

PRESTAZIONI

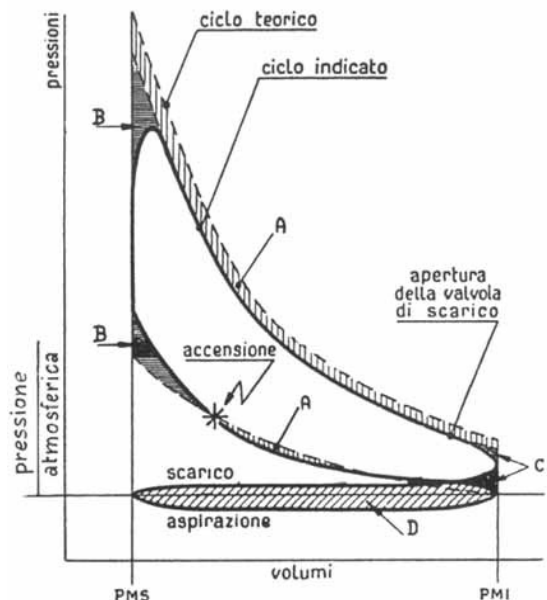
(di Giorgio Sforza)

Le prestazioni di un motore sono rappresentate dalle sue curve caratteristiche, dai diagrammi cioè che danno le variazioni della potenza, della coppia motrice e del consumo di combustibile al variare del numero di giri. Queste vengono di solito rilevate al banco in condizione di alimentazione massima, a valvola del carburatore completamente aperta¹.

Potenza e Coppia motrice

Confrontando la potenza perduta per attrito con quella effettivamente erogata si constata come, in normali motori, la prima sia del tutto trascurabile rispetto alla seconda². Perciò nel ciclo reale, in prima approssimazione, l'area del ciclo è uguale al lavoro prodotto.

Come si vede dalla figura accanto, si hanno due aree, una positiva ed una negativa. Infatti la fase di aspirazione si svolge ad una pressione leggermente inferiore a quella atmosferica (circa 0,9 bar) e la depressione si accentua al crescere della velocità dello stantuffo. Durante lo scarico forzato si ha invece una leggera sovrappressione (circa 1,1 bar). Perciò in queste due fasi, dette fasi di pompaggio, il motore cede lavoro al fluido, esattamente quello che è rappresentato dall'area negativa. Occorre quindi sottrarre dall'area positiva (porzione chiusa racchiusa dalle quattro fasi) l'area negativa individuata dalle fasi di pompaggio). Se A è il valore di tale differenza, il rapporto tra A ed il volume V della cilindrata fornisce la retta di compenso del ciclo, ovvero quel valore della pressione cui si da comunemente il nome di pressione media indicata:



$$\frac{A}{V} = p_{mi} \quad \text{ovviamente il lavoro indicato sarà dato da} \quad L_i = V \cdot p_{mi} = A$$

e la potenza indicata:

$$N_i = \frac{L_i}{t} = p_{mi} \cdot \frac{V}{t} = V \cdot \frac{n}{\varepsilon \cdot 60} \cdot p_{mi}$$

essendo t il tempo per l'effettuazione di un ciclo, n il numero di giri al minuto (RPM) e ε il fattore che tiene conto del numero di giri necessario per compiere un ciclo (2 per il motore a 4 tempi e 1 per il motore a 2 tempi). Se la pressione media è misurata in Pa e il volume in m³ si avrà:

$$P_i = V \cdot \frac{n}{\varepsilon \cdot 60} \cdot p_{mi} \cdot 10^{-3} [kW]$$

¹ Nei motori ad accensione spontanea con pompa di iniezione regolata per la massima portata consentita.

² Le cause di irreversibilità dovute a reazioni chimiche (irreversibilità di seconda specie) non modificano l'area del ciclo; non così accade per gli attriti (irreversibilità di prima specie)

Questa è la potenza raccolta dallo stantuffo, ma non sull'asse. La potenza effettiva P_e è:

$$P_e = P_i \cdot \eta_m = V \cdot \frac{n}{\varepsilon \cdot 60} \cdot p_{mi} \cdot 10^{-3} [kW]$$

per ottenere una formula analoga alla precedente spesso si pone:

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

in cui p_{me} è la pressione media effettiva³. Si ha allora:

$$P_e = p_{me} \frac{V \cdot n \cdot 10^{-3}}{\varepsilon \cdot 60} [kW]$$

essendo $V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C \cdot i$ dove D è l'alesaggio, C la corsa e i il numero di cilindri.

Coefficiente di riempimento

Nella corsa di aspirazione lo stantuffo genera un volume V ed è quindi idealmente capace di introdurre nel cilindro una massa d'aria uguale a V/va, essendo va il volume specifico dell'aria misurato nelle condizioni di pressione e temperatura dell'ambiente che alimenta il motore. In effetti la massa di gas introdotta differisce dalla massa ideale per le seguenti ragioni:

1. Perché i gas combusti alla fine della corsa di scarico hanno pressione superiore a quella dell'ambiente esterno e si espandono durante una prima parte della corsa di aspirazione, ritardando l'inizio della ammissione d'aria.
2. Perché durante la corsa di aspirazione le pareti del cilindro riscaldano l'aria diminuendone la densità. Per contro il riscaldamento dovuto al mescolamento con i gas caldi residui non provoca una sensibile perdita perché il riscaldamento dell'aria è accompagnato da un loro raffreddamento e quindi da una contrazione volumetrica dei gas.
3. Perché alla fine della corsa di aspirazione l'aria ha una pressione inferiore a quella dell'ambiente esterno e quindi una densità minore. A questa perdita si rimedia, in parte, ritardando la chiusura della valvola di aspirazione. Nelle condizioni ottime, tale chiusura dovrebbe avvenire quando si ha nuovamente equilibrio, tra le due pressioni. Così facendo si ha una riduzione di volume (perché lo stantuffo è già in risalita) per cui la perdita, se pur ridotta, rimane.

Dunque solo una frazione μ della massa ideale viene aspirata e ciò è rappresentato dal coefficiente di riempimento, definito come rapporto tra massa d'aria effettivamente aspirata e massa d'aria ideale che sarebbe aspirata in assenza di perdite di carico.

$$\mu = \frac{A_{eff}}{V \cdot \rho_a}$$

dove ρ_a è una densità che occorre precisare dato che non sussiste una convenzione universalmente accettata. Per la precisione può essere:

- a. Densità del fluido all'ingresso aspirazione (ingresso cilindro);

³ Per un motore ad accensione comandata la pressione media effettiva è mediamente compresa tra 0,7 e 0,8 Mpa.

b. Densità riferita a condizioni standard ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $p = 760 \text{ mmHg}$).

I valori usuali dei coefficienti di riempimento sono $\mu = 0,70 \div 0,85$ per motori normali.

A prima vista sembrerebbe sussistere proporzionalità diretta tra coefficiente di riempimento μ e rapporto di compressione r ; in effetti è il contrario. La massa d'aria effettivamente introdotta ed intrappolata nel cilindro differisce da quella ideale anche per il fatto che i gas residui, alla fine della fase di scarico forzato, hanno una pressione superiore e si espandono durante una prima fase della corsa di aspirazione, ritardando l'ammissione della carica fresca. Ma quando quest'ultima viene a contatto con i gas residui, ne provoca un energico raffreddamento, cui fa seguito una contrazione del loro volume. Viene cioè creato nuovo spazio per l'introduzione di altro fluido fresco e questo effetto positivo è tanto più sentito quanto è alto il volume della camera di combustione rispetto al volume del cilindro, ossia quanto più è basso il rapporto di compressione.

Altra espressione della potenza

Nei motori ad accensione comandata la cilindrata viene riempita di miscela la cui densità ρ_m è pari all'inverso del volume specifico v_m che a sua volta è uguale a:

$$v_m = \frac{v_a \cdot \alpha + v_g \cdot 1}{\alpha + 1}$$

in cui v_a è il volume specifico dell'aria, v_g è il volume specifico del combustibile tutto gassificato e α il rapporto aria/combustibile, di poco superiore a quello stechiometrico⁴. Si ha dunque:

$$\delta_m = \frac{\alpha + 1}{v_a \cdot \alpha + v_g} = \frac{\alpha + 1}{v_a \cdot (\alpha + \frac{v_g}{v_a})} = \delta_a \cdot \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + \frac{\delta_a}{\delta_g}} \right)$$

Poiché il rapporto ρ_a/ρ_g non è molto diverso da 1 e dato che α per motori ad accensione comandata vale $13 \div 15$, non c'è sensibile differenza tra numeratore e denominatore:

$$\frac{\alpha + 1}{\alpha + \frac{\rho_a}{\rho_g}} \simeq 1 \quad \text{per cui} \quad \rho_m \simeq \rho_a$$

Sulla base di queste considerazioni si può ora formulare una nuova espressione della potenza.

La quantità di miscela M entrante nel cilindro in ogni ciclo è

$$M = V \cdot \rho_m \cdot \mu = V \cdot \delta_a \cdot \mu$$

per cui la quantità di combustibile Q entrante nel cilindro in ogni ciclo è:

⁴ Nel caso di un motore ad accensione spontanea detto rapporto è molto superiore a quello stechiometrico (operatività in eccesso d'aria).

$$Q = \frac{V \cdot \delta_a \cdot \mu}{\alpha} \quad \text{e la conseguente portata media } q \text{ risulta pari} \quad q = \frac{V \cdot \delta_a \cdot \mu}{\alpha} \cdot \frac{n}{60 \cdot \varepsilon}$$

Se H_i è il potere calorifico inferiore espresso in [kJ/kg], il calore ceduto dal combustibile risulta pertanto pari a:

$$H_i \cdot q = H_i \cdot \frac{V \cdot \delta_a \cdot \mu}{\alpha} \cdot \frac{n}{60 \cdot \varepsilon}$$

Ma il calore utilizzato dipende dal rendimento globale:

$$\eta_g = \frac{N_e}{q \cdot H_i}$$

per cui si ottiene la seconda formulazione della potenza di un motore ad accensione comandata⁵:

$$P_e = H_i \cdot \eta_g \cdot \frac{V \cdot \delta_a \cdot \mu}{\alpha} \cdot \frac{n}{60 \cdot \varepsilon} \quad [kW]$$

Dal confronto delle due espressioni della potenza testé ricavate si ottiene che la pressione media effettiva risulta pari a:

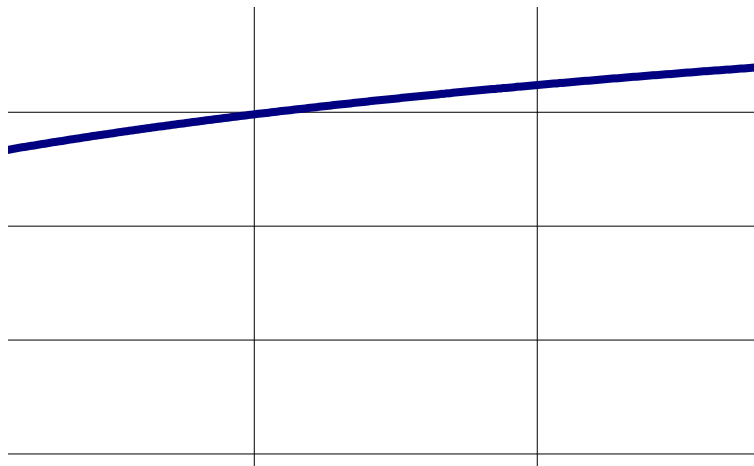
$$p_e = H_i \cdot \eta_g \cdot \frac{\delta_a \cdot \mu}{\alpha}$$

Rendimenti

Il rendimento di una macchina termica è il rapporto tra il lavoro fornito ed il calore ricevuto. Nel caso di un motore ad accensione comandata, il rendimento termico ideale del ciclo Beau de Rochas che la caratterizza è pari a:

$$\eta_{ti} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

in cui r è il rapporto di compressione e k l'esponente dell'adiabatica.



⁵ Considerando che l'espressione è semplificata ed in essa compare la portata d'aria (e non di miscela), risulta tanto meno approssimata quanto maggiore è l'eccesso d'aria e a maggior ragione risulta valida per un motore ad accensione spontanea.

Il sistema più efficace per aumentare il rendimento termico ideale di un motore consiste nell'aumentarne il rapporto di compressione. Tale aumento però non può essere portato entro un certo limite perché i valori della temperatura e della pressione diventano tali da indurre detonazioni e preaccensioni incipienti.

Il rendimento del ciclo indicato è dato dal rapporto tra il lavoro ottenuto nel ciclo indicato e quello ottenuto nel ciclo ideale:

$$\eta_i = \frac{L_i}{L_t}$$

Il rendimento termodinamico è dato dal prodotto dei due rendimenti sopra descritti:

$$\eta_l = \eta_{ii} \cdot \eta_l \cdot \eta_i = \frac{L_{id}}{Q_1} \cdot \frac{L_l}{L_{id}} \cdot \frac{L_i}{L_l} = \frac{L_i}{Q_1}$$

Con gli usuali rapporti di compressione, sempre inferiori a 10, il rendimento termodinamico è variabile tra il 30 ed il 35%. Ciò significa che solo questa percentuale di energia viene trasformata in energia meccanica sotto forma di moto dei pistoni. La restante energia viene dispersa per il 40 ÷ 45% attraverso i gas di scarico e per il 20 ÷ 25% attraverso il sistema di raffreddamento e lubrificazione.

Il rendimento meccanico η_m tiene conto di tutte le resistenze interne generate dagli attriti e dall'azionamento degli accessori. Esso peggiora all'aumentare della velocità di rotazione e al diminuire del carico. Il valore massimo del rendimento meccanico si realizza pertanto quando il motore funziona a carichi elevati e a basso regime di rotazione. Il valore medio del rendimento meccanico dei motori aeronautici è variabile tra l'85 e il 90%.

Il rendimento globale η_g di un motore, ossia il rapporto tra quanto ricavato all'albero sotto forma di energia meccanica e quanto immesso sotto forma di energia termica della benzina, è dato dal prodotto del rendimento termico con il rendimento meccanico:

$$\eta_g = \eta_t \cdot \eta_m$$

Il rendimento globale di un motore aeronautico oscilla pertanto tra il 25 ed il 30%.

Il rendimento propulsivo η_p è un rendimento che non riguarda direttamente il motore, bensì l'elica con cui è accoppiato.

Regolazione

La coppia motrice si ottiene dividendo la potenza per la velocità corrispondente. Perciò la coppia risulta proporzionale alle tre grandezze μ , η_g e α nel modo seguente:

$$C \propto \frac{\mu \cdot \eta_g}{\alpha}$$

La variabilità del rapporto aria/combustibile è mantenuta circa costante⁶ dato che il rendimento di combustione (e quindi quello globale) subirebbe forti decadimenti. Infatti per α bassi la miscela diviene più ricca e la combustione non riesce a svilupparsi completamente; mentre con elevati valori di α si ottengono più basse potenze. In un motore a carburazione la coppia si varia modificando non α , ma bensì μ strozzando o aprendo il condotto di aspirazione a mezzo della valvola a farfalla, sistemata a valle del miscelatore, che con la sua apertura, comandata dal pedale dell'acceleratore, regola la quantità di miscela che alimenta il motore e di conseguenza la potenza erogata. Da qui l'importante differenza di regolazione per "quantità" o per "qualità" a seconda se si è presenza di un motore a combustione interna ad accensione comandata o ad accensione spontanea. Da un punto di vista teorico il legame tra coppia e rendimento η_g non è stretto come quello tra coppia e coefficiente di riempimento μ . A parità di μ la coppia, nella regolazione teorica, dovrebbe essere mantenuta costante. In pratica oltre un certo limite n_2 la coppia tende a diminuire a causa delle aumentate velocità nei condotti di aspirazione che provocano sensibili perdite di carico. Il fatto che la coppia decada anche prima di un limite inferiore n_1 può addebitarsi a due motivi:

1. Al diminuire del numero di giri diminuisce la velocità della pompa di mandata del combustibile e quindi ne consegue una iniezione irregolare, che provoca un abbassamento del rendimento.
2. Al diminuire del numero di giri n la fase di compressione viene rallentata e così l'aria ha più tempo per cedere calore alle camicie e la temperatura T_3 diventa inferiore a quella di normale funzionamento. Al diminuire di n diminuisce μ per perdite di carico dovute a strozzamento del condotto d'aspirazione. Inoltre, a basse velocità, le goccioline di combustibile aspirato sono relativamente grosse e perciò la combustione avviene peggio. Ne segue il duplice effetto di diminuzione di μ e η_g .

Consumo orario e consumo specifico

Il consumo è un parametro importante per un motore aeronautico in quanto da esso dipende la capacità dell'aereo di rimanere in volo più a lungo o di percorrere distanze maggiori con una determinata quantità di carburante. In generale esso, in condizioni di p.m.e. massima, è massimo ai bassi regimi e diminuisce con l'aumentare dei giri, fino a quando la velocità di rotazione del motore raggiunge i $2/3 \div 3/4$ della massima, per poi crescere di nuovo con l'ulteriore aumento della velocità. Attraverso le pareti dei cilindri e della camera, viene dissipata, ai bassi regimi, una quantità di calore maggiore di quella perduta a regimi elevati, tenuto conto del tempo durante il quale i gas caldi restano a contatto con le pareti. Inoltre a bassi regimi, dato che la miscela è ricca, possono verificarsi condensazioni e fenomeni di oscillazione della pressione nei condotti. Oltre un certo regime il consumo specifico tende nuovamente ad aumentare per l'aumento delle perdite meccaniche ed, in minor misura, per le perdite di pompaggio nei condotti.

Sul consumo di combustibile ha notevole influenza il rapporto di compressione: infatti aumentandolo aumenta il rendimento termico ideale e quindi diminuisce il consumo di combustibile.

Esprimendo il rendimento globale come rapporto tra il lavoro effettivo ed il calore fornito si ha:

⁶ Nel caso di un motore ad accensione spontanea è affidata all'operatore.

$$\eta_t \cdot \eta_m = \eta_g = \frac{L_E}{Q_1} = \frac{L_E}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta t}{Q_1} = \frac{P_E}{Q_1} = \frac{1}{\frac{Q_1}{P_E \cdot \Delta t}} \quad \text{e di conseguenza} \quad \frac{Q_1}{P_E \cdot \Delta t} = H_i \cdot C_s = \frac{1}{\eta_g}$$

per cui si ha che

$$C_s = \frac{1}{H_i \cdot \eta_g}$$

Dalla relazione sopra ricavata si evince che per alti poteri calorifici e per alti rendimenti globali si hanno bassi consumi specifici.

Il consumo orario C_h rappresenta la massa di carburante consumata dal motore nell'unità di tempo. Si esprime in [kg/h]. Talvolta si parla anche di volume di carburante consumato dal motore nell'unità di tempo [l/h] anche se così facendo non si tiene conto delle variazioni di volume del carburante.

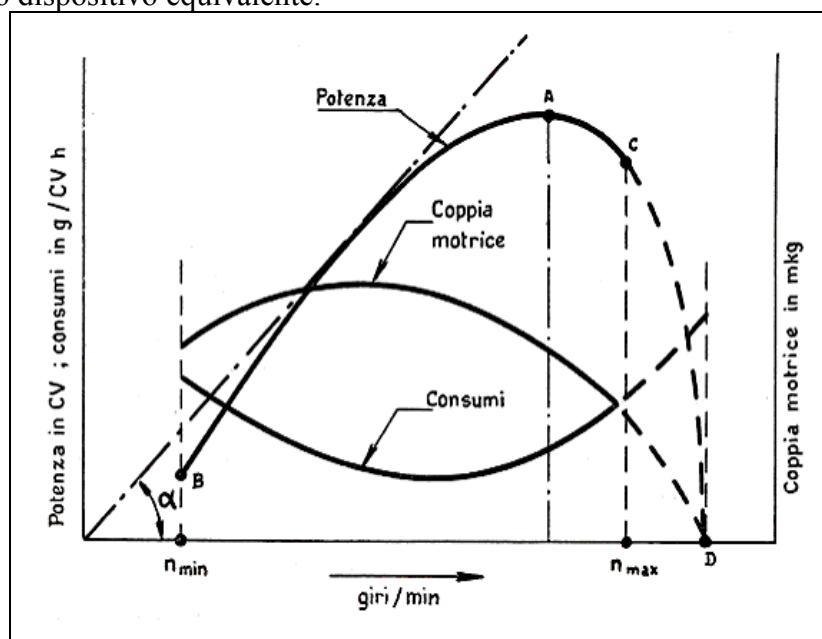
Il consumo specifico rappresenta la massa di carburante consumata dal motore nell'unità di tempo, riferita all'unità di potenza. Si esprime in [kg/(kW·h)]. Allo stato dell'arte si hanno consumi specifici c_s compresi tra

$$0,22 \div 0,35 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}}$$

con la variabilità dipendente dalle dimensioni del motore (piccole potenze più alti consumi specifici, grandi potenze più bassi consumi specifici).

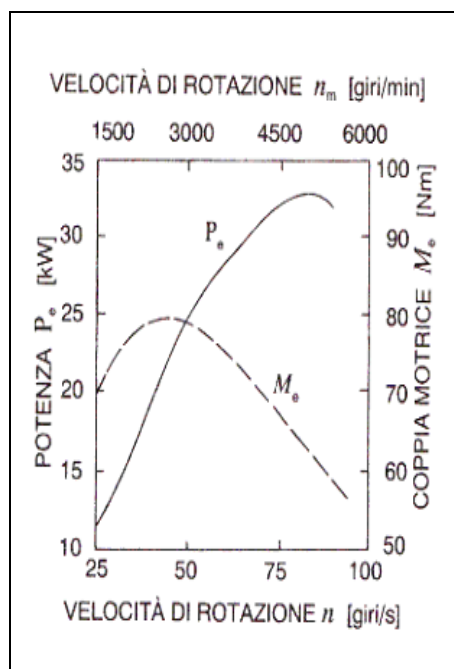
Curve caratteristiche

Le curve caratteristiche altro non sono che diagrammi che relazionano le variazioni di potenza, coppia motrice e consumo con il numero di giri. Esse sono rilevate al banco in condizioni ambientali standard, sottoponendo il motore a carichi variabili mediante l'impiego di un freno (freno di Prony) o dispositivo equivalente.



Le curve hanno inizio da un numero di giri minimo n_{\min} , al quale la potenza sviluppata è tutta assorbita dalle resistenze meccaniche interne del motore. Al di sotto del regime di marcia al minimo il motore si ferma o funziona in modo molto irregolare a causa delle fluttuazioni che intervengono nell'alimentazione e nella coppia motrice. All'aumentare del regime di rotazione si riscontra un aumento della coppia motrice e della potenza fino al numero di giri individuato dal massimo della curva di coppia: esso corrisponde alla velocità del motore in corrispondenza della quale la massa di miscela aria-benzina, che entra e viene utilizzata nei cilindri, è la massima possibile per ogni ciclo. A questo numero di giri, pertanto, essendo massimo il prodotto del coefficiente di riempimento per il rendimento globale, diventa massima la coppia motrice.

La potenza sviluppata dal motore è individuabile anche dal punto in cui la retta (retta tratto e punto) passante per l'origine degli assi ed inclinata rispetto all'ascisse di un angolo α è tangente alla curva di potenza. Aumentando il numero di giri, la coppia motrice diminuisce perché si riduce la massa di miscela aria-benzina utilizzata per ogni ciclo, a causa delle maggiori perdite nei condotti dovute alle aumentate velocità in gioco. La potenza, di contro, continua ad aumentare perché l'aumento del numero di giri fa aumentare la massa di miscela interessata nell'unità di tempo. L'aumento di potenza, conseguente all'aumento della velocità di rotazione, continua fino al numero di giri identificato da n_{\max} , oltre il quale la massa di miscela utilizzabile durante ogni ciclo si riduce più rapidamente di quanto aumenti il numero dei cicli nell'unità di tempo e pertanto la potenza diminuisce. Oltre n_{\max} non si può andare in quanto il motore non è strutturato a tale scopo. La parte tratteggiata della curva di potenza non è pertanto mai rilevata durante le prove al banco, sia per non compromettere l'integrità del motore, sia perché di nessun interesse pratico.



Possibilità di miglioramento della potenza

L'evoluzione continua della tecnica motoristica ha portato a miglioramenti del ciclo, della sicurezza di funzionamento e soprattutto del rapporto potenza/peso. A parità di cilindrata la potenza può essere migliorando agendo sui parametri che compaiono nell'espressione della potenza sotto riportata:

$$N_e = V \cdot \rho_a \cdot \mu \cdot \frac{H_i}{\alpha} \cdot \frac{n}{60 \cdot \varepsilon} \cdot \eta_g$$

Dove ρ_a è la densità dell'aria all'ingresso del motore; $\delta_a \cdot V$ è la massa di fluido che entrerebbe se la densità all'interno del cilindro fosse uguale a quella esterna; $\rho_a \cdot V \cdot \mu$ è l'aria effettivamente intrappolata; $\rho_a \cdot V \cdot \mu \cdot H_i / \alpha$ è la quantità di calore somministrata per ogni ciclo; $\rho_a \cdot V \cdot \mu \cdot H_i / \alpha \cdot n / (60 \cdot \varepsilon)$ è la quantità di lavoro fornito al secondo e $\rho_a \cdot V \cdot \mu \cdot H_i / \alpha \cdot n / (60 \cdot \varepsilon) \cdot \eta_g$.

Per alcuni fattori che compaiono nell'espressione della potenza la possibilità di variazione riguarda solo il confronto tra un tipo di macchina ed un altro; per altri si presenta anche nell'ambito di uno stesso esemplare in diverse condizioni di funzionamento, sia pure con un più ristretto campo di variabilità.

Se il motore non è sovralimentato, il coefficiente di riempimento μ può essere al massimo pari all'unità (oggi si arriva a valori compresi tra 0,85 e 0,95) e quindi non sussistono grandi possibilità di miglioramento.

Si può pensare di migliorare la potenza usando combustibili di migliore qualità; così facendo occorre però variare anche il rapporto α aria-combustibile. Per motori a carburazione inoltre α è uguale circa al rapporto stechiometrico e perciò si è vincolati a precisi valori anche per questo fattore. È pertanto meglio far riferimento al rapporto H_i / α detto tonalità termica che per i comuni derivati petroliferi varia da 700 a 650 kcal/kg. Un tempo si tentava di migliorare la potenza introducendo nel carburante una certa percentuale di sostanze esplosive (operazione oggi assolutamente vietata); queste sostanze contengono anche il comburente (sovralimentazione chimica) e quindi alzano il valore della tonalità termica. Altro metodo è quello di arricchire l'aria aspirata con ossigeno puro (per α si scende da 15 ad 8) ma anche così si hanno notevoli inconvenienti quali la decomposizione del lubrificante e l'incremento del cimento termico.

Il rendimento globale η_g non è suscettibile di grandi miglioramenti dato che a tutt'oggi si è giunti a valori molto alti e i guadagni sono tanto più bassi quanto più alto è il rendimento.

Il modo migliore per incrementare la potenza a parità di cilindrata è quello di aumentare il numero di cicli al secondo, ossia agire sul numero di giri n . Aumentando però n diminuisce la pressione di aspirazione e si accentua la differenza delle densità dentro e fuori dal cilindro con la conseguente diminuzione di μ . Anche il rendimento globale è influenzato negativamente dall'aumento di n (il rendimento meccanico risente in modo particolare dell'aumento delle sollecitazioni). Con l'aumentare del numero di giri nascono importanti problemi riguardo alle sollecitazioni: infatti le forze d'inerzia crescono con il quadrato di n . Occorre perciò alleggerire le parti in movimento del motore pur rimanendo ad alti livelli le sollecitazioni di tipo termico. Un diverso aspetto di questi problemi si presenta in quei casi in cui le utilizzazioni non consentono elevate velocità. È questo il campo aeronautico in cui, soprattutto per l'accoppiamento con l'elica e per avere buoni rendimenti propulsivi, si adottano velocità di rotazione sensibilmente inferiori a quelle dell'equivalente motore automobilistico di pari cilindrata.

La diminuzione di ε (da 2 ad 1 nel passaggio da un motore quattro tempi ad un motore due tempi) non è presa in considerazione in quanto in campo aeronautico si usano solo ed esclusivamente motori a quattro tempi.

Variation of power with the quota

La potenza erogabile da un motore è influenzata, in modo significativo, dai fattori ambientali quali la pressione, la temperatura e l'umidità dell'aria, in quanto ne modificano il coefficiente di riempimento. Infatti la massa d'aria che entra nei cilindri durante un ciclo, ossia la carica reale, varia in modo concorde alla densità dell'aria, la quale, a sua volta, aumenta la pressione, che, al contrario, diminuisce quando aumentano la temperatura e l'umidità.

In un motore aspirato, al diminuire della densità, diminuisce il coefficiente di riempimento e quindi il motore ha a disposizione meno ossigeno per la combustione, con la conseguenza che risulta minore la quantità di benzina che può essere bruciata.

Mentre la diminuzione della densità e della pressione con la quota è da intendersi come fattore peggiorativo per la potenza, la diminuzione della temperatura agisce a carattere benefico.

Una formula empirica che permette di calcolare la variazione della potenza con la quota è la seguente:

$$N = N_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}} = N_0 \cdot \Psi$$

In cui N , p e T sono la potenza, la pressione e la temperatura a quota z e N_0 , p_0 e T_0 la potenza, la pressione e la temperatura a quota 0. Ψ prende il nome di “fattore di correzione della potenza con la quota”.

In passato si soleva rimediare a questo inconveniente aumentando fortemente il rapporto di compressione del motore (*motori supercompressi*), con l'avvertenza di lasciare sempre strozzata l'aspirazione nel volo a terra e a bassa quota per evitare un eccessivo incremento di pressione alla fine della compressione in grado di provocare preaccensione e detonazione. Talvolta si allungava esageratamente la corsa, o si aumentava l'alesaggio, del pistone (*motori surdimensionati*). Al diminuire della pressione di alimentazione diminuisce la potenza, ma diminuiscono anche le sollecitazioni degli organi del motore stesso; quindi un motore calcolato per fornire una data potenza ad una *quota normale* $z > 0$ risulterà più leggero, a parità di cilindrata, di un motore ordinario. Con questo sistema dei *motori alleggeriti* è possibile compensare la pressione di aspirazione; naturalmente alle quote inferiori a quella normale occorre provvedere a proteggere il motore contro le sovrasollecitazioni, per esempio strozzando il carburatore con una valvola a comando monometrico, indipendente dalla volontà del pilota. Con tale sistema si ha anche il vantaggio di poter usufruire di sovrapotenza alle basse quote eliminando per brevi periodi lo strozzamento al carburatore.

Oggi questi sistemi, poco pratici, sono stati del tutto abbandonati e si preferisce dotare il motore di un compressore rotativo centrifugo o volumetrico a capsulismo (roots), che mantenga la pressione nel condotto di aspirazione ad un valore ben superiore a quella esterna, ed in genere maggiore anche della pressione atmosferica a livello del mare. Se il compressore deriva il moto direttamente dall'albero motore, con un rapporto di trasmissione fisso, la pressione nei condotti a monte delle valvole di aspirazione può essere pari a quella atmosferica a quota 0 solo ad una particolare quota detta *quota di ristabilimento*. A quote maggiori la potenza diminuisce: la legge di diminuzione è però leggermente meno rapida di quella che avrebbe un motore aspirato per il benefico effetto che ha la diminuzione della temperatura all'ingresso del compressore sul rapporto monometrico di questo. A quote inferiori a quella di ristabilimento, come visto per il motore alleggerito, occorre limitare al valore massimo ammissibile la pressione di alimentazione. Occorre perciò strozzare la mandata o l'aspirazione del compressore, oppure far rifluire parte della portata dalla mandata all'aspirazione, a mezzo di un limitatore automatico. In tali condizioni, mentre il motore fornisce

sempre pressoché la stessa potenza, il compressore ne assorbe una aliquota via via crescente con il diminuire della quota, sicché la potenza disponibile all'albero diminuisce sensibilmente. L'inserzione di un cambio di velocità continuo nella trasmissione del moto dal motore al compressore permetterebbe evidentemente di mantenere costante la pressione di mandata di quest'ultimo variandone il numero di giri, col che rimarrebbe essa pure costante. Di fatto la realizzazione pratica di un tale cambio presenta però difficoltà costruttive tali da non averne mai consentito la pratica adozione. Al contrario la soluzione con cambio a due, o raramente più, velocità, per essendo una soluzione intermedia di compromesso, ha trovato numerose applicazioni.

Le normali pressioni di sovralimentazione dei motori aeronautici dipendono dalla quota di ristabilimento che si vuole realizzare e la curva di potenza in funzione della quota è strettamente legata al tipo di compressore impiegato e alla sua velocità⁷.

Per avere una curva di potenza, entro certi limiti, pressoché indipendente dalla quota si ricorre al sistema di azionare il compressore con una turbina a gas, alimentata dallo scarico del motore stesso. In tal caso non si ha alcun collegamento meccanico tra motore e compressore e la velocità del gruppo turbina-compressore cresce con la quota e ne risulta un funzionamento autoregolatore. Il gruppo turbocompressore adegua, però, il suo numero di giri alle condizioni di funzionamento del motore e ne nascono altre limitazioni. Se alla quota z il numero di giri del turbocompressore n_g era quello massimo compatibile con la resistenza meccanica, a quote superiori, dove esso tende ad aumentare, interviene un limitatore tachimetrico in modo tale da consentire che la pressione di alimentazione, e quindi la potenza del motore, varino all'incirca come nel caso del compressore a comando meccanico. A quote inferiori a quella di ristabilimento, occorre limitare la pressione di mandata del motore e ciò provoca un calo di potenza del motore anche se molto meno sensibile di quella che si ha nel caso di compressore a comando meccanico.

Grazie al turbocompressore si riescono ad avere potenze superiori a 70 cv/l, pari a ca. il doppio delle normali potenze di motori automobilistici non sovralimentati che usualmente hanno velocità di rotazione pari a circa il doppio di quelli aeronautici.

Esempio 1

Un motore sviluppa una potenza di 200 CV. Utilizzando le tabelle dell'aria tipo determinare la potenza a quota 3500 m.

Soluzione: sulle tabelle dell'aria tipo determiniamo a 3500m: $T = 265.41K$ e $p = 65764 Pa$. Essendo $T_0 = 288.16K$ e $p_0 = 101325 Pa$ si ha:

$$N = 200 \cdot \frac{65764}{101325} \cdot \sqrt{\frac{288.16}{265.41}} \approx 135 CV$$

Esempio 2

Determinare a quale quota il motore precedente eroga una potenza massima di 110 CV.

Soluzione: troviamo:

⁷ O alle sue possibili velocità se è prevista la possibilità di variare per salti il rapporto di trasmissione tra l'albero motore ed il compressore per avere più quote di ristabilimento.

$$\psi = \frac{N}{N_0} = 0.55$$

Tenendo conto del risultato dell'esempio precedente, ad iniziare da quota 4000 m costruisco la seguente tabella:

| Quota (m) | T (K) | P (Pa) | Ψ |
|-----------|--------|--------|--------|
| 4000 | 262.16 | 62640 | 0.6738 |
| 4500 | 258.91 | 57728 | 0.6011 |
| 5000 | 255.66 | 54020 | 0.5660 |
| 5500 | 252.41 | 50507 | 0.5326 |

Il valore 0.55 di ψ si trova fra le quote di 5000 e 5500m. Determiniamo la quota per interpolazione lineare:

$$z = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{\psi_2 - \psi_1} \cdot (\psi - \psi_1) = 5000 + \frac{5500 - 5000}{0.5326 - 0.5660} \cdot (0.55 - 0.5660) \approx 5240 \text{ m}$$