

**Il rendimento globale di una macchina**

versione: **1.1**  
file originale: *Il rendimento globale di una macchina*  
*130518 ver 1\_1*  
data di stampa: **18/5/2013**  
a cura di: *Franco Quaranta*

## 1 – rendimento globale di propulsione, rendimenti parziali

Una macchina termica ha lo scopo di generare potenza meccanica utilizzando la potenza termica generalmente ottenuta attraverso la combustione di sostanze apposite (dette, appunto, *combustibili*). In termini del tutto generali, quale che sia cioè la macchina in questione, si può parlare di *rendimento globale* (o *totale* o *complessivo*) intendendo per esso il rapporto tra la potenza meccanica resa dalla macchina (alla flangia di accoppiamento con il sistema meccanico trascinato oppure all'organo preposto al trasferimento di tale potenza) e quella che alla macchina era stata fornita attraverso l'alimentazione di combustibile. Dicendo:

$P_B$      potenza al freno  
 $\dot{m}_c$      portata massica di combustibile alla macchina  
 $H_i$      calore specifico inferiore del combustibile<sup>1</sup>

$$\eta_g = \frac{P_B}{\dot{m}_c H_i}$$

Indubbiamente, in questa forma il rendimento globale della serie di trasformazioni che permette di passare da una portata di combustibile ad una potenza immediatamente utilizzabile, tiene conto di tutte le perdite che differenziano tra loro (e nettamente!) la potenza spesa per generare le trasformazioni necessarie per ottenere potenza meccanica ( $\dot{m}_c H_i$ ) e la potenza meccanica resa ( $P_B$ ). Proprio per visualizzare e qualificare tutte le quote di energia coinvolte nelle varie trasformazioni e per identificare correttamente i vari motivi di perdita coinvolti nelle varie fasi del funzionamento della macchina, si usa scindere la frazione costituente il rendimento globale in alcuni fattori, ognuno latore del rendimento di una fase realizzata dalla macchina.

Si definiscono così alcuni rendimenti parziali ognuno caratteristico di una fase e causa di una individuabile quota di perdita energetica.

Detto  $\dot{Q}_1$  il calore reso disponibile alla macchina attraverso la combustione della portata  $\dot{m}_c$  di combustibile, si dice *rendimento di combustione* il rapporto:

$$\eta_b = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_c H_i}$$

Il processo coinvolto in questa fase è, ovviamente, la combustione; il suo rendimento rappresenta il rapporto tra la potenza offerta alla macchina attraverso la portata di combustibile e la resa in termini di calore sviluppato attraverso la combustione; la differenza tra queste potenze è legata al fatto che non si riesce a trasformare tutta l'energia posseduta dal combustibile in calore. Ciò è dovuto a vari motivi i principali dei quali sono legati al fenomeno di combustione che, per sua natura e date le modalità in cui avviene (tempi brevissimi, ambiente non del tutto idoneo, ecc.), non è del tutto completa. Parte del combustibile, pur introdotto nell'ambiente dove avviene la combustione, non trova le condizioni necessarie alla sua ossidazione e viene espulso incombusto dalla macchina insieme ai residui della combustione. Oltre a ciò, ed a seconda del tipo di macchina, i meccanismi di alimentazione potrebbero non riuscire ad elaborare tutto il combustibile che si presenta alla macchina; è il caso, per esempio, del motore diesel in cui ad ogni ciclo una piccola porzione di combustibile non viene iniettato nel cilindro in quanto la sua pressione non è più sufficiente a vincere la forza di reazione della molla dello spillo dell'iniettore (è la cosiddetta "coda di iniezione").

---

<sup>1</sup> Si intende per *potere calorifico inferiore del combustibile* la resa termica del combustibile sottratta della quota energetica persa per fornire all'acqua generata dalla reazione il calore latente di evaporazione

Detta  $P_l$  la *potenza limite* – ossia quella che verrebbe resa dalla macchina se, impegnando per il ciclo termodinamico la potenza termica  $\dot{Q}_1$ , potesse compiere il ciclo teorico limite – si definisce il *rendimento limite*:

$$\eta_l = \frac{P_l}{\dot{Q}_1}$$

Per definire il rendimento limite, si immagina di far avvenire il ciclo in una macchina ideale in cui evolve un fluido reale (con viscosità non nulla). La differenza tra le due potenze coinvolte è dovuta al ciclo termodinamico che si sviluppa in questa fase; pur trattandosi di ciclo teorico, il suo rendimento ha come limite superiore quello del ciclo di Carnot tra le medesime temperature che pertanto si pone come massimo valore per tale rendimento. Ed occorre ricordare che, per motivi di ordine tecnologico, nessun ciclo eseguibile da macchine esistenti ha le fasi del ciclo di Carnot il che deprime ulteriormente il massimo valore che questo rendimento può assumere.

Detta  $P_r$  la *potenza reale* sviluppata dal ciclo termodinamico reale, si definisce *rendimento interno* il rapporto:

$$\eta_i = \frac{P_r}{P_l}$$

Il rendimento interno riflette le condizioni per cui le perdite che si manifestano nel ciclo reale riducono il lavoro che appariva ottenibile nel ciclo limite; le potenze che appaiono nella frazione possono essere quantificate come prodotto della portata di fluido che evolve nella macchina per la pressione regnante in esso. Nel caso dei motori a combustione interna, la potenza reale viene denominata anche *potenza indicata* perché – si vedrà più avanti – la pressione che la genera prende il nome di *pressione indicata*.

Detta, infine,  $P_B$  la potenza meccanica (generalmente denominata *potenza al freno*) effettivamente ottenibile al dispositivo della macchina di connessione con l'utente, si definisce *rendimento meccanico* il rapporto:

$$\eta_m = \frac{P_B}{P_r}$$

La differenza tra le due potenze che appaiono ai termini della frazione è dovuta alle perdite che vi sono nella serie di operazioni meccaniche (da cui il nome del rendimento) che permettono di ottenere la potenza al freno (intesa come prodotto tra una coppia ed una velocità angolare) partendo da quella posseduta dalla portata di fluido in evoluzione ed ottenuta, come detto, da essa per la pressione che vi regna.

## 2 – il MCI: *pressione indicata, pressione media effettiva*

Nel caso dei motori a combustione interna, la pressione (variabile) che si sviluppa in un cilindro durante il ciclo può essere misurata con uno strumento detto *indicatore* (proprio perché, in origine, rivelava la pressione regnante nel cilindro attraverso un *indice* collegato ad una molla di contrasto alla forza rilevata da un sensore posto all'interno del cilindro a contatto con la pressione dei gas); prende per questo il nome di *pressione indicata*  $p_i$ .

Supponendo di assumere come variabile indipendente per i fenomeni studiati l'angolo di manovella  $\theta$  (alternativa sarebbe la scelta del tempo  $t$ : la trattazione cambierebbe di poco), i valori dei parametri in gioco sono variabili rispetto a  $\theta$  (o  $t$ ) anche se il motore è a regime costante.

La potenza erogata per effetto dell'azione della pressione indicata (che abbiamo già denominato *potenza reale*) prende il nome di *potenza indicata*  $P_i$ . Essa, come la pressione che la genera, risulta

variabile rispetto all'angolo di manovella  $\theta$ ; supponendo di trattare inizialmente l'ipotesi di un motore con un solo cilindro (l'estensione ai motori reali, pluricilindrici, è immediata), la potenza erogata istantaneamente si può esprimere come prodotto della forza  $F(\theta)$  esercitata dai gas sul pistone per la velocità  $v(\theta)$  del pistone stesso.

Ricordando la variabilità dei parametri in gioco si può scrivere:

$$P_i(\theta) = F(\theta) v(\theta)$$

La forza dei gas sul pistone  $F(t)$  è pari alla pressione dei gas  $p(t)$  per l'area della corona  $A$ :

$$P_i(\theta) = p_i(\theta) A v(\theta)$$

La portata volumetrica teorica  $\dot{V}$  è data dall'area della corona del pistone per la velocità del pistone  $v(t)$  e si può esprimere nella forma  $V n$  (ove  $V$  è la cilindrata e  $n$  il numero di giri), per cui si ha:

$$P_i(\theta) = p_i(\theta) V n(\theta)$$

Il valor medio della pressione indicata durante l'intero sviluppo del ciclo  $\Delta\theta$  ( $360^\circ$  per un motore 2T,  $720^\circ$  per un 4T) prende il nome di *pressione media indicata* e può essere rappresentata attraverso l'espressione:

$$p_{mi} = \frac{\int_0^{\Delta\theta} p d\theta}{\Delta\theta}$$

Passando ai valori medi e tenendo conto che l'erogazione di potenza avviene ad ogni ciclo per un motore 2T e ogni due cicli nel motore 4T, l'espressione della potenza può essere messa nella forma:

$$P_i = p_{mi} \frac{V n}{\varepsilon}$$

dove  $\varepsilon$  assume valore 1 per i MCI 2T, 2 per i motori 4T.

Quest'ultima espressione è stata ottenuta da quella della potenza istantanea integrandola tra 0 e  $\Delta\theta$ , immaginando il numero di giri sostanzialmente invariato con l'angolo di manovella (cosa realistica se si tiene conto dell'inerzia del motore, della presenza di un volano, ecc.).

La potenza indicata è sostanzialmente coincidente con la potenza reale  $P_r$  descritta sopra, diversa dalla potenza al freno ( $P_B$ , quella messa effettivamente a disposizione dal motore agli utilizzatori) a causa del rendimento interno  $\eta_r$ .

Si definisce *pressione media effettiva* ( $p_{me}$ ) il prodotto tra la pressione media indicata  $p_{mi}$  ed il rendimento interno:

$$p_{me} = p_{mi} \eta_m$$

Per quanto detto, si ha:

$$P_B = \eta_r P_i = \eta_r p_{mi} \frac{V n}{\varepsilon} = p_{me} \frac{V n}{\varepsilon}$$

Alla luce di questa condizione si può affermare che la pressione media effettiva può essere considerata la “generatrice” della potenza al freno così come la pressione media indicata lo è della potenza indicata (o reale).

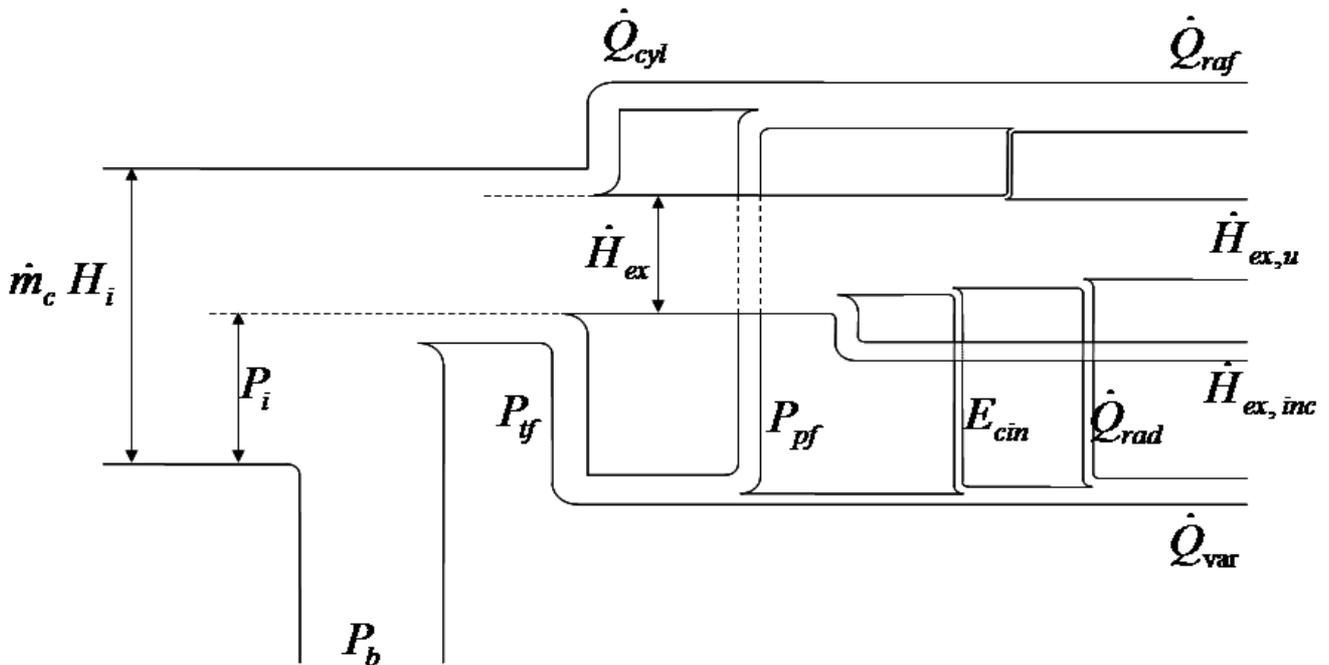
Va osservato che la pressione media indicata è una pressione reale, visibile e misurabile ma non rappresenta definitivamente la prestazione reale del motore in quanto la potenza ad essa dovuta non coincide con quella realmente resa disponibile dal motore (inferiore ad essa in ragione del rendimento  $\eta_r$ ).

Viceversa, la pressione media effettiva, pur non essendo una pressione effettivamente esistente in alcuna fase di funzionamento del motore (e, quindi, neppure direttamente misurabile), è collegata alla potenza messa realmente a disposizione dal motore e, come tale, rappresentativa delle sue prestazioni.

Questo è il motivo per il quale la *pme* viene indicata come fattore tecnologico significativo per la dichiarazioni delle prestazioni di un motore mentre di *pmi* si parla in laboratorio, in fase di misura (e controllo) delle prestazioni.

#### 4 – bilancio energetico di una macchina

Una maniera per rappresentare il flusso dell’energia in una macchina è quella di visualizzarne il bilancio tra l’ingresso (sotto forma di combustibile) e le varie uscite generate dalle fasi di cui si compone il ciclo termodinamico e che sono imposte dalla tecnologia stessa della macchina.



In figura si può osservare come, progredendo da sinistra verso destra, il flusso di energia si scomponga in alcuni sottoflussi, ognuno dei quali riflette un’operazione compiuta dalla macchina. All’estrema sinistra la potenza introdotta attraverso il potere calorifico della portata di combustibile  $\dot{m}_c H_i$  si divide subito in due aliquote: quella utile (superstite al ciclo termodinamico) e quella che il ciclo non permette di sfruttare e che esce con il carico entalpico dei gas di scarico nonché con il calore scambiato (e sottratto alla macchina) dal sistema di raffreddamento.

La quota di potenza meccanica teoricamente utilizzabile  $P_i$  subisce una decurtazione dovuta alle perdite meccaniche che devono essere vinte per far girare la macchina: la potenza indicata come  $P_{if}$  è legata a questa circostanza e, nella logica utilizzata nella formulazione del bilancio, si divide, a sua volta, in un’aliquota che va con la potenza persa con il raffreddamento del motore (in quanto le relative perdite richiedono l’asportazione del calore generato) ed una che raggiunge le perdite

energetiche generiche (sono le perdite generate da meccanismi non direttamente raffreddati; es: nei cuscinetti di manovella e di banco).

Si individuano così tre linee in cui si può considerare suddivisa l'energia non trasformata in lavoro meccanico, in uscita dalla macchina:  $\dot{Q}_{raf}$  che rappresenta tutti i contributi dovuti al raffreddamento dei vari organi della macchina;  $H_{ex}$  che include l'energia posseduta dai gas di scarico (sia perfettamente combustibili:  $u$ , sia gli incombustibili:  $inc$ );  $\dot{Q}_{var}$  che include le altre aliquote energetiche che abbandonano il motore senza essere trasformate in lavoro (energia cinetica dei gas, calore perso per irradiazione, ecc.).