

# Potenze e rendimenti nei motori endotermici alternativi

21Feb 2019



Con il presente documento cerchiamo di fare un po' di chiarezza sul bilancio termico e sui rendimenti dei motori endotermici. Ricordiamo che per motore *endotermico* si intende un motore *termico a combustione interna* in cui, dunque, il combustibile viene bruciato internamente al fluido operante, in modo che vengano a far parte di questo i prodotti stessi della combustione. Nei motori a *combustione esterna*, invece, il fluido operante è completamente separato dalla miscela combustibile-aria (motore a vapore e *Stirling*).

Per affrontare lo studio di tali motori, si fa ricorso alla termodinamica che ci permette di descrivere dei cicli ideali che approssimino il più possibile le condizioni reali di funzionamento. Il ciclo teorico con massimo rendimento che evolve fra due temperature è quello di *Carnot*, non realizzabile nella pratica pratica, ma, per quanto detto, di notevole importanza teorica<sup>1</sup>.

Per quanto riguarda i motori a combustione interna, i cicli ideali di riferimento sono i seguenti:

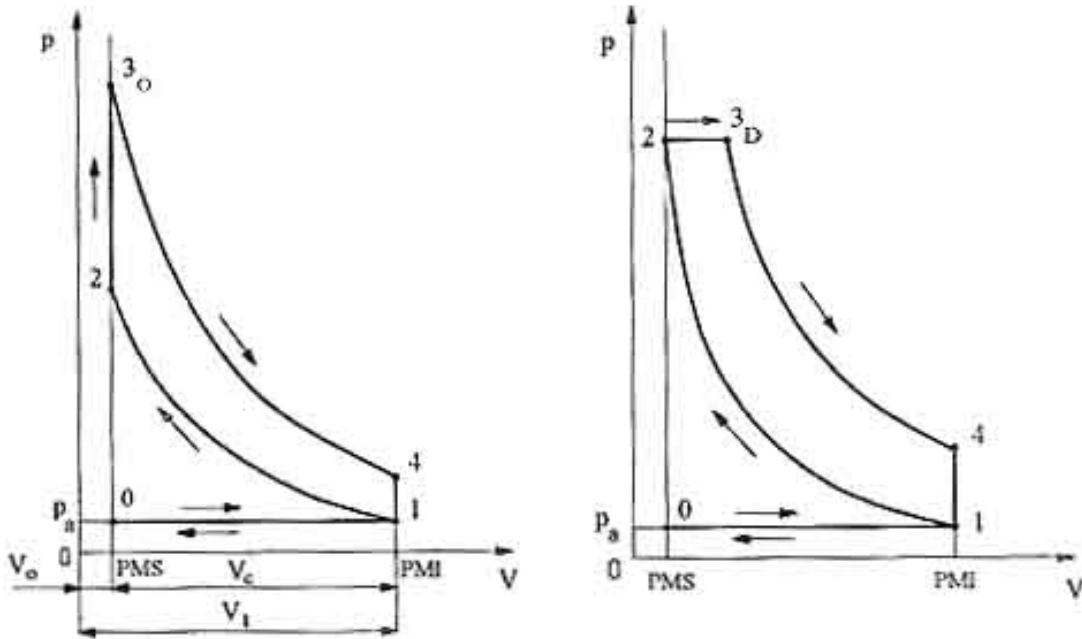


Figura 1 – cicli ideali Otto e Diesel

Per il *ciclo Otto* il **rendimento termico ideale** è:

$$\eta_{term} = 1 - \frac{1}{\rho^{\kappa-1}}$$

mentre per il *ciclo Diesel* è:

$$\eta_{term} = 1 - \frac{1}{\rho^{\kappa-1}} \left( \frac{\tau^{\kappa} - 1}{\kappa(\tau - 1)} \right)$$

$\tau$  è il rapporto volumetrico di combustione  $V_3/V_2$ ;

$\rho$  è il rapporto volumetrico di compressione  $V_1/V_2$ ;

$\kappa$  è il rapporto tra i calori specifici ( $c_p/c_v$ ).

Da queste espressioni, si deduce che a parità di rapporto di compressione, il rendimento del ciclo Diesel è minore del rendimento del ciclo Otto. In pratica non è così in quanto, nei motori Diesel, il gas compresso è aria che non è infiammabile all'aumentare di pressione e temperatura (soltanto nella trasformazione 2→3 si ha una iniezione di gasolio nebulizzato all'interno della camera e la conseguente combustione) perciò si possono raggiungere elevati rapporti di compressione (18÷20). Nei motori Otto, invece, si comprime una miscela di aria+benzina e il rapporto di compressione non supera mai 12 per evitare che sia abbia una autoaccensione del fluido durante la fase di compressione.

I cicli *reali*, invece, cioè che rispecchiano le reali condizioni di funzionamento di un motore, sono quelli "misurati" ossia quelli indicati da opportuni strumenti di misura delle pressioni interne:

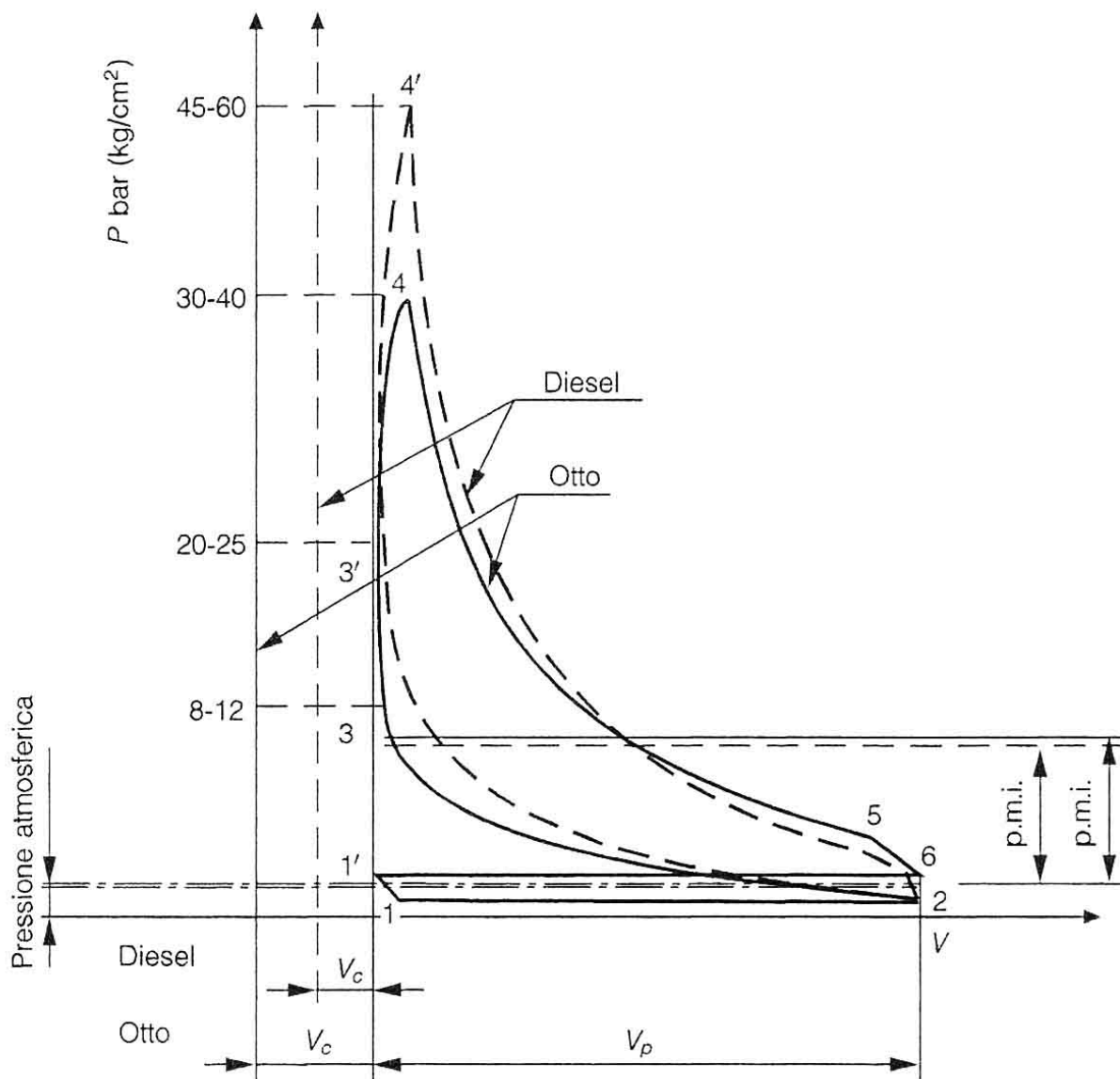


Figura 2

Nella figura i due cicli sono stati sovrapposti per facilitarne il confronto. Si noti che l'origine degli assi per il ciclo Diesel è traslato a destra rispetto a quello del ciclo Otto: il volume  $V_c$  della camera di combustione, infatti, è diverso per i due casi in quanto, a parità di cilindrata unitaria  $V_p$ , essendo il rapporto di compressione del motore Diesel più elevato,  $V_c$  risulterà minore.

Dividendo il valore dell'area per quello della corsa dello stantuffo o della cilindrata, a seconda della scala scelta per le ascisse, si ha l'ordinata media del diagramma, cioè la *pressione media indicata* del fluido nel cilindro. Tale parametro, non dipendendo dalla cilindrata, viene spesso usato per confrontare motori con cilindrata diverse. Il nome di pressione media non deve, tuttavia, trarre in inganno perchè, per quanto detto, non rappresenta il valore medio nel tempo della pressione rilevata all'interno del cilindro!

Per un dato motore, dividendo l'area del ciclo indicato per quella del ciclo termico ideale, otteniamo un valore che chiamiamo **rendimento indicato**.

Chiamando, dunque,  $p_i$  la pressione media indicata e  $D$  il diametro dello stantuffo, si ha che il valore medio della forza agente sullo stantuffo è:

$$\frac{\pi D^2}{4} p_i$$

e il lavoro compiuto da questa forza durante la corsa utile è dato da:

$$L_i = \frac{\pi D^2}{4} p_i \cdot C$$

ma  $(\pi D^2/4) C$  è la cilindrata  $V_p$  di un cilindro (volume parziale, appunto), per cui:

$$L_i = V_p \cdot p_i$$

La **pressione media indicata**, quindi, la si può definire come il lavoro del *ciclo termodinamico indicato* per unità di cilindrata e rappresenta, dunque, la capacità del motore di compiere lavoro.

Per esprimere ciò che una macchina può fare, il lavoro non è però la grandezza più adatta, in quanto non tiene conto del tempo impiegato a produrlo. La grandezza adottata per esprimere la capacità di una macchina di produrre lavoro è la *potenza*, che rappresenta il lavoro compiuto nell'unità di tempo. Volendo esprimere la potenza di un motore ( $P_i$ ), dunque, basta moltiplicare il lavoro per il numero di cicli che il motore compie nell'unità di tempo, pari, in un motore a quattro tempi, alla metà del numero di giri al secondo ( $n$ ):

$$P_i = \frac{V_p \cdot p_i}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

Nel caso di motore pluricilindrico, indicando con  $i$  il numero dei cilindri, il valore della potenza erogata da un cilindro va moltiplicato per il numero di cilindri:

$$P_i = \frac{i \cdot V_p \cdot p_i}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

Nel caso di motore a due tempi, il ciclo si compie in un giro, quindi si ha una corsa utile per ogni giro, per cui:

$$P_i = V \cdot p_i \cdot \frac{n}{60}$$

Con  $V$  si è indicata la cilindrata totale  $V=V_p \cdot i$ . Possiamo raccogliere le due formule in una unica di carattere generale:

$$P_i = \frac{V \cdot p_i}{h} \cdot \frac{n}{30}$$

Dove con  $h$  indichiamo il numero dei tempi del ciclo.

La potenza così ottenuta per calcolo, essendo un'espressione della pressione indicata agente nei cilindri, è detta *potenza indicata*, la quale, essendo funzione del lavoro prodotto dai gas della combustione nei cilindri, non è uguale alla potenza disponibile all'albero.

Dall'espressione della potenza indicata si evince che, per aumentare la potenza del motore, possiamo aumentare indistintamente la  $p_i$  (e quindi la quantità di comburente e combustibile in ingresso), mantenendo il numero di giri costante, oppure aumentare il numero di giri mantenendo costante la  $p_i$ .

Per passare alla **potenza effettiva** utilizzabile all'albero motore bisogna sottrarre la potenza che si perde nell'attrito dello stantuffo e dei cuscinetti, nell'azionamento dei meccanismi della distribuzione, delle pompe di lubrificazione e di raffreddamento, e di tutti gli ausiliari. Si avrà, allora:

$$P_e = P_i \eta_m$$

dove  $\eta_m$  è il **rendimento meccanico organico** del motore.

## Riepilogo rendimenti

Nel presente articolo, abbiamo introdotto più rendimenti. Facciamo il punto della situazione. Il **rendimento termico ideale**  $\eta_{term}$  è il rapporto tra l'area del ciclo ideale (quindi il lavoro) e il calore introdotto.

Il **rendimento indicato**  $\eta_i$  è il rapporto tra l'area del ciclo indicato e l'area del ciclo ideale. Tiene conto, dunque, delle differenze fra ciclo ideale e quello pratico (indicato).

Moltiplicando i suddetti rendimenti, si ha il cosiddetto **rendimento termodinamico**  $\eta_t$  che rappresenta il lavoro reale (indicato) che si sviluppa e il calore in ingresso.

Abbiamo parlato anche di **rendimento meccanico**  $\eta_m$  che tiene conto del lavoro assorbito dagli organi ausiliari propri del motore e del lavoro assorbito per pompaggio (aspirazione e scarico). Peggiora con l'aumentare della velocità media del pistone e, a parità di velocità,

col diminuire del carico. Peggiora anche col diminuire della cilindrata. A coppia massima è normalmente compreso fra 0,8 e 0,9, con valori più bassi attinenti, per quanto detto, a motori veloci e di piccola cilindrata.

Il **rendimento totale** di un motore è il rapporto fra il lavoro utile all'albero motore e quello equivalente all'energia termica del combustibile consumato e sarà, dunque:

$$\eta = \eta_t \eta_m$$

Esiste, infine, anche il **rendimento volumetrico**  $\eta_v$  che è il rapporto del volume dell'aria o miscela aria-carburante realmente introdotta, nelle condizioni atmosferiche (solitamente 20°C a 1,013 bar), e il volume che occuperebbe in caso di motore statico (cilindrata). **Tale rendimento**, dunque, (detto anche *efficienza volumetrica*, visto che il valore può essere anche maggiore dell'unità) rappresenta quanto "efficientemente" si riempie il cilindro rispetto ai valori teorici (cilindrata).

1 il *rendimento* di una macchina è definito, in generale, come il rapporto tra il calore assorbito e il lavoro prodotto. Il rendimento del ciclo di *Carnot* dipende solo dalle temperature  $T_1$  e  $T_2$  (con  $T_1 < T_2$ ) delle sorgenti entro le quali lavora, e vale:  $\eta_C = 1 - (T_1/T_2)$ . Nessuna macchina termica può avere un rendimento più alto di questo: al massimo potrà essere uguale a  $\eta_C$ . Inoltre, grazie al *terzo principio della termodinamica*, sappiamo che non è possibile raggiungere lo *zero assoluto*, per cui possiamo dedurre che nessuna macchina avrà mai rendimento pari a 1.