



Sadi Carnot (1796-1832) se preguntaba hasta dónde podían ser perfeccionadas. Carnot estudió el funcionamiento de las máquinas de vapor de su época y fue capaz de descubrir el principio en que se basaban.

### LA MÁQUINA DE NEWCOMEN

Carnot encontró que todas las máquinas de vapor funcionaban bajo un esquema similar, por lo que a manera de ejemplo analizaremos únicamente la de Newcomen, representada esquemáticamente en la Figura 1.

La máquina de Newcomen está constituida por una caldera en la que se obtiene el vapor, un cilindro, un recipiente con agua fría y un dispositivo mecánico para hacer trabajo (un balancín). Funciona de la siguiente manera: el vapor que proviene de la caldera se introduce al cilindro, lo que provoca que el émbolo suba y que con ello se mueva el balancín (Figura 1a). Una vez lleno el cilindro, se impide la entrada de más vapor al cerrarse la válvula de conexión con la caldera y abrirse la que conecta con el recipiente de agua fría. Con la entrada de ésta, se condensa el vapor en el cilindro, provocándose un vacío que hace bajar el émbolo y a su vez regresar al balancín (Figura 1b). La repetición cíclica de estas operaciones hace que el balancín describa un movimiento que puede ser utilizado para efectuar un trabajo.

### LAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Al analizar máquinas como la de Newcomen, Carnot notó que todas las máquinas de vapor estaban constituidas de:

- una **fuentes de calor** a alta temperatura generalmente una caldera, en donde el agua que hervía generaba vapor (Figura 2);
- un enfriador o **vertedero de calor** a baja temperatura generalmente un recipiente de agua fría o la atmósfera;
- un **dispositivo mecánico**, colocado entre las dos fuentes generalmente un pistón conectado a un balancín o a un sistema de engranajes planetarios, cuyo movimiento periódico cíclico era utilizado para obtener **trabajo**, y
- finalmente, para hacer funcionar la máquina se requería de una **sustancia de trabajo**, que era el vapor.

Carnot descubrió que el vapor gana calor, debido a su calentamiento en la caldera y que luego, al empujar el émbolo, parte de ese calor se transforma en trabajo y el vapor ya usado cede la otra parte del calor al enfriador. De aquí que concluyera que el calor en las máquinas de vapor, al ser transmitido de la fuente de calor al

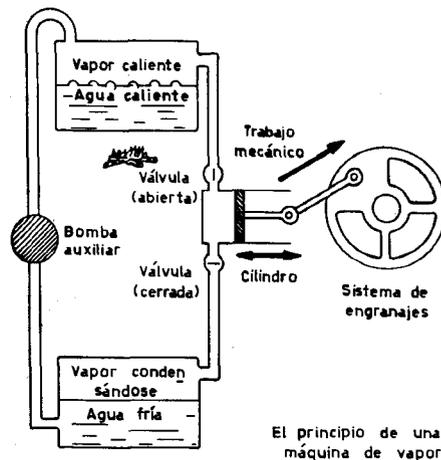


Figura 2.

vertedero de calor, es parcialmente transformado en trabajo (Figura 3). Así, se convertía parte del calor proporcionado en trabajo. Actualmente, a las máquinas que tienen esta característica se les denomina **máquinas térmicas**.

Carnot advirtió que para que toda máquina térmica funcione es necesario contar con una fuente de calor a alta temperatura y con un vertedero de calor a baja temperatura. Por tanto, siempre una parte del calor recibido será cedido al vertedero de calor, siendo imposible la conversión de todo el calor en trabajo. (Ésta es ya una manera de enunciar la Segunda Ley de la Termodinámica).

Haciendo un símil entre el funcionamiento de una máquina térmica (Figura 3) y el de una rueda de agua (Figura 4), Carnot obtuvo otra conclusión importante: así como en una rueda de agua el rendimiento su capacidad para realizar trabajo depende de la cantidad de agua que

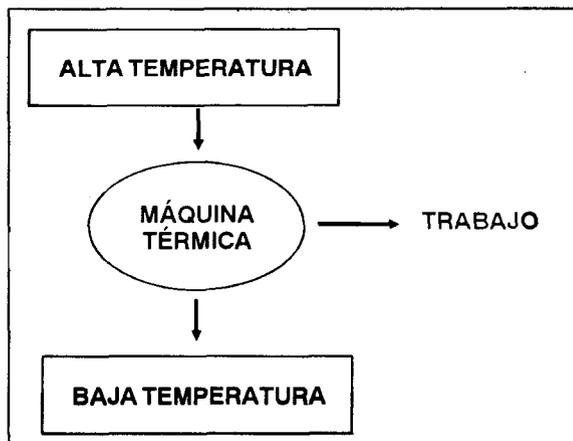


Figura 3.

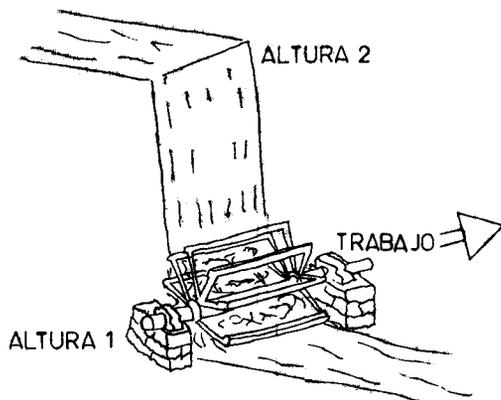


Figura 4.

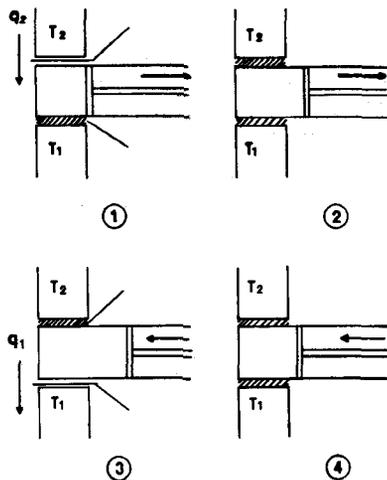
cae, así como de la diferencia de alturas entre las que cae, en una máquina térmica, el rendimiento depende de la cantidad de calor que es cedido por la fuente a alta temperatura y de la diferencia de temperaturas entre la fuente y el vertedero de calor. En particular, Carnot descubrió que el rendimiento de la máquina térmica depende de la diferencia de temperaturas de las fuentes térmicas entre las que trabaja:

$$\text{rendimiento} \propto (T_2 - T_1)$$

### EL CICLO DE CARNOT

Carnot fue más allá aún. Siendo testigo de cómo en Inglaterra se iban perfeccionando las máquinas de vapor, se planteó el problema de hasta

Figura 5.



que punto tales máquinas podían ser perfeccionadas. En otros términos, se preguntó cuál sería la máxima cantidad de trabajo que se podía obtener a partir de una cierta cantidad de calor suministrado, es decir, ¿cuál sería el máximo rendimiento que podía alcanzar una máquina térmica? Para contestar, Carnot imaginó una máquina ideal, la que funcionaba reversiblemente entre dos fuentes a diferente temperatura, utilizaba un pistón perfectamente ajustado y como sustancia de trabajo un fluido elástico, como el aire atmosférico. Tal sustancia se expandía y comprimía a través de un proceso cíclico de cuatro etapas, actualmente bien conocidas, al que llamamos ciclo de Carnot (figuras 5 y 6).

Carnot utilizó este ciclo para demostrar que

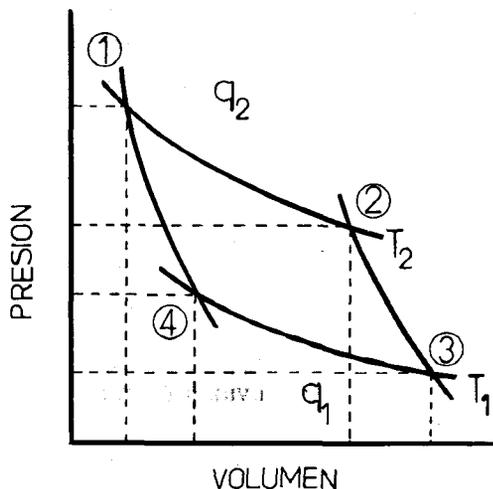


Figura 6.

no podía existir máquina térmica que tuviera un rendimiento mayor al de su máquina ideal. Para ello propuso la característica de que fuera reversible. Efectivamente, una máquina reversible es aquella que al funcionar en sentido inverso, es decir, proporcionándole el mismo trabajo que antes había realizado, regresa, junto con sus alrededores, a su estado inicial; en contraste, una máquina irreversible es aquella que al proporcionársele el trabajo que antes había realizado, no alcanza a regresar a sus condiciones iniciales. De esta forma, la máquina reversible hace más trabajo (tiene un mayor rendimiento) que la irreversible.

Una vez que demostró que la máquina reversible tiene mayores rendimientos que cualquier otra máquina irreversible, pasó a demostrar que no podía existir ninguna máquina que fuera más eficiente que la suya. Para ello imaginó que conectaba su máquina reversible a otra que tuviera un rendimiento mayor. El trabajo realizado por esta segunda máquina serviría para hacer funcionar en reversa a la máquina de Carnot. Si esto fuera posible se lograría construir una máquina de movimiento perpetuo, lo que Carnot rechazó correctamente. Por tanto, concluyó que no puede existir ninguna máquina con mayor rendimiento que la ideal reversible.

De esta manera, Carnot fijó a la máquina reversible como la de mayor rendimiento, con lo que señaló la existencia de un límite para el perfeccionamiento de las máquinas térmicas (aunque fue incapaz de cuantificar tal límite).

Carnot publicó sus conclusiones en 1824 en un libro titulado "*Réflexion sur la Puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*" (Reflexiones sobre la potencia motriz debida al fuego y sobre las máquinas adaptadas para desarrollar esta potencia). Desafortunadamente este libro tuvo poca difusión y pasó casi inadvertido en aquella época, máxime que Carnot murió ocho años después.

Unos veinte años más tarde Clapeyron utilizó este libro como material base para un artículo que, a su vez, atrajo la atención de Sir William Thompson (1824-1907) y de Emanuel Clausius (1822-1888), los dos prominentes científicos que desarrollarían posteriormente la teoría de la Termodinámica.

## DESENLACE

Carnot demostró que solamente una fracción del calor cedido a una máquina térmica es convertido en trabajo; que el rendimiento depende de la diferencia de temperaturas entre las fuentes de calor y que el mayor rendimiento posible lo presentan las máquinas reversibles. A pesar de lo anterior, su trabajo no fue completo, siendo Thompson y Clausius quienes lo llevaron hasta sus últimas consecuencias.

En 1851, Thompson aceptó la equivalencia entre el calor y el trabajo, que en la década anterior había quedado bien establecida; la aplicó a la máquina térmica, con lo que pudo definir la eficiencia ( $\varepsilon$ ) de tal máquina como la razón entre el trabajo realizado ( $W$ ) y el calor suministrado ( $Q_2$ ):  $\varepsilon = W/|Q_2| = (|Q_2| - |Q_1|)/|Q_2|$ ; demostró que dichas eficiencias debía ser menor a la unidad, ya que siempre parte del calor

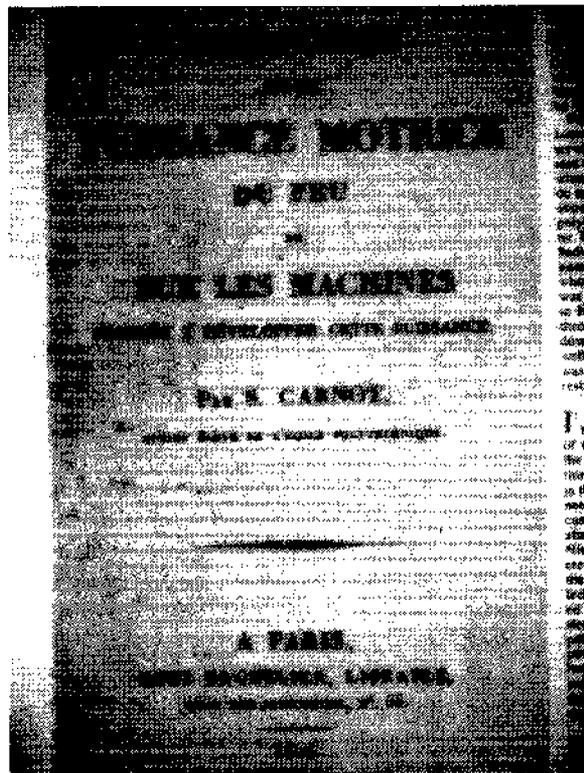


Figura 7.

suministrado se cede a la fuente a menor temperatura. Thompson también demostró que tal eficiencia dependía de la temperatura absoluta ( $T$ ) de las fuentes entre las que funcionaba la máquina térmica:

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

También introdujo el término de *energía* y trabajó sobre la Primera y Segunda Leyes de la Termodinámica.

Posteriormente, en 1864, Clausius introdujo el concepto de entropía y generalizó estos trabajos en forma de ecuaciones diferenciales, sentando con ello las bases de la Termodinámica formal.

Finalmente, Thompson y Helmholtz integraron esta formulación a los esquemas de la Física Clásica, con lo que lograron que la teoría Termodinámica fuera aceptada en definitiva.  $\Sigma$

## BIBLIOGRAFÍA

- Bernal, J. D., *Ciencia e Industria en el Siglo XIX*. Ediciones Martínez Roca, S. A., Barcelona, España, 1973.
- Bernal, J. D., *La Proyección del Hombre. Historia de la Física Clásica*. Siglo XXI, México, 1975.
- Wilson, S. S., Sadi Carnot, *Sci. Am.*, 245(2), 102-114, 1981.