

## Capitolo 19

Una trasformazione termodinamica di 1 kg di un gas perfetto nel piano  $p - v$  (nel senso dei volumi crescenti) richiede una somministrazione di calore dall'esterno  $q_1$  da parte di una sorgente di calore (S) che consenta al gas di sviluppare un certo lavoro di espansione  $l_1$  pari all'area sottesa dalla trasformazione stessa. Tale lavoro di espansione può essere convertito in lavoro meccanico tramite una macchina opportuna se vi è **una seconda trasformazione che proceda nel senso dei volumi decrescenti in modo che il lavoro  $l_2$  di compressione somministrato (speso, quindi negativo) dall'esterno risulti minore del lavoro di espansione svolto dal fluido mediante una linea più bassa** nel piano  $p - v$ , mentre il gas cede all'esterno un certo calore  $q_2$  assorbito da un refrigerante (R) che ha la funzione inversa a quella della sorgente di calore ( $q_2$  deve essere considerato come *perduto* in quanto il basso valore della temperatura alla quale avviene lo scambio lo rende inutilizzabile). In questo modo il gas ha compiuto un ciclo chiuso di trasformazioni, definito **ciclo termico**. Trascurando per ora le perdite, il lavoro utilizzabile è:

$$l = q_1 - q_2 \quad (19.1)$$

nel diagramma  $p - v$  il lavoro teoricamente utilizzabile è dato dall'area racchiusa dalle linee che delimitano il ciclo termico.

Nel caso che il ciclo sia percorso in senso antiorario il gas assorbe dal refrigerante il calore  $q_2$  (a bassa temperatura) e cede alla sorgente il calore  $q_1 > q_2$  tramite la somministrazione del lavoro esterno  $l$  (pari all'area del ciclo stesso) allora la macchina funzionerà

come operatrice assorbendo energia meccanica per convertirla in calore:

$$q_1 = q_2 + l \quad (19.2)$$

Il **rendimento termico ideale** di un ciclo è:

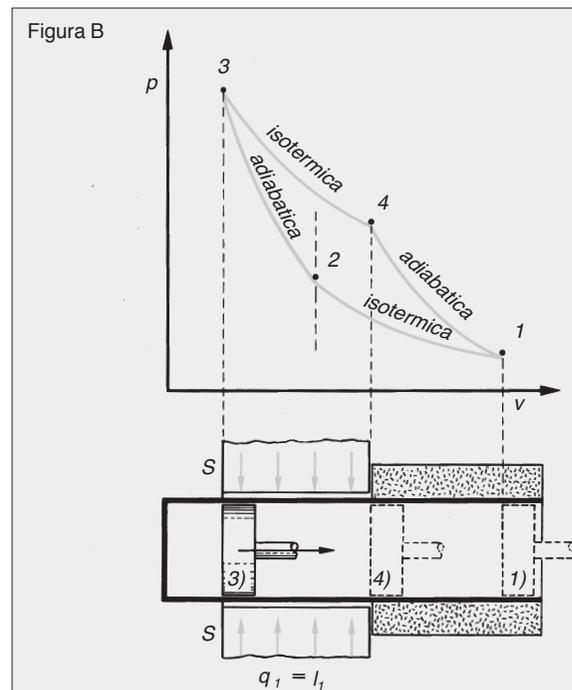
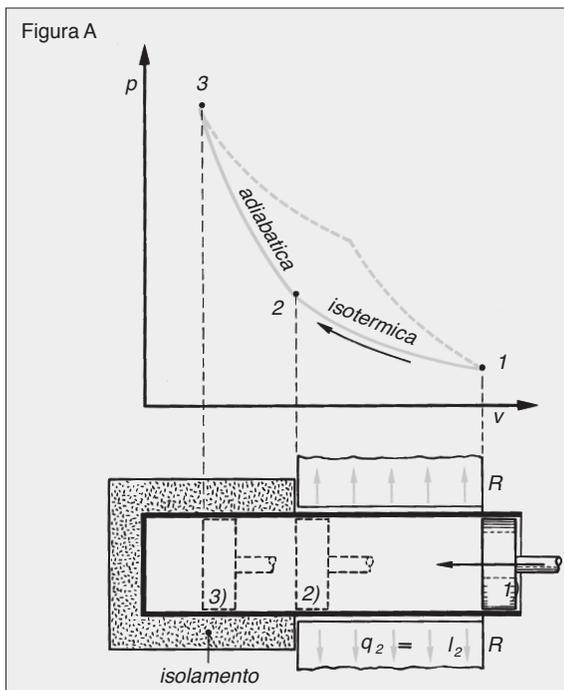
$$\eta_{id} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (19.5)$$

La differenza esistente fra i rendimenti delle macchine termiche e delle macchine idrauliche è che per queste ultime il rendimento totale è dato dal prodotto di tre rendimenti parziali mentre per le macchine termiche bisogna considerare anche il rendimento termico ideale del ciclo che la macchina segue nel suo funzionamento. Quindi il rendimento di una motrice termica è minore di quello di una corrispondente motrice idraulica, il che conferma che il calore è una forma di energia di qualità scadente.

Una trasformazione termodinamica si definisce **invertibile** quando può essere ripercorsa dal fluido in senso inverso ripetendo tutti i fenomeni avvenuti nel passaggio diretto. Le trasformazioni che avvengono in pratica sono lontane dal realizzare una condizioni di invertibilità.

**Carnot** pensò di elaborare 1 kg di gas perfetto secondo un ciclo termico costituito da quattro trasformazioni invertibili: due isoterme e due adiabatiche (figura A e B):

- lo stantuffo si muove verso sinistra comprimendo il gas entro il cilindro che è a contatto con il refrigerante (R) il quale sottrae al fluido il calore  $q_2$  pari al





biellamanovella; supponiamo che il cilindro possa essere posto a contatto alternativamente con una sorgente di calore (S) e con un refrigerante (R):

- (1→2) **lo stantuffo, muovendosi verso sinistra, esercita sul gas una compressione adiabatica;**
- (2→3) **trasformazione a volume costante:** la sorgente (S) a contatto con il cilindro trasferisce il calore  $q_1$  tanto rapidamente da non dare la possibilità allo stantuffo di spostarsi;
- (3→4) **espansione adiabatica:** lo stantuffo si sposta verso destra spinto dalla  $p_3$  del gas con una spinta tanto maggiore quanto più alta è  $p_3$ . Lo stantuffo si sposta di conseguenza;
- (4→1) **trasformazione a volume costante:** il refrigerante (R) assorbe dal gas il calore  $q_2 (< q_1)$  tanto rapidamente da considera il volume costante mentre decrescono pressione e temperatura.

In definitiva il **ciclo Otto** è costituito da due trasformazioni adiabatiche e da due isometriche. Il suo rendimento è dato da:

$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (19.10)$$

dove  $r$  è il rapporto di compressione volumetrico  $v_1/v_2$  e  $\gamma = 1,41$ .

Il **ciclo Diesel** differisce dal ciclo Otto solo nella fase di somministrazione del calore  $q_1$  al fluido contenuto nel cilindro: **la somministrazione di calore avviene gradualmente, mentre lo stantuffo inizia il moto di ritorno in modo che l'aumento di volume generato dal pistone in moto compensi l'incremento di pressione conseguente alla somministrazione di calore. In altre parole la trasformazione 2 → 3 può ritenersi a pressione costante.** Il rendimento è:

$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{C^\gamma - 1}{\gamma \cdot (C-1)} \quad (19.12)$$

dove  $r$  è il **rapporto di compressione volumetrico** e  $C$  il **rapporto di combustione**  $v_3/v_2$ ; nonostante  $(C^\gamma - 1) / \gamma \cdot (C - 1)$  sia positivo, il **rendimento di un motore**

**diesel è lievemente superiore a quello del motore a scoppio** perché è diverso il valore di  $r$ .

Il **ciclo Sabathé** è composto da:

- (1→2) **una fase di compressione adiabatica** che eleva il valore della pressione e della temperatura mentre diminuisce il volume specifico;
- (2→2') **una prima somministrazione di calore**  $q'_1$  da parte della sorgente (S) tanto rapida da non far variare il volume (come nel ciclo Otto);
- (2'→3) **una seconda somministrazione di calore**  $q''_1$  mentre lo stantuffo inizia a spostarsi verso destra (come nel ciclo Diesel) a pressione costante;
- (3→4) **una fase di espansione adiabatica** durante la quale il gas spinge lo stantuffo;
- (4→1) **una cessione al refrigerante (R) del calore residuo**  $q_2$  istantaneamente in modo da mantenere invariato il volume (trasformazione isometrica).

Il rendimento di un ciclo Sabathe è:

$$\eta_{id} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} \cdot \frac{\rho \cdot C^\gamma - 1}{\rho - 1 + \rho \cdot \gamma \cdot (C - 1)} \quad (19.16)$$

dove  $r = v_1/v_2$ ,  $C = v_3/v'_2$  e  $\rho = p'_2/p_2$ .

Il **ciclo di Brayton** è il ciclo termodinamico su cui è basato il funzionamento delle turbine a gas:

- (1→2) **compressione adiabatica;**
- (2→3) riceve calore  $q_1$  a pressione costante;
- (3→4) espansione adiabatica;
- (4→1) trasformazione a pressione costante dove cede al refrigerante (R) il calore  $q_2 < q_1$ .

Il rendimento è dato da:

$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{\beta^\gamma} \quad (19.17)$$

dove  $\beta$  è il rapporto tra la pressione finale e iniziale.