,MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA

Un motore alternativo a combustione interna, ciclo Otto a quattro tempi, per uso aeronautico, ha le seguenti caratteristiche:

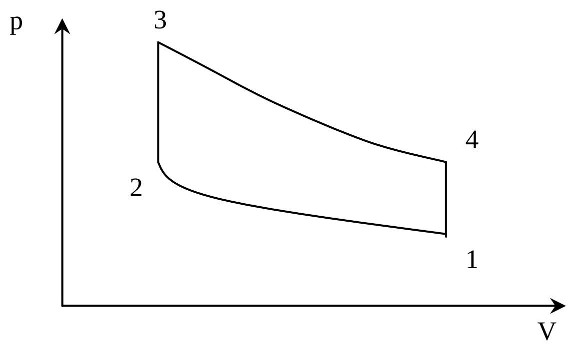
-	cilindrata	$V_c = 10.000\ cm^3$
-	rapporto di compressione volumetrico	$r = 8$
-	numero di giri	$n = 3000$ rpm
-	rapporto aria/combustibile	$\alpha = 15$

1) Si calcolino, nel caso ideale, il rendimento termico, la potenza ed il consumo specifico al suolo.
2) Si calcolino, nel caso reale, la potenza, la pressione media indicata, la pressione media effettiva ed il consumo specifico al suolo.
3) Si calcolino, nel caso reale, la potenza ed il consumo specifico alla quota di 5.000 m.
4) Si ammetta di sovralimentare il motore con un compressore comandato meccanicamente e si calcoli la potenza effettiva ed il consumo specifico nei seguenti casi:

- a) alla quota di ristabilimento di 5.000 m;
- b) alla quota di adattamento di 5000 m, assumendo una pressione di sovralimentazione pari a 150 kPa;

5) Si determini la potenza, il consumo specifico e l'entità dello strozzamento da effettuare quando il motore si trovi ad una quota (z=1500 m) inferiore alla quota di adattamento precedente (z=5000 m).

1. Caso ideale



Rendimento termico ideale:

$$\eta_{ti} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} = 0.56 \qquad (K = 1.4)$$

Lavoro ideale:

$$L_i = \eta_{t_i} \cdot Q_e = \eta_{t_i} \cdot \frac{H_i}{\alpha + 1} = 1465 \text{kJ/kg} \qquad \left(H_i = 41860\, kJ/kg\right)$$

Potenza ideale:

$$P_i = \rho_1 \cdot V_c \cdot L_i \cdot \frac{n}{2 \cdot 60} = 1.16 \cdot 10^{-2} \cdot 1465 \cdot \frac{3000}{2 \cdot 60} = 424.8 \text{kW}$$

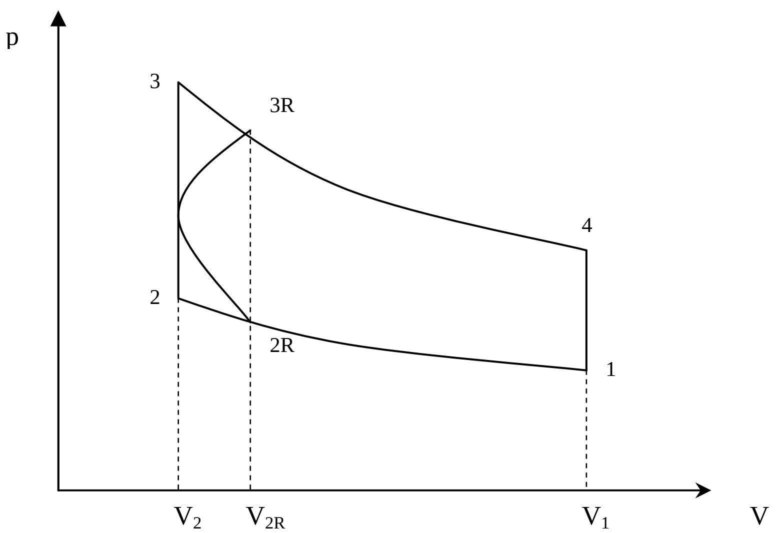
dove:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} = \frac{10^5}{287 \cdot 300} = 1.16 \text{kg/m}^3$$

Consumo specifico:

$$q_i = \frac{\dot{m}_c}{P_i} = \frac{m_c / t}{P_i} = \frac{\dfrac{\rho_1 \cdot V_c / (\alpha + 1)}{(2 \cdot 60)/n}}{P_i} \cdot 3600 \cdot 10^3 = \frac{65250\, g/h}{424.8 \text{kW}} = 153.6 \frac{g/h}{kW}$$

2. Caso reale al suolo



Per lo svolgimento dei calcoli, si adottano le seguenti ipotesi:

- le condizioni del punto 1 coincidono con le condizioni ambiente;
- durante il raffreddamento venga sottratto il 30% del calore introdotto dal combustibile;

- la combustione inizi con un anticipo rispetto al PMS (punto morto superiore) tale per cui la corrispondente frazione di corsa sia $x = 0.2$;
- nel piano $p - V$ la pressione durante la fase di combustione abbia un andamento parabolico, distribuito in modo simmetrico rispetto al PMS;
- si ammetta un rendimento volumetrico λ_v unitario;
- si trascuri la variazione di rendimento organico con la quota;

P.to 1

$$p_1 = p_{ext} = 100\text{kPa}$$

$$T_1 = T_{ext} = 300\text{K}$$

$$V_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{10^5} = 0.861\text{m}^3/\text{kg}$$

P.to 2

$$V_2 = \frac{V_1}{r} = \frac{0.861}{8} = 0.108\text{m}^3/\text{kg}$$

P.to 2R

$$x = \frac{V_{2R} - V_2}{V_1 - V_2} \Rightarrow V_{2R} = V_2 + x \cdot (V_1 - V_2) = 0.258\text{m}^3/\text{kg}$$

$$p_{2R} = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_{2R}}\right)^K = 540.4\text{kPa}$$

$$T_{2R} = \frac{p_{2R} \cdot V_{2R}}{R} = 485.8\text{K}$$

P.to 3R

Dal 1° principio della termodinamica si ha: $Q_{introdotto} = \Delta U + L_{comb}$ dove:

$$Q_{introdotto} = Q_e - q_{sc} = Q_e - 0.3 \times Q_e = 0.7 \times Q_e = 0.7 \times \frac{H_i}{\alpha + 1} \cong 1831.4 \, kJ/kg$$

- $H_i = 41860 \, kJ/kg$
- $q_{sc} =$ calore asportato per raffreddamento

$$\Delta U = C_v \left(T_{3R} - T_{2R}\right)$$

$$L_{comb} = \frac{2}{3}\left(V_{2R} - V_2\right)\left(p_{3R} - p_{2R}\right) \qquad \left(p_{3R} = \frac{RT_{3R}}{V_{3R}};V_{3R} = V_{2R}\right)$$

per cui, sostituendo, si ottiene:

$$T_{3R} = \left(\frac{T_{2R} + Q/C_v + 2/3C_v \cdot \left(V_{2R} - V_2\right)\cdot p_{2R}}{1 + 2R/3C_v V_{2R} \cdot \left(V_{2R} - V_2\right)}\right) = 2697K \qquad \left(C_v \cong 717\, J/kgK\right)$$

$$p_{3R} = \frac{RT_{3R}}{V_{3R}} = \frac{287 \times 2697}{0.258} \cong 3000kPa$$

P.to 4

$$V_4 = V_1 = 0.861\, m^3/kg$$

$$p_4 = p_{3R}\left(\frac{V_{3R}}{V_4}\right)^K \cong 555.143kPa$$

$$T_4 = \frac{p_4 V_4}{R} \cong 1665.4K$$

Lavoro reale

$$L_R = Q_{\text{int}rodotto} - Q_{sottratto}$$

$$Q_{\text{int}rodotto} = Q_e - q_{sc} = 1831.4\, kJ/kg$$

$$Q_{sottratto} = C_v\left(T_4 - T_1\right) = 717\left(1665.4 - 300\right) \cong 979\, kJ/kg$$

$$L_R = 852.4\, kJ/kg$$

Rendimento reale

$$\eta_{R_0} = \frac{L_R}{L_i} = \frac{852.4}{1465} \cong 0.58$$

Potenza reale

$$P_{R_0} = P_i \times \eta_R \times \eta_0 \times \lambda_v = 424.8 \times 0.58 \times 0.85 \times 1 \cong 209.4kW$$

Pressione media indicata

$$p_{mi_0} = \lambda_v \times \rho_1 \times \eta_{ti} \times \eta_R \times \frac{H_i}{\alpha+1} = 1 \times 1.16 \times 0.56 \times 0.58 \times \frac{41860}{16} \cong 985.7 kPa$$

Pressione media effettiva

$$p_{me_0} = p_{mi} \times \eta_0 = 985.7 \times 0.85 \cong 837.8 kPa$$

Consumo specifico

$$q_{r_0} = \frac{\dot{m}_c}{P_{r_0}} = \frac{m_c / t}{P_{r_0}} = \left[\frac{\rho_1 \cdot V_c / (\alpha+1)}{(2 \cdot 60)/n} \cdot 3600 \cdot 10^3 \right] / P_{r_0} = \frac{65250 \, g/h}{209.4 kW} = 311.6 \frac{g/h}{kW}$$

3. Caso reale a quota 5000 m

La potenza, salendo di quota, diminuisce sostanzialmente per le variazioni di:

- Densità;
- Rendimento volumetrico;
- Rendimento organico.

Concretamente, si può introdurre un parametro ψ che permette di calcolare la variazione della potenza con la quota:

$$\psi = \frac{p_z}{p_0} \times \frac{T_0 + 256}{T_z + 256} \cong 0.6$$

$p_z = 54 kPa$; $T_z = 255 K$; $\rho_z = 0.74 kg/m^3$;

$p_0 = 100 kPa$; $T_0 = 300 K$; $\rho_0 = 1.16 kg/m^3$

$$P_{R_z} = \psi \times P_{R_0} = 0.6 \times 209.4 = 125.6 kW$$

Consumo specifico

$$(q_R)_z = \frac{\dot{m}_c}{P_{R_z}} = \frac{m_c / t}{P_{R_z}} = \left[\frac{\rho_z \cdot V_c / (\alpha+1)}{(2 \cdot 60)/n} \cdot 3600 \cdot 10^3 \right] / P_{r_z} = \frac{41625 \, g/h}{125.4 kW} = 331.9 \frac{g/h}{kW}$$

4. Caso sovralimentato

- **a)** Si ricorda che la "*quota di ristabilimento*" è quella quota alla quale il compressore meccanico è in grado di *ristabilire* la pressione di alimentazione che si aveva al suolo, cioè $p_c = p_0 = 100kP_a$.

La temperatura di uscita dal compressore T_c va invece calcolata:

$$T_{c_i} = T_z \left(\frac{p_c}{p_z}\right)^{\frac{K-1}{K}} = 255\left(\frac{100}{54}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 304K$$

$$T_c = T_z + \frac{T_{c_i} - T_z}{\eta_{ac}} = 255 + \frac{304-255}{0.85} = 312.6K$$

La potenza alla quota di ristabilimento di 5000m, con compressore comandato meccanicamente, vale:

$$P_{R_{c_z}} = P_{i_{c_z}} - P_{w_{c_z}} - P_{c_z}$$

dove:

- ***Potenza indicata con compressore a quota z:***

$$P_{i_{c_z}} = \left[pmi_0 \cdot \mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z + \beta \cdot \left(p_c - p_z\right)\right] \cdot V_c \cdot \frac{n}{2 \cdot 60}$$

$$pmi_0 = 985.7kPa \qquad \text{(già calcolata)}$$

$$\mu_c = \frac{p_c}{p_0} \times \frac{T_0 + 256}{T_c + 256} = 0.98$$

$$\left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z = 1$$

$$\beta\left(p_c - p_z\right) = 0.8 \times (100-54) = 36.8kPa$$

si ottiene:

$$P_{ic_z} = (985.7 \times 0.98 + 36.8) \cdot 10^{-2} \cdot \frac{3000}{2 \times 60} = 250.7kW$$

- ***Potenza perduta per attriti a quota z:***

$$P_{wc_z} = a \cdot P_{w_0} + \mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v} \right)_z \cdot (1-a) \cdot P_{w_0}$$

$$a \cdot P_{w_0} = a \cdot P_{R_0} \cdot \left(\frac{1}{\eta_0} - 1 \right) = 0.65 \times 209.4 \times \left(\frac{1}{0.85} - 1 \right) = 24kW$$

$$\mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v} \right)_z \cdot (1-a) \cdot P_{w_0} = 0.98 \times (1 - 0.65) \times 209.4 \times \left(\frac{1}{0.85} - 1 \right) = 12.67kW$$

si ottiene:

$$P_{wc_z} = 24 + 12.67 = 36.67kW$$

- ***Potenza assorbita dal compressore a quota z:***

$$P_{comp_z} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_c - T_z)$$

$$\dot{m} = \frac{\lambda_{vc_z} \cdot \rho_c \cdot V_c}{2 \cdot \frac{60}{n}} = \frac{1 \times \frac{10^5}{287 \cdot 312.6} \times 10^{-2}}{\frac{120}{3000}} = 0.28 \, {kg}/{s}$$

$$C_p \cdot (T_c - T_z) = 1.0045 \times (312.6 - 255) = 57.86 \, {kJ}/{kg}$$

si ottiene:

$$P_{comp_z} = 0.28 \times 57.86 = 16.2kW$$

In conclusione la potenza alla *quota di ristabilimento* vale:

$$P_{R_{c_z}} = P_{i_{c_z}} - P_{w_{c_z}} - P_{c_z} = 250.7 - 36.67 - 16.2 = 197.83kW$$

<u>Consumo specifico</u>

$$(\dot{m}_c)_{Rist} = (\dot{m}_c)_z \cdot \frac{\rho_{Rist}}{\rho_z} = 41625 \cdot \frac{1.114}{0.74} = 62662.5 g/h$$

$$(q_{R_c})_{Rist} = \frac{62662.5}{197.83} = 316.75 \frac{g/h}{kW}$$

- **b)** Si ricorda che la *"quota di adattamento"* è quella quota alla quale il compressore genera una pressione di alimentazione prestabilita, che nel caso in esame è pari a 150kPa.

La temperatura dell'aria in uscita dal compressore vale:

$$T_{c_i} = T_z \cdot \left(\frac{p_c}{p_z}\right)^{\frac{K}{K-1}} = 255 \cdot \left(\frac{150}{54}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 341.4K$$

$$T_c = T_z + \frac{T_{c_i} - T_z}{\eta_{ac}} = 255 + \frac{341.4 - 255}{0.85} = 356.7K$$

La potenza con compressore, alla quota di adattamento, vale al solito:

$$P_{R_{c_z}} = P_{i_{c_z}} - P_{w_{c_z}} - P_{c_z}$$

dove:

- ***Potenza indicata con compressore a quota z:***

$$P_{i_{c_z}} = \left[pmi_0 \cdot \mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z + \beta \cdot \left(p_c - p_z \right) \right] \cdot V_c \cdot \frac{n}{2 \cdot 60}$$

$pmi_0 = 985.7kPa$ (già calcolata)

$$\mu_c = \frac{p_c}{p_0} \times \frac{T_0 + 256}{T_c + 256} = 1.25$$

$$\left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z = 1$$

$$\beta\left(p_c - p_z \right) = 0.8 \times (150 - 54) = 76.8kPa$$

si ottiene:

$$P_{ic_z} = (985.7 \times 1.25 + 76.8) \cdot 10^{-2} \cdot \frac{3000}{2 \times 60} = 327.23kW$$

- ***Potenza perduta per attriti a quota z:***

$$P_{wc_z} = a \cdot P_{w_0} + \mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z \cdot (1 - a) \cdot P_{w_0}$$

$$a \cdot P_{w_0} = a \cdot P_{R_0} \cdot \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right) = 0.65 \times 209.4 \times \left(\frac{1}{0.85} - 1\right) = 24kW$$

$$\mu_c \cdot \left(\frac{\lambda_{vc}}{\lambda_v}\right)_z \cdot (1-a) \cdot P_{w_0} = 1.25 \times (1-0.65) \times 209.4 \times \left(\frac{1}{0.85} - 1\right) = 16.17kW$$

si ottiene:

$$P_{wc_z} = 24 + 16.17 = 40.17kW$$

- ***Potenza assorbita dal compressore a quota z:***

$$P_{comp_z} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_c - T_z)$$

$$\dot{m} = \frac{\lambda_{vc_z} \cdot \rho_c \cdot V_c}{2 \cdot \frac{60}{n}} = \frac{1 \times \frac{1.5 \times 10^5}{287 \cdot 356.7} \times 10^{-2}}{\frac{120}{3000}} = 0.366 \, kg/s$$

$$C_p \cdot (T_c - T_z) = 1.0045 \times (356.7 - 255) = 102.16 \, kJ/kg$$

si ottiene:

$$P_{comp_z} = 0.366 \times 102.16 = 37.4kW$$

In conclusione la potenza alla *quota di adattamento* vale:

$$P_{R_{c_z}} = P_{i_{c_z}} - P_{w_{c_z}} - P_{c_z} = 327.2 - 40.17 - 37.4 = 249.63kW$$

5. Caso con strozzamento

A quote inferiori alla quota di adattamento, per evitare sovrasollecitazioni al motore, si opera il cosiddetto *strozzamento* a monte del compressore, in modo che la pressione di alimentazione non superi mai quella di progetto (nel presente caso 150 kPa).

Per il calcolo si può procedere nel seguente modo:

- Condizioni a monte della valvola di strozzamento:

$z = 1550m$; $T_z = 278.4K$; $p_z = 84.56kPa$; $\rho_z = 1.058kg/m^3$

- Condizioni a valle della valvola di strozzamento:

Viene formulata l'ipotesi che, trattandosi di compressore accoppiato rigidamente al motore, a numero di giri costante il lavoro di compressione rimanga costante; inoltre si suppone che la trasformazione nella valvola a farfalla sia isoterma (*laminazione*), pertanto:

$$\left(L_c\right)_{z=5000} = \left(L_c\right)_{z=1500}$$

$$C_p \cdot \left(356.7 - 255\right) = C_p \cdot \left(T_{c_x} - 278.4\right)$$

$T_{c_x} = 380K$ Temperatura a valle del compressore

$$T_{c_{ix}} = 278.4 + \eta_{ac} \cdot \left(380 - 278.4\right) = 364.8K$$

$p_{str} = 150 \cdot \left(\frac{278.4}{364.8}\right)^{\frac{K}{K-1}} = 58.2kPa$ Pressione a valle della strozzatura

Procedendo in modo analogo al caso precedente, si può calcolare la potenza effettiva del motore con compressore alla quota di 1500 m:

$$P_{R_{c_z}} = P_{i_{c_z}} - P_{w_{c_z}} - P_{c_z} = 308.8 - 39.48 - 35.08 = 234.24kW$$