

CICLI TERMODINAMICI

• CICLO OTTO

Iniziamo ora lo studio di cicli di interesse più pratico. Sul ciclo Otto si basa il funzionamento dei motori ad **accensione comandata**. Teoricamente si tratta di un ciclo ma in realtà l'aria, in un sistema cilindro pistone, non è sempre la stessa, ma viene continuamente espulsa ed aspirata dall'ambiente esterno. Si ipotizza però che il ciclo si chiuda all'esterno, pensando che l'aria che entra sia sempre nello stesso stato termodinamico.

Nello stato in cui il pistone si trova in posizione tale che il volume nel cilindro è massimo si dice che si trova nel **punto morto inferiore**; nel caso in cui esso si trova nella posizione che minimizza il volume nel cilindro allora si dice che il pistone si trova nel **punto morto superiore**. Questi due punti sono caratterizzati dal fatto che, in corrispondenza di essi, il pistone ha velocità nulla (inversione del moto alternativo).

Una ipotesi molto forte nello studio del ciclo Otto è considerare sempre lo stesso gas dall'inizio alla fine del ciclo; in realtà, alla fine della fase di **compressione**, viene iniettata all'interno del cilindro una miscela di aria e benzina che viene fatta esplodere per dare il via alla fase di combustione seguita dall'espansione. La combustione è assicurata dall'accensione della miscela tramite la scintilla prodotta da una candela (accensione comandata), e in questa fase (combustione) il gas non è certo un gas piuccheperfetto! Ci accontenteremo tuttavia di simulare il suo comportamento con il modello di gas piuccheperfetto conoscendo comunque i limiti di questa trattazione.

Durante l'**espansione** il cilindro passa dal punto morto superiore al punto morto inferiore, tale fase è detta **fase utile**, poiché il sistema compie lavoro, permettendo cioè l'utilizzo di questo lavoro attraverso il moto rotatorio di un albero motore. Dopo l'espansione si ha lo **scarico** dei gas combusti, che si realizza a seguito dell'apertura di opportune valvole situate sulla testa del cilindro. Il cilindro passa così nuovamente dal punto morto inferiore al punto morto superiore. Il ciclo si chiude quindi con una cessione di calore dal sistema all'ambiente, si riparte così dal punto iniziale, in cui lo stato del gas è quello coincidente con l'ambiente esterno.

Studiamo il ciclo sui piani $p-v$ e $T-s$.

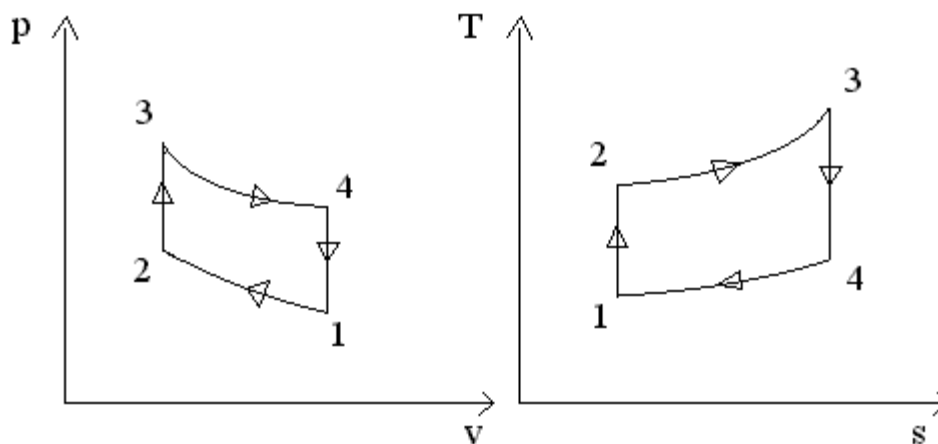


Figura 16

Il ciclo termodinamico è percorso in senso orario; partiamo dalla condizione in cui il pistone si trova al punto morto inferiore (PMI), e il gas si trova nello stato 1.

La prima fase ($1 \rightarrow 2$) è una **compressione adiabatica e reversibile** (quindi isoentropica); da un punto di vista pratico ciò si può realizzare se gli attriti sono ridotti al minimo e la compressione è

così veloce tanto da non dare il tempo al sistema di scambiare calore con l'ambiente. Si comprime così il gas fino a che il pistone arriva al punto morto superiore (PMS). Sul piano Ts si nota che la temperatura aumenta ($Tv^{\gamma-1} = cost$).

La seconda fase ($2 \rightarrow 3$) del ciclo è costituita dall'**adduzione di calore**; questa trasformazione può essere bene approssimata da una **isocora**, facendo cioè l'ipotesi che la combustione avvenga con un processo a volume costante. In questa fase il sistema assorbe energia nel modo calore. Sul piano Ts avremo una curva a pendenza positiva, infatti, per la stabilità dell'equilibrio termodinamico

$$\left. \frac{\partial T}{\partial s} \right|_v > 0$$

La terza fase ($3 \rightarrow 4$) è una **espansione isoentropica**. In questa fase il pistone si riporta al PMI e non c'è scambio di calore.

La quarta e ultima fase ($4 \rightarrow 1$), del tutto ideale, è una fase in cui il sistema cede calore a volume costante. E' rappresentata quindi come un'**isocora**. In questa ultima trasformazione la pressione e la temperatura diminuiscono, quest'ultima perché si sta cedendo calore all'ambiente.

Espressione del Rendimento

Per definizione, il rendimento è considerato come il rapporto

$$\eta = \frac{L}{Q_{in}} \quad \text{dove } Q_{in} \text{ è la quantità di calore addotta durante la combustione.}$$

Per il primo principio, su tutto il ciclo risulta $\Delta U = 0$, quindi

$$\eta = \frac{L}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Questa relazione, in generale, vale per qualsiasi macchina termica che funziona secondo un ciclo reversibile. Cerchiamo, analogamente a quanto fatto per il ciclo di Carnot, una espressione di η in funzione della temperatura.

Poiché il calore viene scambiato in processi a volume costante, si ha $L = 0 \Rightarrow \Delta U = Q$.

Ricordando la definizione di calore specifico a volume costante

$$c_v = \frac{Q}{m\Delta T} \Rightarrow \begin{cases} Q_{2-3} = Q_{in} = mc_v(T_3 - T_2) \\ Q_{4-1} = Q_{out} = mc_v(T_1 - T_4) \end{cases}$$

con $Q = Q_{in} - Q_{out}$. Si ha

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Possiamo ora applicare, per le trasformazioni isoentropiche, $Tv^{\gamma-1} = cost$

$$(1 \rightarrow 2) \Rightarrow T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$$

$$(3 \rightarrow 4) \Rightarrow T_3 v_3^{\gamma-1} = T_4 v_4^{\gamma-1}$$

Poiché $v_1 = v_4$ e $v_2 = v_3$, facendo il rapporto membro a membro si ottiene

$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

Un'altra espressione può essere data in funzione del **rapporto di compressione** $r = \frac{v_1}{v_2}$, definito come il rapporto dei volumi nel cilindro rispettivamente quando il pistone è nel PMI e nel PMS.

$$\eta = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}}$$

• CICLO DIESEL

Il ciclo Diesel è una variante del ciclo Otto, la differenza sta nel fatto che la fase di adduzione di calore avviene a pressione costante piuttosto che a volume costante.

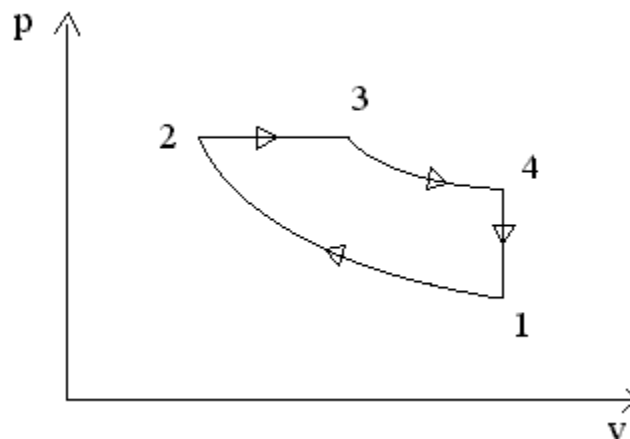


Figura 17

La prima fase ($1 \rightarrow 2$) è una **compressione adiabatica e reversibile** (quindi isoentropica) da v_1 a v_2 , ossia dal PMI al PMS.

La seconda fase ($2 \rightarrow 3$), in cui si ha adduzione di calore dovuta alla combustione è un'**espansione isobara**. In questa fase, come già detto, il sistema assorbe energia sotto forma calore. A differenza dei motori ad accensione comandata, in cui la miscela aria combustibile viene accesa con una scintilla, nei motori diesel il gasolio viene iniettato nella camera di combustione, dopo la fase di compressione, per mezzo di iniettori atomizzanti. L'elevata turbolenza, insieme con l'alta pressione (agli elevati rapporti di compressione), permette al gasolio di "autoaccendersi". Si suppone che questo processo avvenga a pressione costante.

La terza fase ($3 \rightarrow 4$) è un' **espansione isoentropica**. Il pistone passa dal PMS al PMI. In questa fase il sistema compie lavoro utile.

Durante la quarta fase ($4 \rightarrow 1$) si chiude idealmente il ciclo. E' questa una **isocora**.

Espressione del Rendimento

Per definizione

$$\eta = \frac{L}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

durante la fase di chiusura del ciclo, che avviene a volume costante, si può considerare la definizione di calore specifico. Analogamente a quanto già fatto, introducendo la nuova grandezza

$$r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

si ottiene

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)}$$

Si nota che, rispetto al rendimento del ciclo Otto, si ha un fattore moltiplicativo dovuto al fatto che, durante la fase di adduzione del calore, il volume non rimane costante.

Tipicamente, per un motore a ciclo Otto

$$r \approx 10; \quad \eta_{Otto} \approx 0.6.$$

A parità di rapporto di compressione, con $r_c \approx 2$, il rendimento del motore a ciclo Diesel è più basso. Poiché però, per motori di questo tipo, si usano in genere rapporti di compressione ben più elevati ($r \approx 20$), si ha

$$\eta_{Diesel} \approx 0.65 > \eta_{Otto}$$

E' da osservare il fatto che si sta parlando di rendimenti termodinamici e non di rendimenti complessivi, il rendimento globale lo si ottiene dal prodotto dei singoli rendimenti.

• CICLO BRAYTON

Il ciclo Brayton è quello su cui si basano le turbine a gas, i motori oggi più diffusi in campo aeronautico. Discutiamo il ciclo teorico, seguendo le varie trasformazioni sul piano pv e sul piano Ts.

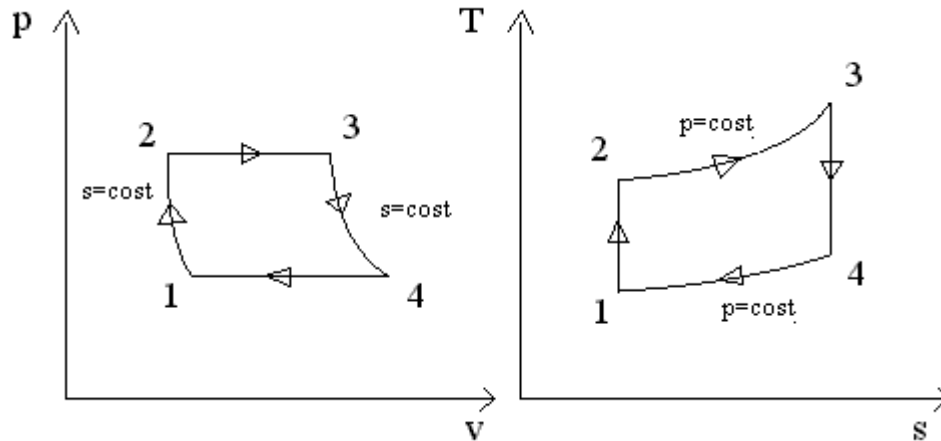


Figura 18

La prima fase ($1 \rightarrow 2$) è una **compressione adiabatica e reversibile** (quindi isoentropica). Aumentano temperatura e pressione ($Tv^{\gamma-1} = \text{cost}$; $pv^{\gamma} = \text{cost}$).

La seconda fase ($2 \rightarrow 3$), in cui si ha adduzione di calore dovuta alla combustione è un'**espansione isobara**. Il sistema assorbe calore.

La terza fase ($3 \rightarrow 4$) è un'**espansione adiabatica** (isoentropica), durante questa trasformazione non c'è scambio di calore, la temperatura diminuisce fino al valore che ci serve per chiudere il ciclo con un'**isobara** ($4 \rightarrow 1$).

Il lavoro (positivo perché compiuto dal sistema) è come sempre proprio l'area racchiusa dal ciclo.

Espressione del Rendimento

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Nelle trasformazioni isobare, uniche trasformazioni del ciclo in cui si ha scambio di calore, si ha

$$Q_{in} = mc_p(T_3 - T_2); \quad Q_{out} = mc_p(T_4 - T_1)$$

da cui segue

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) T_2}$$

Per le relazioni dell'isoentropica

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}; \quad \frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}};$$

ma $p_2 = p_3$ e $p_1 = p_4$, quindi

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

Applicazione del ciclo Brayton: il TURBOREATTORE

A differenza dei motori visti finora, il turboreattore è un motore il cui movimento delle masse in gioco è puramente rotante, ossia non ci sono masse in moto alternativo. Ciò rappresenta un importante vantaggio, sia dal punto di vista dei carichi al quale sono soggetti il motore e la struttura di supporto, che dal punto di vista della regolarità di funzionamento.

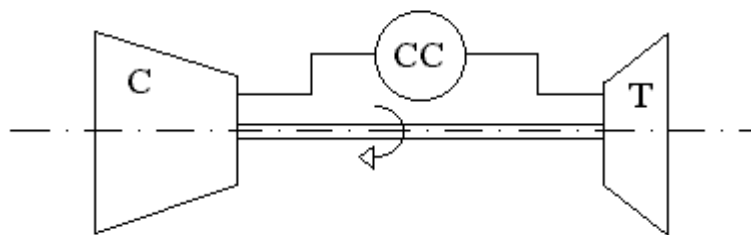


Figura 19

La compressione viene effettuata all'ingresso del motore dapprima mediante la presa d'aria (compressione statica) poi per mezzo di un compressore di tipo centrifugo o assiale (assiale nei turboreattori ad alte prestazioni per realizzare alti rapporti di compressione). L'aria viene quindi compressa e all'uscita si trova nello stato 2. A questo punto l'aria entra nella camera di combustione in cui, secondo un processo ipotizzato a pressione costante, viene bruciata la miscela aria-combustibile con uno scambio di calore positivo Q_{in} . Al solito, questa è in realtà una fase di adduzione di calore. All'uscita dalla camera di combustione l'aria è nello stato 3. Inizia così la fase utile, in cui il sistema (fluido) compie lavoro sulla turbina. Nell'attraversamento del compressore e della turbina, vale la relazione dell'energia per sistemi aperti (in regime stazionario)

$$\dot{m}\Delta H = \dot{Q} - \dot{L} = -\dot{L}$$

dove si è anche ipotizzato che lo scambio di calore è trascurabile. Si vede subito che se forniamo lavoro al fluido ($\dot{L} < 0$) H aumenta, è questo il caso del compressore; se invece sottraiamo lavoro al sistema ($\dot{L} > 0$), allora H diminuisce, ciò succede al passaggio nella turbina. All'uscita della turbina il sistema è nello stato 4.

In realtà a valle della turbina il flusso verrà accelerato per mezzo di un **ugello** per ottenere una spinta. Infatti, come si è visto in precedenza, una espressione semplificata della spinta è

$$S = \dot{m}(V_u - V_i)$$

la spinta è cioè data dalla variazione (per unità di tempo) della quantità di moto tra l'ingresso e l'uscita dal motore. L'energia somministrata al fluido nella camera di combustione serve in parte, tramite il lavoro ceduto alla turbina, per muovere il compressore al quale essa è collegata e in parte

(circa il 20% o anche meno) per ottenere una elevata velocità di uscita, dalla quale dipende la spinta del motopropulsore.

Per migliorare la compressione e permettere una buona combustione sono necessarie basse velocità e alte pressioni, così, a monte del compressore, si pone una **presa d'aria**. La presa d'aria è una macchina a fluido in cui si cerca, in modo adiabatico e isoentropico di aumentare la pressione statica del fluido, a spese dell'energia cinetica. La compressione all'interno della presa d'aria, poiché non c'è lavoro di elica, avverrà a entalpia totale costante.

Nel cosiddetto **turboreattore semplice**, l'unico organo propulsivo (propeller) è costituito dall'ugello. Quest'ultimo è un convergente quando si desiderano velocità di uscita al massimo soniche ed è un convergente – divergente se si desidera un'uscita supersonica.

Oltre all'ugello, come sistema propulsivo si può usare un'elica collegata all'albero della turbina e del compressore. Si parla in questo caso di **turboelica**. Poiché l'elica gira molto più lentamente di turbina e compressore, si prevede una scatola di riduzione. Nella turboelica la spinta è generata sempre secondo lo stesso principio, ma “accelerando di meno una grande quantità d'aria”, ossia diminuisce la differenza di velocità e aumenta la portata d'aria che viene accelerata.

L'esigenza di velocità più elevate porta alla nascita di turboelica con eliche intubate (fan), o meglio **turboreattori a doppio flusso**. In questo caso l'aria che attraversa il motore si separa in due flussi: uno che, attraversa un ugello nel quale viene accelerato (flusso freddo) e uno, più interno, che passa attraverso il fan, il compressore e che brucia nella camera di combustione (flusso caldo). Il flusso più interno viene poi accelerato a sua volta da un ugello più interno a valle della turbina. La spinta sarà somma di due contributi, quello dovuto all'accelerazione del flusso caldo e quello dovuto all'accelerazione del flusso freddo.

Oggi vengono utilizzati maggiormente motori turboelica (turboprop) e turboreattori a doppio flusso (turbofan). Mentre i primi hanno rendimento maggiore alle basse velocità, i secondi possono volare a velocità ben maggiori, con rendimenti più alti.