

En todos los capítulos de este libro, *a excepción del presente*, los símbolos  $Q$  y  $W$  son magnitudes algebraicas que pueden tomar valores tanto negativos como positivos. Por tanto, si se calcula el calor transferido como consecuencia de una imitación isotérmica, por ejemplo, y se obtiene el resultado  $Q = -100$  J, esto requiere no sólo que  $|Q|$  sea 100 J, sino también que se trata de calor *cedido* por el sistema a la fuente en contacto con el sistema. En este capítulo trataremos de motores y frigoríficos en los que conoceremos siempre el sentido de paso de  $Q$  y  $W$ , y solamente nos interesarán los valores absolutos de  $Q$  y  $W$ .

Si  $|Q_H|$  es mayor que  $Q_C$  y si  $W$  es realizado por el sistema, el dispositivo mecánico mediante cuyo funcionamiento el sistema recorre el ciclo se denomina *motor térmico*. El objeto de un motor térmico es suministrar continuamente trabajo al exterior, realizando una y otra vez el mismo ciclo. El trabajo neto en un ciclo es la energía cedida y el calor absorbido por la sustancia que trabaja es la energía absorbida. El *rendimiento térmico*  $\eta$  del motor se define así:

$$\text{Rendimiento térmico} = \frac{\text{trabajo producido en cualesquiera unidades de energía}}{\text{calor absorbido en las mismas unidades de energía}}$$

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (6-1)$$

Aplicando el primer principio a un ciclo completo, y recordando que no hay variación de energía interna, se obtiene

$$|Q_H| - |Q_C| = |W|,$$

y por tanto

$$\eta = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|},$$

o sea,

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}} \quad (6-2)$$

De esta ecuación se deduce que  $\eta$  será la unidad (rendimiento del 100 por 100) cuando  $Q_C$  sea nulo. En otras palabras, si se puede construir un motor que trabaje de forma cíclica de modo que el sistema no ceda calor, la transformación del calor absorbido en trabajo tendrá lugar con un rendimiento del 100 por 100.

La transformación de calor en trabajo se realiza de ordinario en la práctica mediante dos tipos generales de motor: el *motor de combustión externa*, tal como el motor de Stirling y la máquina de vapor, y el *motor de combustión interna*, tal como el motor de gasolina y el motor diesel. En ambos tipos, un gas o una mezcla de gases contenidos en un cilindro experimenta un ciclo, haciendo, de este modo, que un pistón comunique a un eje un movimiento de rotación, venciendo una fuerza. En ambos motores es necesario que, en determinado instante del ciclo, el gas del cilindro sea llevado a alta temperatura y alta presión. En el motor de Stirling y en la máquina de vapor esto se consigue mediante un horno exterior. Sin embargo, la alta temperatura y alta presión alcanzadas en un motor de combustión interna se producen por la reacción química entre un combustible y aire, que tiene lugar en el propio cilindro. En el motor de gasolina, la combustión de la gasolina con aire tiene lugar con explosión por la acción de una chispa eléctrica. Sin embargo, en el motor diesel se utiliza como combustible un aceite pesado cuya combustión se hace más lentamente pulverizando el aceite dentro del cilindro a un ritmo adecuado.

## 6.2. EL MOTOR STIRLING

En 1816, antes incluso de poder hablar de ciencia termodinámica, un clérigo de la Iglesia de Escocia llamado Robert Stirling diseñó y patentó un motor de aire caliente que podía convertir en trabajo parte de la energía liberada al