a) Colocado en un baño de temperatura constante, T_1, se expande desde el volumen V_1 al volumen V_2. ISOTERMA

b) Se expande adiabáticamente desde el volumen V_2 al V_3.

c) Colocado en contacto térmico con un baño cuya temperatura, T_2, sea constantemente igual a la que tenía el sistema al final de la operación anterior se comprime desde el volumen V_3 hasta un volumen V_4. ISOTERMA

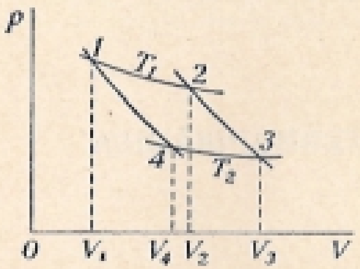

Fig. 5. — El ciclo de Carnot en el diagrama $V - p$

d) Se comprime adiabáticamente hasta el volumen primitivo. Para que esto sea posible, habrá que elegir convenientemente el volumen V_4.

Si las transformaciones se efectúan por vía reversible, el punto figurativo recorrerá un cuadrilátero formado por dos isotermas y por dos adiabáticas, pero si las transformaciones son irreversibles, las curvas que representan la presión exterior en función del volumen no serán ya las isotermas y las adiabáticas anteriores, sino otras curvas situadas dentro del referido cuadrilátero. En uno y otro caso, el sistema sólo puede tomar calor de manantial caliente y cederlo al frío.

Si se opera por vía reversible y se invierte el sentido, los trabajos obtenidos en las distintas partes del ciclo serán los mismos que antes, pero cambiados de signo, y como lo mismo sucede con la energía interna, el primer principio exige que también las cantidades de calor sean las mismas que antes, pero de signo contrario.

Si Q_{12} y Q_{34} son los calores tomados de ambos manantiales (el segundo negativo), el primer principio exige que sea $L = Q_{12} + Q_{34}$.

El rendimiento se define como la relación entre el trabajo obtenido y el calor, Q_{12}, *tomado del manantial caliente:*

$$\eta = \frac{L}{Q_{12}} = \frac{Q_{12} + Q_{34}}{Q_{12}}. \qquad [2, 1]$$

Si para simplificar la escritura se hace:

$$Q_{12} = Q_1; \quad Q_{34} = -Q_2$$

la expresión del rendimiento del ciclo de Carnot será:

$$\boxed{\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.} \qquad [2, 2]$$

3. Corolarios del segundo principio.

Empecemos por demostrar que en todo ciclo de Carnot, tanto si es reversible como si no lo es, ha de ocurrir que, cuando $L > 0$, esto es, cuando la máquina produce trabajo, ha de ser $Q_1 > 0$ y $Q_2 > 0$, de modo que el sistema habrá de tomar calor del baño que está a temperatura alta y ceder calor al que está a temperatura baja.

Pues si fuera $Q_1 = 0$ ó $Q_2 = 0$, habríamos obtenido trabajo sin más que utilizar uno de los baños, lo cual es imposible por oponerse a ello el segundo principio. Si fuera $Q_1 < 0$, querría decir que el baño caliente había recibido el calor, y podríamos volverlo a su primitivo estado sin más que ponerlo en contacto térmico con el baño frío, con lo cual habríamos obtenido trabajo sin hacer otra cosa que modificar el estado de este último baño. Finalmente, si fuera $Q_2 < 0$, el baño frío habría perdido calor, y bastaría también el contacto térmico entre ambos baños para que el frío recuperase su estado primitivo, lo cual está también en contradicción con el segundo principio.

1.° *Es imposible que una máquina térmica, que funcione por ciclos irreversibles entre dos niveles térmicos, tenga un rendimiento superior al de un ciclo reversible entre los mismos.*

La demostración se logra por reducción al absurdo. Pues si η' es el rendimiento de la máquina irreversible y η el de la reversible, y fuera (fig. 6) $\eta' > \eta$, habría de ser, a igualdad de calor Q_1 tomado del baño caliente,

$$L' > L.$$

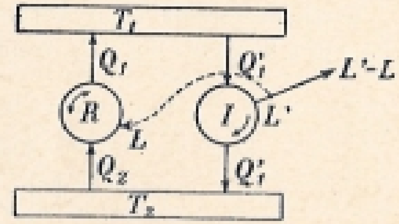

Fig. 6. — Entre dos niveles térmicos, T_1 y T_2, el rendimiento del ciclo reversible, *R*, es mayor que el del irreversible, *I*

Hágase funcionar la máquina irreversible hasta obtener el trabajo L', y luego póngase en marcha la reversible, en sentido contrario, hasta que ceda al baño caliente la misma cantidad de calor, Q_1, que de él había tomado la irreversible (1). Con esto se habrá obtenido un trabajo neto L'-$L > 0$, sin que se haya modificado más que el baño frío, lo cual está en contradicción con el segundo principio.

2.° *Todos los ciclos reversibles realizados entre dos temperaturas dadas han de tener igual rendimiento.*

La demostración es análoga a la del corolario anterior.

---

(1) Para que la demostración sea rigurosa es preciso probar que se puede realizar este requisito con ciclos completos de ambas máquinas, lo cual no presenta dificultad.