

## Ciclo di Carnot

Si consideri una macchina termica semplice che compie trasformazioni reversibili, senza violare il secondo principio (fig. 1):

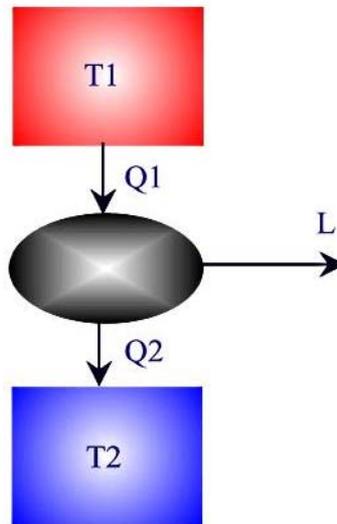


fig. 1

Una macchina di questo tipo è detta *macchina di Carnot*.

In queste ipotesi la variazione di entropia dell' universo deve essere ovviamente nulla, cioè deve essere:

$$\Delta S_{UNIVERSO} = \Delta S_{SERBATOIO1} + \Delta S_{MACCHINA} + \Delta S_{SERBATOIO2} = -\frac{Q_1}{T_1} + 0 + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (1)$$

da cui l' espressione del *teorema di Carnot*:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad (2)$$

che può essere scritto anche equivalentemente:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (3)$$

La macchina di Carnot può effettuare solamente processi isoterfici o adiabatici. In fig. 2 è mostrato il *ciclo di Carnot*:

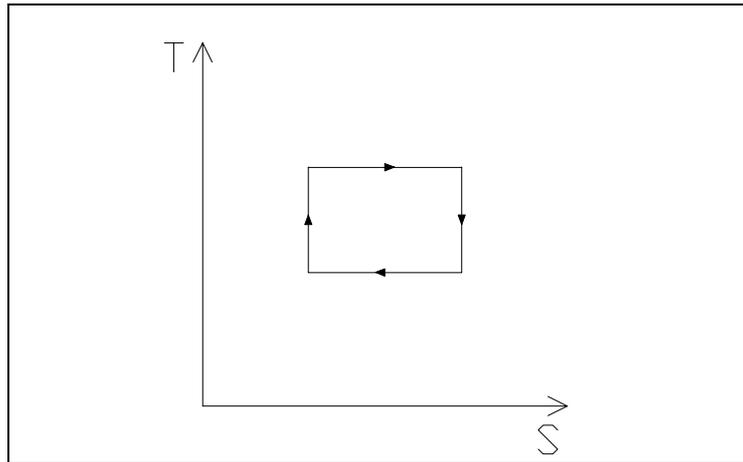


fig. 2

Su un piano P/V (fig. 3):

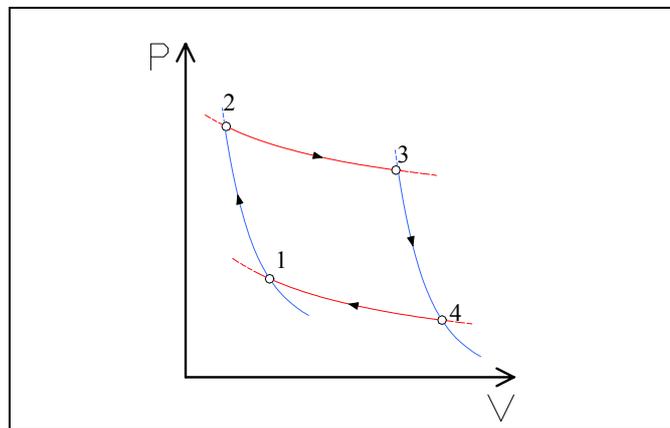


fig. 3

Le trasformazioni eseguite in un ciclo di Carnot sono:

- espansione isotermica (dallo stato **1** allo stato **2**),
- espansione adiabatica (dallo stato **2** allo stato **3**),
- compressione isotermica (dallo stato **3** allo stato **4**),
- compressione adiabatica (dallo stato **4** allo stato **1**).

Il coefficiente economico, definito come:

$$\varepsilon = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4)$$

per la macchina di Carnot diventa, sfruttando la (3):

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (5)$$

Le macchine reali in genere hanno coefficienti economici molto minori di  $\varepsilon_c$ .

Non può esistere, in nessun caso, una macchina con coefficiente economico maggiore di quello di Carnot.

Si supponga infatti di avere una macchina con  $\epsilon > \epsilon_c$  che preleva da un serbatoio caldo a temperatura  $T_1$  una quantità di calore  $Q_1$  e ceda a un serbatoio freddo a temperatura  $T_2$  una quantità di calore  $Q_2$ , compiendo un lavoro  $L$ .

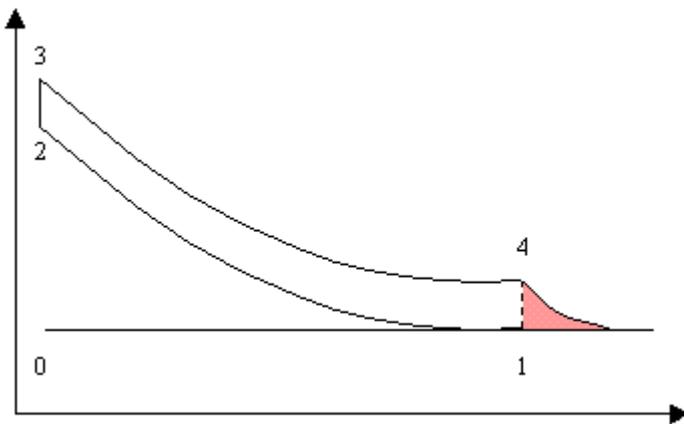
Essendo  $\epsilon > \epsilon_c$ , sarà  $L > \epsilon_c Q_1$ .

Il lavoro  $L$  può quindi essere scomposto in due componenti:

$$L = L_0 + \epsilon_c Q_1 \quad (6)$$

La componente  $\epsilon_c Q_1$  può poi essere utilizzata in una seconda macchina per riportare nel serbatoio caldo la quantità di calore  $Q_1$  precedentemente prelevata: si otterrebbe una macchina in grado di produrre il lavoro  $L_0$  prelevando calore da un solo serbatoio (in contrasto con il secondo principio della termodinamica).

## Ciclo Otto



Il ciclo Otto è il ciclo che approssima adeguatamente le trasformazioni cicliche del gas racchiuso nel cilindro di un motore a combustione interna. Qui a lato è visibile un diagramma P X V di questo ciclo. Il gas comburente viene aspirato nel cilindro nello stato fisico 1 (da valvole a fungo comandate originariamente da organi meccanici, ora elettronici, in funzione dell'angolo di rotazione del motore) e rimane chiuso tra un pistone mobile e le pareti del cilindro fino allo stato fisico 4 (scarico gas esausti); quindi il gas è un

sistema chiuso nelle trasformazioni dalla 1 alla 4. In dettaglio:

- ◆  $0 \rightarrow 1$  Valvola aspirazione aperta;
- ◆ 1: valvola aspirazione chiusa; trasformazione adiabatca;
- ◆  $1 \rightarrow 2$  valvole aspirazione e scarico chiuse, fase di compressione;
- ◆  $2 \rightarrow 3$  trasformazione isocora (temperatura dei gas:  $1500 \div 1800$  K);
- ◆  $3 \rightarrow 4$  trasformazione adiabatca; fase di espansione;
- ◆  $4 \rightarrow 1$  valvola scarico aperta. Vengono espulsi i gas di scarico (avviene uno spreco di gas caldi ed in pressione). Questa trasformazione è apparentemente isocora; in realtà è una adiabatca irreversibile ( $\Delta S > 0$ );
- ◆  $1 \rightarrow 0$  valvola di scarico aperta ed aspirazione chiusa, trasformazione isobara, ulteriore fuoriuscita dei gas di scarico;

Esistono due versioni del motore a ciclo Otto: a due o a quattro tempi.

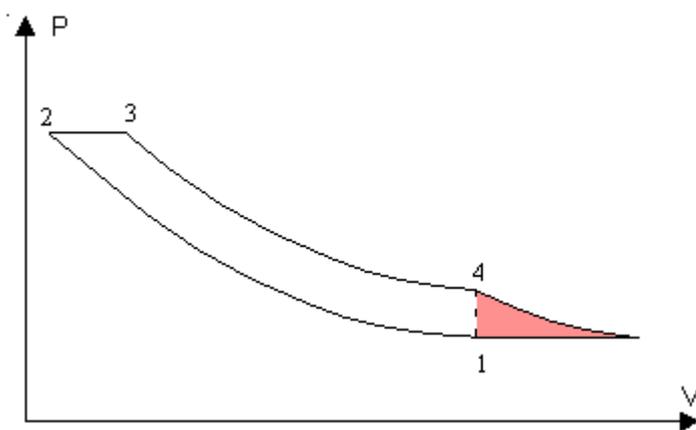
Nel motore a quattro tempi il rinnovo della carica avviene inserendo tra le operazioni di compressione ed espansione due ulteriori corse dello stantuffo, una per fare uscire i gas di scarico (dal punto morto inferiore al punto morto superiore, trasformazione  $1 \rightarrow 0$ ), una seconda per aspirare aria nel cilindro (dal punto morto superiore al punto morto inferiore, trasformazione  $0 \rightarrow 1$ ); così ogni due giri dell'albero il ciclo termodinamico viene percorso una volta.

Nel motore a due tempi le fasi di aspirazione e scarico sono contemporanee; queste avvengono rispettivamente attraverso le luci di lavaggio e di scarico, al termine dell'espansione e all'inizio

della compressione. Le luci si trovano in prossimità del punto morto inferiore; i motori moderni a due tempi hanno il “lavaggio incrociato”, ovvero sulla sezione trasversale del pistone le luci sono posizionate a  $120^\circ$  l’una rispetto all’altra, con una terza luce in basso per lavare la zona più bassa del cilindro. Invece fino a qualche decennio fa si costruivano motori a due tempi “a luci contrapposte”, ovvero con due luci distanziate l’una rispetto all’altra di  $180^\circ$ , sempre rispetto alla sezione trasversale del cilindro. Nel motore a due tempi a parità di giri la potenza erogata è quasi doppia. Sezionando il cilindro lungo la sua lunghezza si osserva che la luce di scarico è posizionata più avanti della luce di ingresso in modo che possano essere espulsi i gas di scarico prima che venga aspirato nuovo carburante; ne consegue che la luce di scarico si apre prima e si chiude dopo di quella di uscita, quindi durante il ritorno del pistone parte del carburante aspirato viene espulso. Questo aspetto rende i motori a due tempi molto inquinanti, soprattutto con l’utilizzo di benzina senza piombo ad elevato contenuto di benzene, componente che non viene nemmeno interessato da un eventuale processo di catalizzazione sullo scarico. Le recenti normative europee (Euro1 ÷Euro4) non permettono più la costruzione di motori a due tempi senza controllo dell’iniezione e dello scarico (motor a carburatore); sono ammessi soltanto motori a iniezione, ovvero motori in cui esiste un controllo elettronico su aspirazione ed espulsione. Nonostante ciò anche il motore a due tempi ad iniezione è molto inquinante.

Per quanto riguarda i motori a quattro tempi, modificando leggermente il ciclo termodinamico, l’energia dissipata dai gas di scarico, che rappresenta circa  $\frac{1}{3}$  dell’energia fornita dalla combustione, può essere utilizzata per ottenere lavoro utile da una turbina che fornisce direttamente energia ad un compressore, il quale comprime l’aria di alimentazione per aumentarne la massa entrante nel cilindro, diventando così utilizzabile anche l’area rossa del diagramma. In questo modo viene recuperata l’energia dei gas di scarico, che come è stato detto in precedenza, è calda ed in pressione. In pratica però i motori a benzina a turbocompressore si stanno via via abbandonando, preferendo la soluzione del compressore volumetrico, poiché viene ridotta la temperatura dei gas di scarico sotto al livello minimo entro cui funziona il catalizzatore; ne consegue che, oltre alle emissioni non abbattibili (come il benzene) si hanno emissioni normalmente eliminabili da un catalizzatore funzionante a temperatura adeguata. Invece il compressore a turbina è molto usato nei motori a ciclo Diesel.

## Ciclo Diesel



Il ciclo Diesel approssima soddisfacentemente le trasformazioni cicliche che avvengono nei motori a combustione interna “ad accensione spontanea”. Commercialmente la stragrande maggioranza dei motori Diesel è a quattro tempi; la versione a due tempi è usata solo per grandi applicazioni (ad es. motori delle navi). Nei motori che sfruttano questo ciclo la combustione avviene senza ricorrere alla scintilla come nei motori che seguono il ciclo Otto. Lo schema funzionale è del tutto simile a

quello del ciclo Otto. L’accensione avviene a seguito della compressione di miscela di aria e combustibile, questa compressione ha un rapporto variabile tra 1:14 e 1:24. La combustione avviene a pressione costante durante la trasformazione  $2 \rightarrow 3$ . A seguito si ha una espansione isoentropica; lo scarico dei gas di combustione avviene nella  $4 \rightarrow 1$ . I gas di scarico sono in 4 a temperatura molto elevata e questo fa sì che l’area recuperabile (area in rosso) con un turbocompressore sia molto più elevata di quella del ciclo Otto. I moderni motori diesel sono molto meno inquinanti dei

benzina, poiché la combustione è buona e i prodotti di scarico non contengono benzene né monossido di carbonio, seppur siano presenti zolfo e particolato fine (pm10). Inoltre la quasi totalità dei motori Diesel moderni monta il turbocompressore, accrescendo così il rendimento di circa il 20-25 % rispetto ad un motore basato sul ciclo Otto.