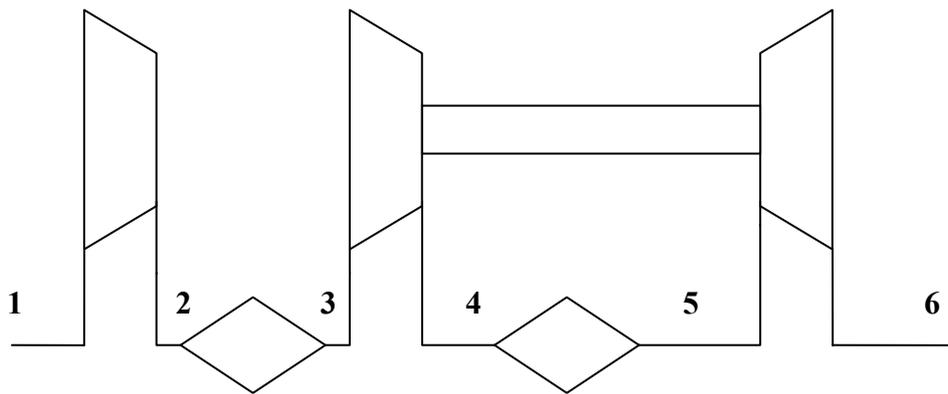
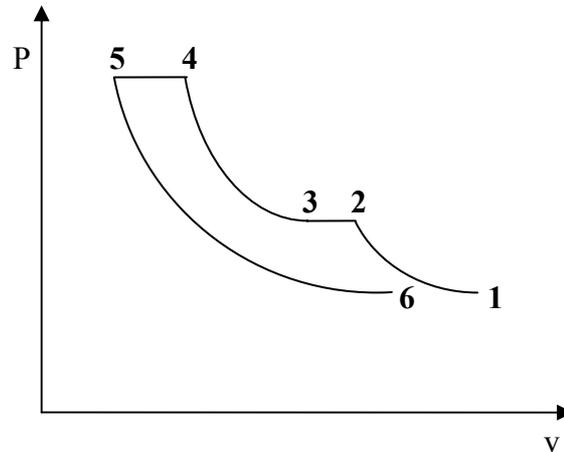


Esercitazione 9

Il ciclo bootstrap consiste in una prima compressione adiabatica compiuta dal compressore del motore del velivolo, seguita da uno scambio termico (supposto isobaro) compiuto da uno scambiatore di calore e quindi da un'altra compressione isoentropica eseguita da un secondo scambiatore di calore. Infine si ha una espansione isoentropica in una turbina che fornisce il lavoro necessario al compressore dell'impianto. Riassumiamo schematicamente l'impianto qui sotto e il ciclo ad esso associato nel piano P-v.



Impianto di condizionamento a ciclo bootstrap



Piano P-v del ciclo Bootstrap dell'impianto

- **Velivolo fermo a quota zero**

Passiamo quindi al calcolo di tutti i punti del ciclo assumendo che questo sia ideale. Innanzitutto possiamo ricavare la pressione massima come

$$(9.1) \quad P_4 = P_5 = P_1 \beta$$

e otteniamo un valore pari a $P_4 = 1520398$ Pa.
 Sappiamo anche che $P_6 = P_1 = 101359,9$ Pa.

Ricaviamo quindi la temperatura nel punto 5 come

$$(9.2) \quad T_5 = T_6 \left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

e otteniamo $T_5 = 602,98 \text{ K}$.

Indicando con il L il lavoro possiamo dire che

$$(9.3) \quad L_{34} = L_{56} \Rightarrow T_4 - T_3 = T_5 - T_6$$

Da cui ricaviamo immediatamente $T_4 = 674,98 \text{ K}$.

Grazia alle adiabatiche possiamo inoltre determinare

$$(9.4) \quad P_3 = P_4 \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

e

$$(9.5) \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

ottenendo $P_2 = P_3 = 152869,8 \text{ Pa}$ $T_2 = 363,4055 \text{ K}$.

Ci rimangono quindi da calcolare i volumi specifici, che ricaviamo grazie all'equazione dei gas perfetti come

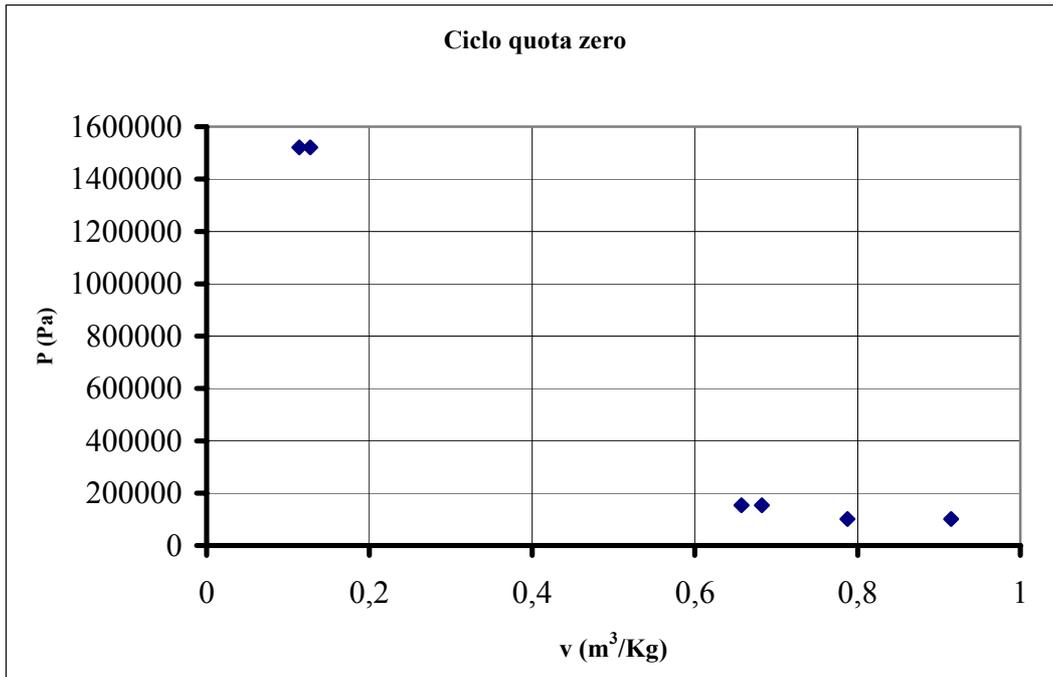
$$(9.6) \quad v = \frac{RT}{P}$$

ottenendo $v_1 = 0,914998 \text{ m}^3/\text{Kg}$, $v_2 = 0,682263 \text{ m}^3/\text{Kg}$, $v_3 = 0,657377 \text{ m}^3/\text{Kg}$, $v_4 = 0,127414 \text{ m}^3/\text{Kg}$,
 $v_5 = 0,113823 \text{ m}^3/\text{Kg}$, $v_6 = 0,78758 \text{ m}^3/\text{Kg}$

Riassumendo abbiamo ottenuto i seguenti punti

Punto	v [m ³ /Kg]	P [Pa]	T [K]
1	0,914998	101359,9	323,15
2	0,682263	152869,8	363,4055
3	0,657377	152869,8	350,15
4	0,127414	1520398	674,983
5	0,113823	1520398	602,9831
6	0,78758	101359,9	278,15

Rappresentandoli graficamente otteniamo conferma di quanto disegnato in precedenza



A questo punto ipotizziamo che le efficienze ε_a e ε_b degli scambiatori rimangano invariate e quindi le possiamo ricavare dal caso di quota zero nel modo seguente

$$(9.7) \quad \varepsilon_a = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_1}$$

$$\varepsilon_b = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_1}$$

ottenendo $\varepsilon_a = 0,329284$ e $\varepsilon_b = 0,204642$

- **Velivolo in volo alla quota di 8000m con velocità di 480 kts**

Date le nuove condizioni di esercizio possiamo ricavarci innanzitutto il numero di Mach di volo del velivolo come

$$(9.8) \quad M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\gamma R T_{8000}}}$$

ottenendo dai dati fornitici $M = 0,801632$.

Possiamo quindi ricavare dalle formule del moto comprimibile isoentropico

$$(9.9) \quad T_1 = T_{8000} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)$$

$$P_1 = P_{8000} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

ottenendo $P_1 = 54316,4 \text{ Pa}$ $T_1 = 266,5006 \text{ K}$.

Supponendo che il rapporto di compressione del punto 1-2 del caso precedente rimanga inalterato possiamo scrivere

$$(9.10) \quad P_2 = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right) P_1$$

e otteniamo $P_2 = P_3 = 81919,36$ Pa. Proseguendo come fatto prima abbiamo dalla (9.5) che $T_2 = 299,6992$ K.

Dalle efficienze prima calcolate, supponendole invariate, e dallo scambio di lavoro tra compressore e turbina, essendo nota T_6 , scriviamo

$$(9.11) \quad \begin{aligned} T_3 &= -\varepsilon_a (T_2 - T_1) + T_2 \\ T_4 &= \frac{(T_3 - T_6)}{\varepsilon_b} + T_1 \\ T_5 &= T_4 - T_3 + T_6 \\ P_4 &= P_5 = P_6 \left(\frac{T_5}{T_6} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{aligned}$$

ricavando $T_3 = 288,7674$ K, $T_4 = 333,0432$ K, $T_5 = 319,4258$ K, $P_4 = P_5 = 133920,2$ Pa.

Come prima dalla (9.6) ricaviamo i volumi specifici ottenendo $v_1 = 1,408151$ m³/Kg, $v_2 = 1,04998$ m³/Kg, $v_3 = 0,1011681$ m³/Kg, $v_4 = 0,713734$ m³/Kg, $v_5 = 0,684551$ m³/Kg, $v_6 = 0,994047$ m³/Kg

Riassumendo in tabella i valori ottenuti e rappresentando il tutto graficamente otteniamo

Punto	v [m ³ /Kg]	P [Pa]	T [K]
1	1,408151	54316,4	266,5006
2	1,04998	81919,36	299,6992
3	1,011681	81919,36	288,7674
4	0,713734	133920,2	333,0432
5	0,684551	133920,2	319,4258
6	0,994047	79441	275,15

