

4. Le macchine termiche consumano calore e producono lavoro, le macchine frigorifere spostano calore da bassa ad alta temperatura consumando energia: entrambe devono poter lavorare in modo continuativo, e quindi attraverso una successione di cicli che si ripetono identicamente. Ciò presuppone che gli scambi di calore abbiano luogo, in entrata come in uscita, con corpi la cui temperatura non viene significativamente modificata dagli scambi termici, con corpi quindi di grande capacità termica e di grande conducibilità termica (cosicché non possano subire variazioni di temperatura anche solo temporanee e locali). Un sistema immaginario la cui temperatura si mantiene uniforme e costante nonostante gli scambi di calore, e che scambia energia solo attraverso flusso di calore (nessuna esecuzione di lavoro) si chiama **sorgente termica** (o *termostato*, o *serbatoio di calore*). In molte applicazioni, il terreno, l'aria atmosferica, l'acqua di un fiume o del mare possono essere assimilati a sorgenti. Analogamente, potremo schematizzare come sorgente la cella di un frigorifero, dalla quale viene continuamente estratto, da parte del fluido refrigerante, tanto calore quanto occorre perché la temperatura interna resti pressoché costante, nonostante il continuo flusso di calore dall'ambiente esterno (e dagli alimenti introdotti) verso la cella.

In un ipotetico ciclo reversibile gli scambi di calore tra sistema evolvente e sorgenti termiche avverrebbero senza differenze di temperatura tra sistema e sorgenti: è quindi indifferente, se ci riferisce a cicli reversibili, parlare di temperatura del sistema piuttosto che di temperatura della sorgente con cui il sistema scambia calore.

5. Nel computo del rendimento di un ciclo motore (o dell'efficienza di un ciclo frigorifero) ci si può regolare in due modi diversi, ottenendo con ciò, almeno in generale, valori diversi: si può includere nel calcolo *tutto* il calore scambiato, sia in entrata come in uscita, oppure si può escludere il calore che viene scambiato dal sistema, prima in entrata e poi in uscita, con una stessa sorgente (o con sorgenti che si trovano alla stessa temperatura). Il primo criterio viene spesso seguito, a livello scolastico, nello svolgimento di esercizi. Il secondo criterio appare invece più opportuno se, come in termodinamica è sempre implicito, si fa riferimento alle applicazioni tecniche: in effetti, se una stessa quantità di calore viene prima sottratta ma poi restituita a una stessa sorgente, tutto va in pratica, dal punto di vista della possibilità di convertire calore in lavoro, come se tali scambi di calore non avessero avuto luogo. Sembrerebbe quindi opportuno, ad evitare ambiguità, contraddistinguere con una diversa denominazione i rendimenti valutati nei due diversi modi: potremmo ad esempio chiamare «formale» o «apparente» il rendimento calcolato col primo criterio (conteggiando cioè *tutti* gli scambi di calore verificatisi), e chiamare «effettivo» o «reale» l'altro. Purtroppo non esiste finora al riguardo alcuna precisa convenzione.

6. Se, in un ciclo, il calore entra sempre e solo a temperature diverse da quelle di uscita, se quindi non si verifica uno scambio di calore nei due sensi con una stessa sorgente, il problema di distinguere un rendimento effettivo da un rendimento formale non si presenta (questo accade ad esempio – lo si verifichi – per un ciclo costituito da un'espansione isobara più un'espansione adiabatica

più una compressione isoterma). Altrimenti, *il rendimento effettivo è sempre maggiore del rendimento formale*: nell'espressione infatti del rendimento,  $\eta = 1 - q_u/q_e$ , considerare il rendimento effettivo anziché quello formale significa togliere una stessa quantità a numeratore e denominatore di una frazione ( $q_u/q_e$ ) il cui valore è inferiore a 1, con ciò diminuendo il valore della frazione.

7. Supponiamo ad esempio che un gas perfetto subisca il ciclo reversibile mostrato in fig. 1: prima una espansione isobara, poi un'espansione isoterma, poi un raffreddamento isocoro, infine una compressione isoterma. Il calore complessivamente scambiato in entrata è

$$q_e = nC_p(T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\max} \ln(V_3/V_2).$$

Il calore scambiato in uscita è

$$q_u = nC_v(T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\min} \ln(V_4/V_1).$$

Se allora teniamo conto di *tutto* il calore scambiato il rendimento del ciclo è

$$\eta = 1 - \frac{nC_v(T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\min} \ln(V_4/V_1)}{nC_p(T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\max} \ln(V_3/V_2)}.$$

Si osservi però che, detta  $T$  una qualsiasi temperatura tra la massima e la minima, il gas prima si riscalda, lungo l'isobara, dalla temperatura  $T$  alla temperatura  $T+dT$  ricevendo il calore  $nC_p dT$ , poi, lungo l'isocora, restituisce il calore  $nC_v dT$  raffreddandosi da  $T+dT$  a  $T$ . Perciò tutto va in pratica come se alle temperature intermedie tra le due estreme il gas non cedesse alcun calore, e assorbisse il calore  $nC_p(T_{\max} - T_{\min}) - nC_v(T_{\max} - T_{\min}) = nR(T_{\max} - T_{\min})$ .

Il rendimento del ciclo diventa allora

$$\eta = 1 - \frac{nRT_{\min} \ln(V_4/V_1)}{nR(T_{\max} - T_{\min}) + nRT_{\max} \ln(V_3/V_2)}$$

superiore al precedente per quanto sopra si è visto.

## 11.2 Il ciclo di Carnot

1. Il prototipo delle trasformazioni cicliche, e senza dubbio il ciclo più importante dal punto di vista teorico, è il ciclo di Carnot, che è un ciclo motore reversibile a due sorgenti, costituito quindi da due isoterme e due adiabatiche: *nessuna limitazione* è posta, in linea di principio, alla natura del sistema fisico che subisce il ciclo. Nel caso di un gas perfetto possiamo rappresentare il ciclo come in fig.2: a partire dallo stato di equilibrio 1, il gas si espande in modo reversibile, dapprima a tempe-

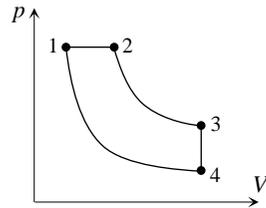


Fig. 1

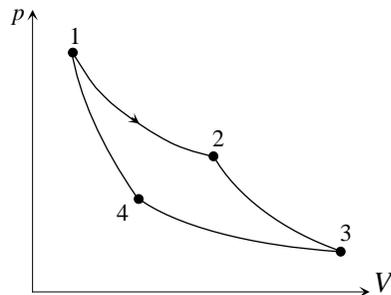


Fig. 2