

Motori alternativi a combustione interna

Anselmo Recanati

30 Gennaio 2008

Il lavoro è materialmente eseguito da un fluido che agisce con le sue pressioni su uno stantuffo.

La combustione interna avviene all'interno del cilindro motore. In generale si impiegano combustibili liquidi perchè è praticamente impossibile usare combustibili solidi.

Esistono due modalità principali di formazione della miscela aria-combustibile e su queste si basa la distinzione tra due tipologie fondamentali di motore a combustione interna:

- Motori ad accensione comandata
- Motori ad accensione spontanea

Nei motori ad accensione comandata la miscela è formata mescolando aria e combustibile al di fuori del cilindro (nel carburatore). L'accensione della miscela è comandata, in genere, per mezzo di una scintilla elettrica. Si attua con combustibili gassosi e facilmente vaporizzabili (benzina). Sono i motori a benzina o a scoppio (ciclo Otto).

Vedi figura 1.

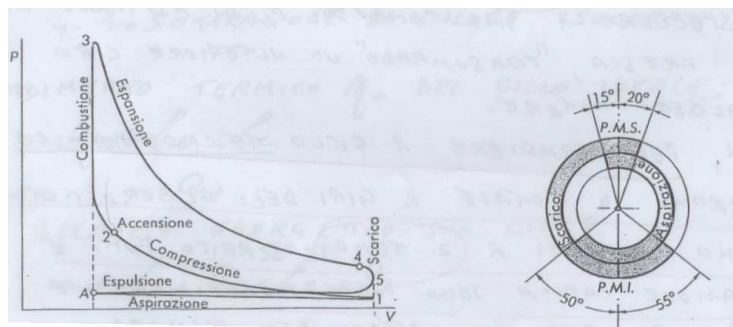


Figura 1: Ciclo OTTO

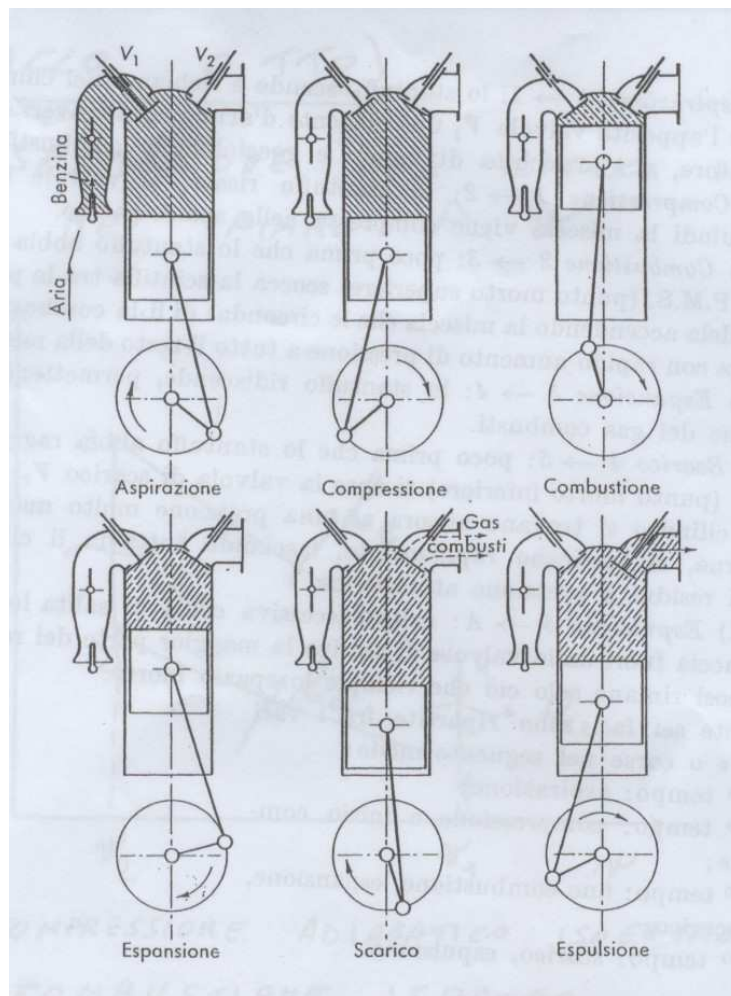


Figura 2: Fasi del ciclo OTTO

Nei motori ad accensione spontanea il combustibile viene iniettato all'interno del cilindro al termine della fase di compressione (di sola aria, quindi) e si autoaccende per effetto della elevata pressione in camera. Sono i motori Diesel (ciclo Diesel).

Come si può vedere dalla figura 2 il ciclo termodinamico è caratterizzato da sei fasi:

- I. *Aspirazione* $A \rightarrow 1$: lo stantuffo scende e richiama nel cilindro attraverso l'apposita valvola V_1 una corrente d'aria che, attraversando il carburatore, si è arricchita di vapori e goccioline di combustibile.

- II. *Compressione* $1 \rightarrow 2$: lo stantuffo risale; le valvole sono chiuse, quindi la miscela viene compressa nello spazio morto.
- III. *Combustione* $2 \rightarrow 3$: poco prima che lo stantuffo abbia raggiunto il P.M.S. (punto morto superiore) scocca la scintilla tra le punte della candela accendendo la miscela che le circonda: di lì la combustione si propaga con rapido aumento di pressione a tutto il resto della miscela.
- IV. *Espansione* $3 \rightarrow 4$: lo stantuffo ridiscende, permettendo l'espansione dei gas combusti.
- V. *Scarico* $4 \rightarrow 5$: poco prima che lo stantuffo abbia raggiunto il P.M.I. (punto morto inferiore) si apre la valvola di scarico V_2 : i gas che nel cilindro si trovano ancora ad una pressione molto maggiore dell'esterna, si scaricano rapidamente, lasciando tuttavia il cilindro pieno di residui a pressione atmosferica.
- VI. *Espulsione* $5 \rightarrow A$: nella successiva corsa di salita lo stantuffo scaccia fuori dalla valvola di scarico la maggior parte dei residui, di cui così rimane solo ciò che riempie lo spazio morto.

Queste sei fasi sono ripartite fra i vari tempi o corse nel seguente modo:

- 1° tempo** : aspirazione;
- 2° tempo** : compressione e inizio combustione;
- 3° tempo** : fine combustione, espansione, inizio scarico;
- 4° tempo** : scarico, espulsione.

1 Motore a due e a quattro tempi

Nel motore a quattro tempi il pistone ha il compito di espellere i gas combusti e di aspirare la carica fresca. In questo modo però consuma un ulteriore giro dell'albero motore, quindi, per compiere un ciclo termodinamico, occorrono in totale due giri dell'albero motore.

Nel motore a due tempi le fasi di scarico dei fumi e di aspirazione della carica sono contemporanee (tramite pompa) e si opera il lavaggio del cilindro. In questo caso si ha perdita di carburante verso lo scarico con

aumento delle emissioni inquinanti. In genere sono usati per motori di piccola potenza.

2 Calcolo del ciclo Otto

2.1 Rappresentazione del ciclo Otto nel caso ideale

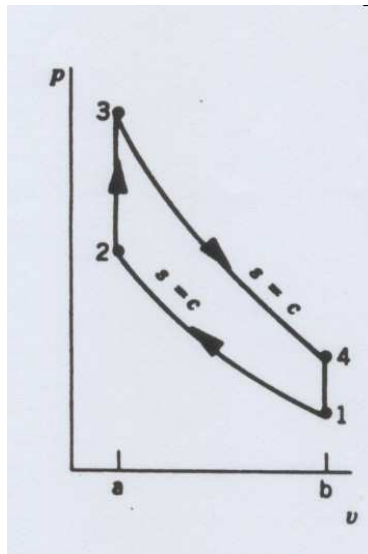


Figura 3: Ciclo OTTO

Come si vede dalla figura sopra il ciclo ideale è caratterizzato da quattro fasi:

- 1 \rightarrow 2 = compressione adiabatica isoentropica. A questa fase è associato il lavoro di compressione L_c ;
- 2 \rightarrow 3 = combustione isocora. A questa invece è associata l'energia entrante Q_1 ;
- 3 \rightarrow 4 = espansione adiabatica isoentropica. Da questa si ha il lavoro di espansione L_e ;
- 4 \rightarrow 1 = sottrazione di energia lungo un'isocora. L'energia sottratta è Q_2 .

Il rendimento termico η_t del ciclo ideale è:

$$\eta_t = \frac{L_e - L_c}{Q_1} \quad (1)$$

Il bilancio energetico sul ciclo è:

$$L_c + Q_1 = L_e + Q_2 \quad (2)$$

Quindi l'equazione (1) diventa:

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

ossia:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \frac{T_4}{T_1} - 1}{T_2 \frac{T_3}{T_2} - 1}$$

e ricordando che lungo l'adiabatica isoentropica si ha: $Tv^{\gamma-1} = \text{cost}$ (con $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$) si ottiene:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (3)$$

dove $r = \frac{v_1}{v_2}$.

Il calore Q_1 introdotto durante il ciclo può essere calcolato dall'espressione:

$$Q_1 = \frac{H_i}{1 + \alpha} \quad (4)$$

dove:

- H_i è il potere calorifico inferiore del combustibile;
- α è il rapporto $\frac{A}{F}$ della miscela che alimenta il motore.

2.2 Potenza sviluppata dal motore ideale

La potenza sviluppata dal motore ideale è il prodotto del lavoro ottenuto in ciascun ciclo per la frequenza dei cicli, che è proporzionale al numero di giri n che la manovella compie nell'unità di tempo. Nel caso di motori a quattro tempi un ciclo completo viene svolto ogni due giri dell'albero motore, per cui:

$$P_{id} = L_{id} \frac{n}{2 \cdot 60} \quad [W] \quad n = \text{numero di giri al minuto}$$

dove:

$$L_{id} = \eta_t Q_1 \rho_1 V \quad (5)$$

V = cilindrata del motore [m^3];

ρ_1 = densità del fluido di lavoro nel punto 1 [$\frac{Kg}{m^3}$];

$\rho_1 V$ = massa di fluido trattata in ogni ciclo [kg].

Ricordando che $Q_1 = \frac{H_i}{1 + \alpha}$, si ottiene:

$$P_{id} = \eta_t \frac{H_i}{1 + \alpha} \rho_1 V \frac{n}{2 \cdot 60} \quad (6)$$

Spesso, la potenza sviluppata dal motore si esprime in funzione della cosiddetta *pressione media indicata* (p_{mi}), pari al quoziente tra l'area del ciclo (pari al lavoro raccolto dallo stantuffo) e la massima variazione dell'ascissa (pari alla cilindrata del motore se in ascissa sono riportati i volumi istantanei del cilindro). Si ha che p_{mi} rappresenta il lavoro per unità di cilindrata e per ciclo, ossia:

$$p_{mi} = \eta_t \rho_1 \frac{H_i}{1 + \alpha} \quad (7)$$

e quindi:

$$P_{id} = p_{mi} V \frac{n}{2 \cdot 60} \quad (8)$$

2.3 Calcolo del ciclo reale

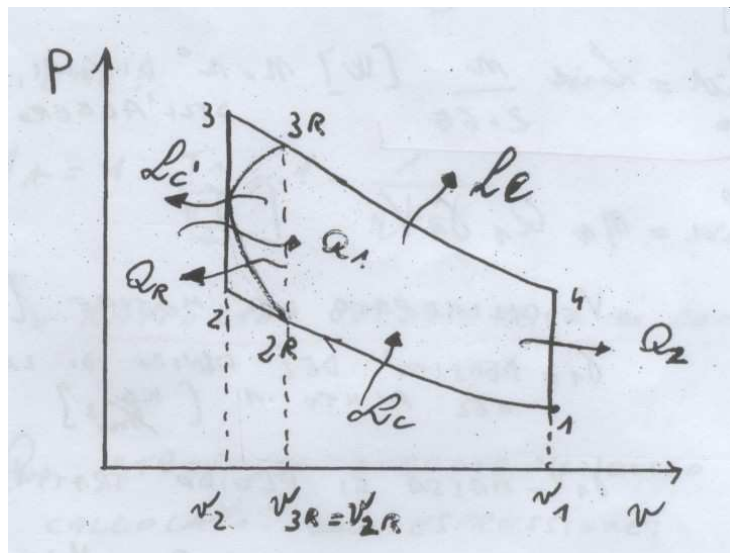


Figura 4: Fasi del ciclo OTTO reale

Nel caso di ciclo reale la combustione non avviene istantaneamente e per dare tempo alla carica di bruciare con regolarità è necessario far scoccare la scintilla prima del P.M.S.. Si ha un anticipo di accensione caratterizzato dal fatto che la combustione non inizia in 2, come nel caso ideale, ma in $2R$. La frazione di corsa corrispondente all'anticipo è:

$$x = \frac{v_{2R} - v_2}{v_1 - v_2} \quad (9)$$

Dall'equazione (9) si ricava v_{2R} . T_{2R} e P_{2R} si ricavano dalle relazioni dell'adiabatica isoentropica tra 1 \rightarrow $2R$:

$$T_{2R} = T_1 \left(\frac{v_1}{v_{2R}} \right)^{\gamma-1}$$

$$P_{2R} = P_1 \left(\frac{T_{2R}}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Per il calcolo di T_{3R} si deve scrivere il I° principio della termodinamica tra $2R$ e $3R$

$$\Delta u = Q - L_{c'} = u_{3R} - u_{2R} = c_v(T_{3R} - T_{2R}) \quad (10)$$

in cui: $Q = Q_1 - Q_R$.

Q = energia Q_1 introdotta durante la reazione del combustibile meno energia Q_R sottratta durante la medesima;

$Q_1 = \frac{H_i}{1+\alpha}$ perchè $\eta_b = 1$;

$Q_R = 0,3 \frac{H_i}{1+\alpha}$ (si stima che venga asportata il 30% dell'energia sviluppata dalla reazione di combustione);

$L_{c'}$ = lavoro meccanico compiuto durante la reazione di combustione;

$$L_{c'} = \int_{2R}^{3R} p dV = \frac{2}{3}(v_{2R} - v_2)(P_{3R} - P_{2R})$$

essendo

$$P_{3R} = \frac{RT_{3R}}{v_{2R}}$$

Sostituendo nella (10) si ha:

$$c_v(T_{3R} - T_{2R}) = \frac{H_i}{1+\alpha} - 0,3 \frac{H_i}{1+\alpha} - \frac{2}{3}(v_{2R} - v_2) \left(\frac{RT_{3R}}{v_{2R}} - P_{2R} \right)$$

da cui si ricava T_{3R} .

Per calcolare T_4 si usa la relazione dell'adiabatica isoentropica $3R \rightarrow 4$:

$$T_4 = \frac{T_{3R}}{\left(\frac{v_1}{v_{2R}}\right)^{\gamma-1}} \quad (11)$$

L'energia sottratta Q_2 tra $4 \rightarrow 1$ è:

$$Q_2 = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \quad (12)$$

Il lavoro reale fornito dal ciclo è:

$$L_R = L_e - L_c + L_{c'} = Q_1 - Q_R - Q_2 \quad (13)$$

e il rendimento η_R è:

$$\eta_R = \frac{L_R}{L_{id}} \quad (14)$$

2.4 Potenza sviluppata dal motore reale

L'espressione della potenza reale è:

$$P_R = \eta_t \eta_R \eta_o \lambda_v \rho_a V \frac{H_i}{1 + \alpha} \frac{n}{2 \cdot 60} \quad (15)$$

ossia:

$$P_R = \eta_R \eta_o P_{id} \quad (16)$$

in cui

- $\eta_t \eta_R \frac{H_i}{1 + \alpha}$ è il lavoro reale (L_R) per unità di massa;
- $\lambda_v \rho_a V$ è la massa di fluido realmente trattata nel ciclo.

Come si può notare nell'equazione della potenza reale compaiono nuovi termini.

- η_o è il rendimento organico (<1). Quest'ultimo è legato alla presenza di attriti dovuti alla trasmissione del moto all'albero e al lavoro necessario per comandare gli accessori.

- $\lambda_v = \frac{\rho_1}{\rho_a}$ è il rendimento volumetrico.
 - ρ_1 : densità della carica nel punto di inizio della compressione;
 - ρ_a : densità della carica nelle condizioni dell'ambiente esterno;

Questo rendimento, tiene conto del preriscaldamento della carica e delle perdite nel condotto di ammissione. A causa del preriscaldamento si ha un aumento di temperatura cioè $T_1 > T_a$ mentre a causa delle perdite di carico si ha diminuzione della pressione cioè $P_1 < P_a$. Ciò significa che $\lambda_v < 1$ e quindi si ha un decremento della massa di fluido trattata in ogni ciclo, rispetto al paritetico ciclo ideale.

Anche nel caso reale si definisce la p_{mi} :

$$p_{mi} = \eta_t \eta_R \lambda_v \rho_a \frac{H_i}{1 + \alpha} \quad (17)$$

Si introduce poi la pressione media effettiva p_{me} :

$$p_{me} = \eta_o p_{mi} \quad (18)$$

La potenza reale si può quindi scrivere come:

$$P_R = p_{me} V \frac{n}{2 \cdot 60} \quad (19)$$

3 Comportamento del motore alternativo in quota

Si consideri il funzionamento del motore alla quota z .

Al variare della quota le condizioni fisiche dell'aria variano notevolmente, in quanto variano temperatura e pressione. All'umentare della quota la densità dell'aria diminuisce.

Le variazioni di temperatura e pressione nella troposfera ($z \simeq 11000m$) sono date dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} T = 288 - \frac{z}{0.1538} \\ P = 10330 \left(1 - \frac{z}{44.3}\right)^{5.25} \end{cases}$$

dove z è in $[km]$.

La formula empirica per calcolare la variazione di potenza in funzione della quota è:

$$\frac{P_z}{P_0} = \frac{p_z T_0 + 256}{p_0 T_z + 256}$$

Si usano formule empiriche perchè la variazione di potenza in funzione della quota è alquanto complessa: non dipende solo dal rapporto δ delle densità $\left(\delta = \frac{\rho_z}{\rho_0}\right)$, in quanto occorre tenere conto che al crescere della quota diminuisce λ_v (maggior riscaldamento della carica fresca) e varia anche η_o .

3.1 Ristabilimento del motore in quota

Il ristabilimento del motore in quota viene eseguito mediante un compressore centrifugo comandato meccanicamente. Il compressore è posto a valle del carburatore per sfruttare, durante la compressione, l'effetto di refrigerazione connesso alla vaporizzazione del combustibile. Il compito del compressore è quello di riportare la pressione della carica alimentata ai cilindri del motore da P_z a P_0 dove P_0 è la pressione a quota zero cioè 1 bar.

La pressione di aspirazione P_0 è maggiore della pressione di scarico ($\simeq P_z$) quindi, il ciclo di pompaggio compie un lavoro che va ad aggiungersi al lavoro utile compiuto dal ciclo base che si può ritenere pari a L_R calcolato in precedenza. Inoltre, si ottiene un incremento della cilindrata poichè i gas di scarico al P.M.S., a contatto con la carica fresca, vengono ulteriormente compressi e questo comporta un incremento del volume a disposizione della carica fresca entrante. Il lavoro di pompaggio L_p può essere calcolato come:

$$L_P = V (P_0 - P_z) = (V_1 - V_2)(P_0 - P_z) \quad (20)$$

La potenza effettivamente fornita dal motore è:

$$P' = \left[L_R \rho_1 \frac{Vn}{2 \cdot 60} + (P_0 - P_z) \frac{Vn}{2 \cdot 60} \right] \eta_0 \quad (21)$$

Questa è la potenza al netto della potenza spesa per comprimere la carica fresca. Il lavoro del compressore L_C può essere calcolato come:

$$L_C = c_p(T_0 - T_z) \quad (22)$$

Per poter calcolare la potenza di compressione P_C , devo calcolare la portata di fluido \dot{m} elaborata dal compressore:

$$\dot{m} = \frac{\rho_0 V n}{2 \cdot 60} \quad (23)$$

e infine

$$P_C = \dot{m} L_C$$

La potenza netta resa dal motore sarà:

$$P = P' - P_C$$