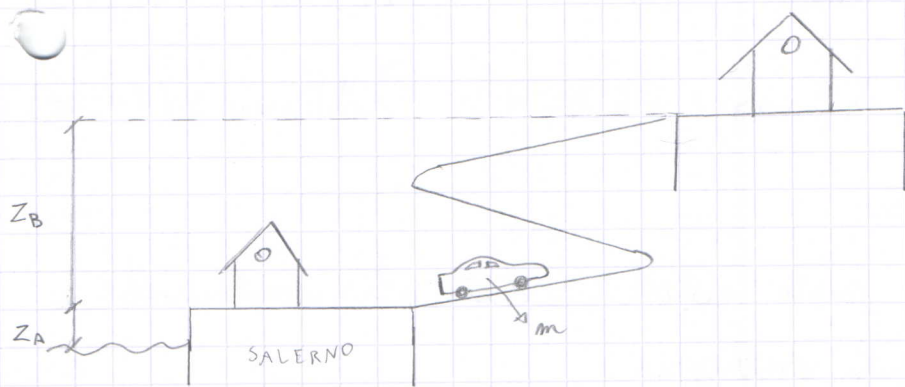


• ESERCIZIO A



$$T = 10^{\circ}\text{C}$$

$$Z_A = 10\text{ m}$$

$$Z_B = 400\text{ m}$$

$$V_b = 3\text{ l} \quad \rho_b = 720\text{ kg/m}^3$$

$$m = 800\text{ kg}$$

$$H_i = 10500\text{ Kcal/kg}$$

1) Variazione energia meccanica $\Delta E_m = \Delta E_p + \Delta E_c$

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) = 0 \text{ per tutti e 3 i casi}$$

Invece per la variazione di energia potenziale dobbiamo stabilire di volta in volta Z_{finale} e Z_{iniziale} :

$$\Delta E_p = m g (z_f - z_i) \text{ nel primo caso } \downarrow$$

$$\Delta E_{p1} = m g (10 - 400) = -3060,7\text{ KJ}$$

decrea l'energia potenziale dell'auto

$$2) \Delta E_{p2} = m g (10 - 10) = 0$$

$$3) \Delta E_{p3} = m g (400 - 10) = 3060,7\text{ KJ}$$

Vi è però un'altra forma di energia, quella chimica: è uscente dal sistema auto (indipendente da quanto l'auto ne sfrutti)

$$\Delta E_{ch} = - m_b H_i = - \rho_b V_b H_i = - 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,003 \text{ m}^3 \cdot 10500 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$$

$$= - 4,18 \cdot 22680\text{ KJ} = - 94802\text{ KJ}$$

È la stessa per tutti e 3 i sistemi. Si è tenuto conto delle conversioni $1\text{ l} = 0,001\text{ m}^3$ e $1\text{ Kcal} = 4,18\text{ KJ}$

Valutiamo l'energia del sistema termodinamico (l'auto):

$$1) \Delta E_{ST} = \Delta E_m + \Delta E_{ch} = -94863\text{ KJ} \quad 2) \Delta E_{ST} = -94802\text{ KJ} \quad 3) -91741\text{ KJ}$$

L'energia totale del sistema isolato si conserva:

$$\Delta E_{SI} = 0 \rightarrow \Delta E_{AMB} + \Delta E_{ST} = 0 \rightarrow \Delta E_{AMB} = -\Delta E_{ST}$$

$$1) \Delta E_{AMB} = 97863 \text{ kJ} \quad 2) \Delta E_{AMB} = 94802 \text{ kJ} \quad 3) \Delta E_{AMB} = 91741 \text{ kJ}$$

Variazione Entropia

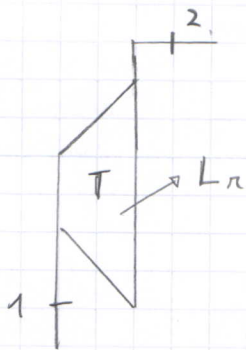
Ovviamente tale energia sarà colata ceduto all'ambiente e pertanto la variazione di entropia:

$$1) \Delta S_{AMB} = \frac{\Delta E_{AMB}}{T} = \frac{97863}{10273,15} = 345,6 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad 2) \Delta S_{AMB} = 334,8 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

$$3) \Delta S_{AMB} = 324,0 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

ESERCIZIO B

Una macchina dinamica motrice può essere ad esempio una turbina:



Trasformazione: Adiabatica ($\kappa = 1,40$)

$$T_1 = 1000 \text{ K} \quad p_1 = 8 \text{ bar}$$

$$T_2 = 400 \text{ K} \quad p_2 = 1,5 \text{ bar}$$

Sostanza: Ozio $M_w = 28,02 \text{ g/mol}$ N_2

Lo tratteremo come gas ideale, calcoliamo alcune grandezze:

$$R_{N_2} = \frac{\tilde{R}}{M_w} = \frac{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}}{28,02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 297 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad \text{costante del gas ozio}$$

$$\frac{R}{c_p} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \rightarrow c_p = \frac{R \cdot \kappa}{\kappa - 1} = 1039 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} = 1,039 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

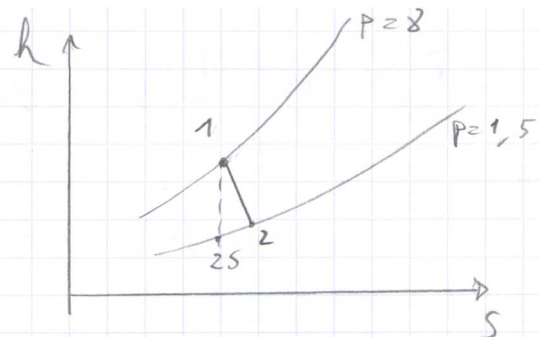
$$l_r = -(h_2 - h_1) = -c_p (T_2 - T_1) = 311,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Calcoliamo la T_{2s} che avremmo dovuto avere nel caso ideale (max)

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 619,9 \text{ K} \quad (\text{ovviamente più bassa})$$

$$L_{10} = -c_p (T_{2s} - T_1) = 311,9 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{ad} = \frac{L_r}{L_{10}} = 0,789$$



$$\eta_{pol} = \frac{k}{k-1} \frac{m-1}{m} = 0,746$$

anché

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow m = 1,271$$

$$\eta_{pol} = \frac{L_r}{L_{pol}} \rightarrow L_{pol} = 417,8 \text{ kJ/kg}$$

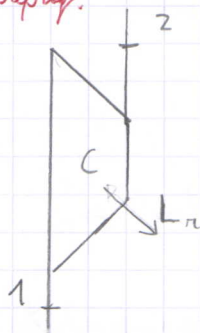
In alternativa $L_{pol} = \frac{m}{m-1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} \right] = 418$

Inoltre sappiamo che

$$L_r = L_p + L_a \rightarrow L_a = 418 - 311,9 = 106,3 \text{ kJ/kg}$$

ESERCIZIO C

① No interrefr.



TRASF. adiabatica $\rightarrow k=1,4$

$$P_1 = 1 \text{ bar } T_1 = 300 \text{ K}$$

$$P_2 = 16 \text{ bar } \dot{m} = 10 \text{ kg/s}$$

Potremmo calcolare T_{2s} da $\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

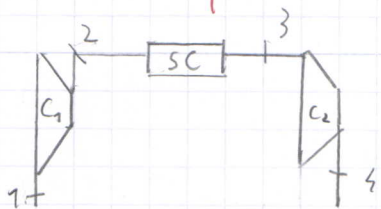
Ma calcoliamo direttamente il lavoro (c_p e \tilde{R} uguali a prima)

$$\begin{aligned} L_{10} &= -\Delta h = -(h_2 - h_1) = -c_p (T_2 - T_1) = -c_p T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \\ &= -c_p T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = -1039 \cdot 300 \cdot \left(16^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = -376,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

N.B. Il professore invece di fare come facciamo a Termodinamica prende come verso di riferimento sempre il lavoro uscente poi se esce negativo (come in questo caso) significa che era entrante (macchina operatrice)

$$P_{ID} = \dot{m} \cdot L_{ID} = -3466 \text{ KW}$$

② Con interrefr.



Dallo stato 1 a 2 si usa il rapporto di compressione β_1 e da 3 a 4 β_2

Quello ottimale è $\beta_1 = \beta_2 = \sqrt{\beta} = 4$

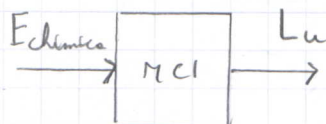
$$L_{ID_{12}} = -c_p T_1 \left[\beta_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = 151,5 \text{ KJ/Kg}$$

$$L_{ID_{14}} = L_{ID_{12}} + L_{ID_{34}} = 2 L_{ID_{12}} = 303 \text{ KJ/Kg}$$

$$P_{ID} = 3030 \text{ KW}$$

si risparmiano 736 KW

ESERCIZIO D



Dati: $L_u = 1100 \text{ KJ}$ per ciclo

ricorda unità di misura

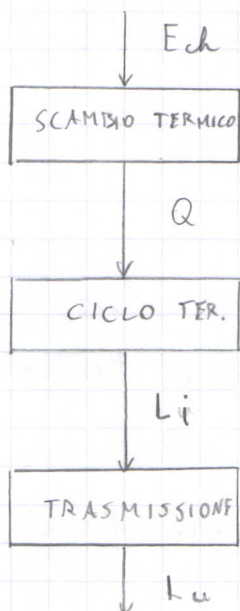
$$\eta_G = \frac{L_u}{E_{ch}} = 0,25$$

$m_c = 100 \text{ g per ciclo}$
 $H_i = 44 \text{ MJ/kg}$
 $\eta_b = 0,92$
 $\eta_m = 0,88$

Calcoliamo gli altri rendimenti quindi possiamo calcolare η_r

$$\eta_G = \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_r \rightarrow \eta_r = 0,308 \quad \text{rendimento del ciclo}$$

Ricordando che:



$$\eta_b = \frac{Q}{m_c H_i}$$

$$\eta_r = \frac{L_i}{Q}$$

$$\eta_m = \frac{L_u}{L_i}$$

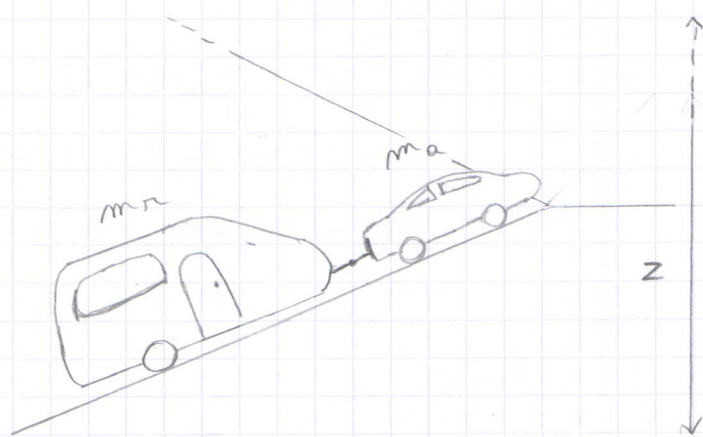
$$\eta_r = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$Q_2 = Q_{OUT} = (1 - \eta_r) Q_1$$

$$= 2801 \text{ KJ}$$

$$Q_1 = 4048 \text{ KJ}$$

ESERCIZIO E



$$m_a = 1500 \text{ kg}$$

$$m_r = 1000 \text{ kg}$$

$$z = 1000 \text{ m}$$

$$H_c = 44000 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_g = 0,25$$

$$C = 200 \text{ Wh/kg}$$

In assenza di perdite il lavoro utile deve essere pari almeno all'energia necessaria ad innalzare la quota fino a z .

$$L_u = \Delta E_p = (m_a + m_r) g z = 24,5 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\eta_g = \frac{L_u}{m_c H_c} \rightarrow m_c = 2,23 \text{ kg}$$

Ricordando che la densità della benzina è $\rho_c = 750 \text{ kg/m}^3$

$$m_c = \rho_c V_c \rightarrow V_c = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = \underline{\underline{2,97 \text{ l}}}$$

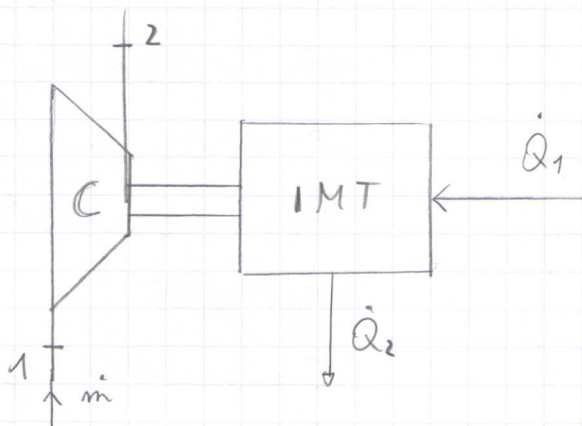
Per le batterie si ricorda che: $W = \frac{\text{J}}{\text{s}} \rightarrow Wh = \frac{\text{J}}{\text{s}} h = \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s}$

$$L_{\text{batt}} = 200 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} = 200 \cdot 3600 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 720 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 720 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Ora l'energia in ingresso al sistema, costituito dal lavoro delle batterie deve essere pari a L_u (che è uguale a ΔE_p)

$$L_u = m_b \cdot L_b \rightarrow m_b = 34,03 \text{ kg}$$

ESERCIZIO F



COMPRESS.

$$\beta = 11 \quad \eta_{ad} = 0,88$$

$$\dot{m} = 4000 \text{ kg/h} = 1,11 \text{ kg/s}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} \rightarrow p_2 = p_1 \beta = 11 \text{ bar}$$

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

IMT.

$$T_{m,a} = 870 \text{ K} \quad T_{m,s} = 440 \text{ K}$$

SOSTANZA: METANO

$$H_i = 35,7 \text{ MJ/m}^3$$

$$k = 1,31$$

$$p = 1 \text{ bar} \quad T = 0^\circ \text{C}$$

$$\eta_{IMT} = \frac{\dot{L}_i}{\dot{Q}_1} = \frac{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 1 - \frac{T_{m,s} \Delta \dot{S}}{T_{m,a} \Delta \dot{S}}$$

$$= 0,494$$

Calcoliamo la T ideale di fine compressione:

$$T_{2s} = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 529,1 \text{ K}$$

$$\eta_{ad} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_p (T_{2s} - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)} \rightarrow T_2 = 560,3 \text{ K}$$

$$P_c = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) = 632 \text{ kW}$$

$$R = \frac{\tilde{R}}{M_w} = \frac{8,31}{16,04 \cdot 10^{-3}} = 518 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$c_p = \frac{R k}{k-1} = 2189 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

NB

Il prof usa come M_w 16,04 ma si ricorda che il metano è CH_4 e che $C \approx 12 \text{ g/mol}$ e $H \approx 1 \text{ g/mol}$

$$M_w(\text{CH}_4) = 12 + 1 \cdot 4 = 16$$

Se si assumono nulle le perdite nella trasmissione:

$$P_c = P_{IMT} \quad \text{Inoltre si assume } \eta_{r,IMT} = \eta_g \downarrow$$

$$\eta_f = 0,595 = \frac{P_{IMT}}{\dot{Q}_1} = \frac{P_{IMT}}{V_c H_i} = \frac{P_{IMT}}{\frac{\dot{m}_c}{\rho_c} H_i}$$

$$\dot{Q}_1 = P_{IMT} / \eta_f = 632 / 0,595 = 1062 \text{ kW}$$

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

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_1 \rho_c}{H_i} = 0,258 \text{ kg/s}$$

volume perché H_i è dato in MJ/m^3 non MJ/kg (0 MJ/kg/s)

da legge dei gas perfetti

$$P_f = R T \rightarrow \rho = \frac{P}{R T} = 0,40 \text{ kg/m}^3 \text{ in Pascal}$$

Calcolo dell'esponente m

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow m = 1,352$$

560,3

$$\eta_{pol,c} = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{m}{m-1} = 0,9090$$

51,85 kJ/kg

$$L_{nc} = L_{pol} + L_a \xrightarrow{\text{isol } L_a} L_a = L_{nc} - \eta_{pol} L_{nc} = (1 - \eta_{pol}) C_p (T_2 - T_1)$$

lavoro reale compressore

$C_p (T_2 - T_1)$

$\eta_{pol} = \frac{L_{pol}}{L_{nc}} \rightarrow L_{pol} = \eta_{pol} L_{nc}$

Con studio di interrefr.

$$\beta_1 = \beta_2 = \sqrt[2]{\beta} = \sqrt{11} = 3,317$$

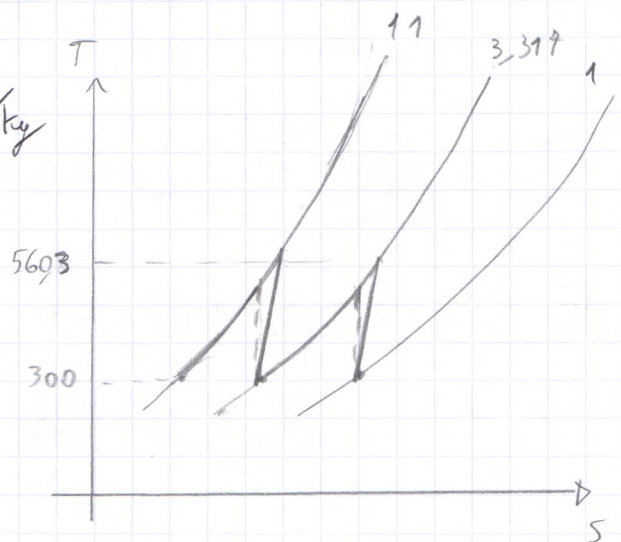
$$L_{c,1} = C_p T_1 (\beta_1^{\frac{m-1}{m}} - 1) = 240,6 \text{ kJ/kg}$$

$$L_c = 2 L_{c,1} = 481,2 \text{ kJ/kg}$$

Prima era $L_{nc} = C_p (T_2 - T_1) = 569,8 \text{ kJ/kg}$

Quindi si è ridotto del:

$$\Delta L\% = \frac{L_c - L_{nc}}{L_{nc}} = -15,6\%$$



Esercizio G



COMPR. $T_1 = 300 \text{ K}$ $p_1 = 1 \text{ bar}$
 $p_2 = 5 \text{ bar}$ $T_2 = 500 \text{ K}$

SOSTANZA. $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ di aria
 $K = 1,4$

N.B. D'ora in poi indicheremo con il piccolo il lavoro specifico.

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \rightarrow T_{2s} = 475 \text{ K}$$

$$P = \dot{m} l_n = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) = 402,4 \text{ kW}$$

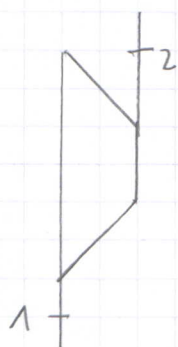
$$R_{\text{air}} = \frac{\tilde{R}}{M_{\text{air}}} = \frac{8,31 \text{ J/mol K}}{28,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 287,5 \text{ J/kg K}$$

$$C_p = \frac{R \cdot K}{K-1} = 1006 \text{ J/kg K}$$

$$\eta_{\text{ad}} = \frac{l_{12}}{l_n} = \frac{c_p (T_{2s} - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)} = 0,875$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow m = 1,465 \rightarrow \eta_{\text{rel}} = \frac{K-1}{K} \frac{m}{m-1} = 0,900$$

Esercizio H



(A) COMPR. $\eta_{\text{rel}} = 0,9$ $\dot{m} = 65 \text{ kg/h} = 0,018 \text{ kg/s}$
 $p_1 = 2,4 \text{ bar}$ $T_1 = 310 \text{ K}$
 $T_2 = 510 \text{ K}$

SOST. aria $K = 1,4$

Da prima (valori pref)
 $C_p \approx 1004,5 \text{ J/kg K}$
 $R \approx 287 //$

$$\eta_{pol} = \frac{k-1}{k} \frac{m}{m-1} \Rightarrow m = 1,565$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow \beta = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{m}{m-1}} = 4,80$$

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow P_2 = P_1 \beta = 11,52 \text{ bar}$$

$$T_{2s} = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 485 \text{ K} \rightarrow \eta_{ad} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = 0,875$$

$$l_r = c_p (T_2 - T_1) = 200,9 \text{ kJ/kg}$$

OSS. $\left[l_{pol} = \frac{mR}{m-1} T_1 \left(\beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) \right]$ o in alternativa, tramite
il rendimento: $l_{pol} = \eta_{pol} l_r$

$$l_r = l_a + l_{pol} \rightarrow l_a = l_r - \eta_{pol} l_r = 20,09 \text{ kJ/kg} = 20,1$$

$$P = l_a \cdot \dot{m} = 3,62 \text{ kW}$$

(B) $\dot{m}' = 2 \cdot \dot{m} = 0,036 \text{ kg/s}$ $\beta' = 4,8 \cdot 2 = 9,6$

$$T_{2s}' = T_1 \beta'^{\frac{k-1}{k}} = 591,6 \text{ K} \rightarrow \eta_{ad}' = \frac{591,6 - 310}{635,5 - 310} = 0,865$$

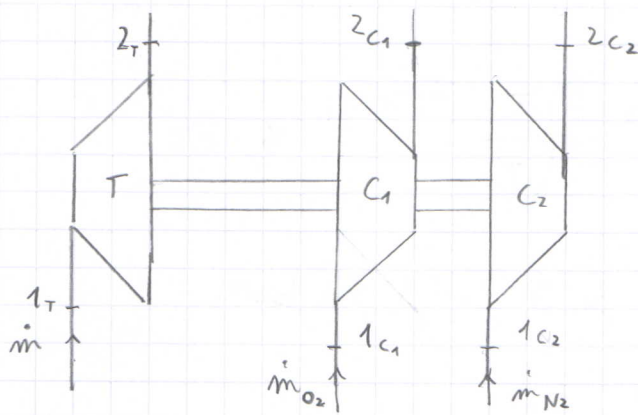
combinare
ora

$$T_2' = T_1 \beta'^{\frac{m-1}{m}} = 635,5 \text{ K}$$

$$P' = l_r \dot{m}' = \dot{m}' c_p (T_2' - T_1) = 11,77 \text{ kW}$$

Aumenta la P richiesta (anche perché aumenta \dot{m}), diminuisce il rendimento adiabatico (a parità di rendimento di compressione politropico). Questo è dovuto all'aumento di β

ESERCIZIO I



- COMP. 1: $P_{1,C1} = 1,0 \text{ bar}$
 $T_{1,C1} = 310 \text{ K}$ $T_{2,C1} = 680 \text{ K}$
 $\beta_{C1} = 9,5$
 $\dot{m}_{O_2} = 5,1 \text{ kg/s}$

- COMP. 2: $P_{1,C2} = 1,0 \text{ bar}$
 $T_{1,C2} = 300 \text{ K}$ $\beta_{C2} = 14$

- TURB. $K = 1,3$ $M_w = 30 \text{ g/mol}$ $T_{1,T} = 1000 \text{ K}$
 $P_{1,T} = 10,2 \text{ bar}$ $P_{2,T} = 1,02 \text{ bar}$ $T_{2,T} = 610 \text{ K}$
 $n = 6300 \text{ giro/min}$ $\alpha_T = 12^\circ$ $R = 0,5$

Per O_2 e N_2 si assume $K = 1,4$ (componenti dell'aria)

POTESI N.B. Quando dice grado di irreversibilit , intende m l'esponente delle politropiche.

Inoltre $\dot{m}_{N_2} = 2 \dot{m}_{O_2}$.

Ricorriamo $m_{C1} = m_{C2} = m_c$ dal primo compressore:

$$T_{2,C1} = T_{1,C1} \beta_{C1}^{\frac{m_{C1}-1}{m_{C1}}} \rightarrow m_{C1} = 1,536 = m_c$$

$$\eta_{Pol,C1} = \eta_{Pol,C2} = \frac{K-1}{K} \frac{m_c}{m_c-1} = 0,819$$

Per calcolare la potenza della turbina, serve la portata che essa elabora, ma non la abbiamo, calcoliamo prima il lavoro specifico della turbina (abbiamo bisogno di C_p)

$$R = \frac{\tilde{R}}{M_w} = 294 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad C_p = \frac{R K}{K-1} = 1200,3$$

$$\text{real } l_{T} = C_p (T_{1,T} - T_{2,T}) = 432,1 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Supponendo nulle le perdite nella trasmissione del moto:

$$P_T = P_{c_1} + P_{c_2} \rightarrow \overset{\text{leveri reali}}{m l_T = \dot{m}_{O_2} l_{c_1} + \dot{m}_{N_2} l_{c_2}}$$

Ho bisogno dei c_p delle due sostanze.

$$R_{O_2} = \frac{\tilde{R}}{M_{W_{O_2}}} = \frac{8,31}{\underset{16 \cdot 2 \text{ atomi}}{32 \cdot 10^{-3}}} = 259,7 \text{ J/kg K} \quad R_{N_2} = \frac{8,31}{28 \cdot 10^{-3}} = 296,8 \text{ J/kg K}$$

$$c_{p_{O_2}} = \frac{R_{O_2} K}{K-1} = 909 \text{ J/kg K} \quad c_{p_{N_2}} = 1039 \text{ J/kg K}$$

Ora calcoliamo i leverii specifici

Reali $l_{c_1} = c_{p_{O_2}} (T_{2,c_1} - T_{1,c_1}) = 336,33 \text{ KJ/kg}$

$$l_{c_2} = c_{p_{N_2}} T_{1,c_2} \left(\beta_{c_2}^{\frac{m_c-1}{m_c}} - 1 \right) = 571,17 \text{ KJ/kg}$$

Dove nel secondo caso si è preferito un'altra formula per non calcolare T_{2,c_2}

$$P_{c_1} + P_{c_2} = \dot{m}_{O_2} l_{c_1} + \dot{m}_{N_2} l_{c_2} = \dot{m}_{O_2} l_{c_1} + 2 \dot{m}_{O_2} l_{c_2} = \dot{m}_{O_2} (l_{c_1} + 2 l_{c_2}) = 6521 \text{ kW}$$

$$P_T = P_{c_1} + P_{c_2} = 6521 \text{ kW}$$

Calcolo portata in turbina:

$$\dot{m} = \frac{P_T}{l_T} = \frac{6521}{432,1} = 15,09 \text{ kg/s}$$

Ora essendo la turbina a Reazione, con $R=0,5$ sappiamo che

Per ogni stadio $l = u^2$ ponendo come $u_{\max} = 400 \text{ m/s} \rightarrow l_{\max} = 160 \text{ KJ/kg}$

Quindi abbiamo bisogno di stadi: $n_s = \frac{l_T}{l_{\max}} = 2,4 \approx 3 \text{ STADI}$

Supponendo di smaltire il salto entalpico egualmente per ogni stadio:

$$\frac{l}{n_s} = \frac{432,1}{3} = 144,03 \text{ KJ/kg} \quad \text{quindi la velocità effettiva } u = \sqrt{144,03 \cdot 10^3} = 379,63 \text{ m/s}$$

N.B. sotto la radice convertiamo

Per calcolare il diametro medio ricordiamo che dai dati sappiamo che $n = 6300 \text{ g/min}$

Vel.
rotor
medio

$$\bar{\omega} = \frac{2\pi n}{60} = 659,73 \text{ rad/s}$$

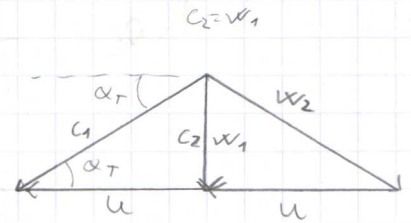
$$u = \bar{\omega} \frac{D_m}{2} \rightarrow D_m = 1,15 \text{ m}$$

Nel caso di turbine a $R = 0,5$ le C_1 e C_2 si calcolano:

$$C_1 = \frac{u}{\cos \alpha_T} = 388,11 \text{ m/s}$$

$$12^\circ : 360 = x : 2\pi \rightarrow x = \frac{12 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{15}$$

$$C_2 = C_1 \sin \alpha_T = 80,69 \text{ m/s}$$

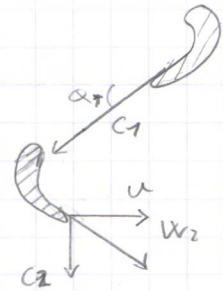


Calcolo sezione di scarico

$$p_{2T} = \frac{P_{2T}}{R T_{2T}} = 0,57 \text{ Kg/m}^3$$

$$R = \frac{\tilde{R}}{M_w} = \frac{8,31}{30 \cdot 10^{-3}} = 277 \text{ J/KgK}$$

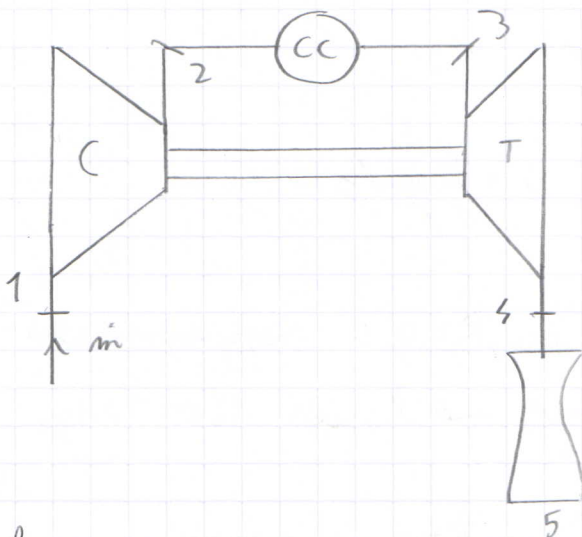
$$\dot{m} = p_{2T} A C_2 \Rightarrow A = 0,33 \text{ m}^2 \approx \pi D_m h \rightarrow h = 0,09 \text{ m}$$



stessa polietilene



ESERCIZIO L



DATI

$$p_1 = 0,95 \text{ bar } T_1 = 310 \text{ K}$$

$$\beta = 8 \rightarrow p_2 = p_1 \cdot \beta = 7,6 \text{ bar}$$

$$T_3 = 1300 \text{ K}$$

$$\dot{m} = 25 \text{ kg/s (orde)} k = 1,4$$

$$\eta_{adC} = \eta_{adT} = 1$$

$$T_{2s} = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 561,55 \text{ K}$$

ideale

$$l_c = c_p (T_{2s} - T_1) = 252,68 \text{ KJ/Kg} \rightarrow P_c = l_c \cdot \dot{m} = 631,7 \text{ kW}$$

$$R = \frac{8,31}{28,9 \cdot 10^{-3}} = 287 \text{ J/KgK} \rightarrow c_p = \frac{R \cdot k}{k-1} = 1004,5 //$$

Indicando perdite nulle nella trasmissione:

$$l_T = l_c \rightarrow T_{25} - T_1 = T_3 - T_{45} \rightarrow T_{45} = 1048 \text{ K}$$

Non reale $P_T = P_c$ perché aggiungendo combustibile la portata cambia. Ora, sapendo che $p_3 = p_2 = 7,7 \text{ bar}$

$$P_{45} = P_3 \cdot \left(\frac{T_{45}}{T_3} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 3,575 \text{ bar}$$

Applicando la conservazione dell'energia

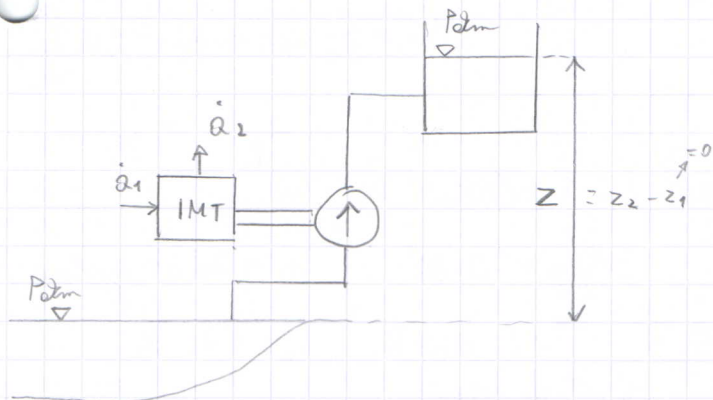
$$h_{45} + \frac{c_{45}^2}{2} = h_5 + \frac{c_5^2}{2} \rightarrow c_5 = \sqrt{2(h_{45} - h_5)} = \sqrt{2c_p(T_{45} - T_5)}$$

$$T_5 = T_{45} \left(\frac{P_5}{P_{45}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 717,66 \text{ K} \quad c_5 = 814,6 \text{ m/s}$$

In fase di rullaggio $v_{rel} = 0$ (e' fermo): Spinta:

$$S_p = \dot{m} (c_5 - 0) \approx 25 \cdot 814,6 = 20,365 \text{ kN}$$

ESERCIZIO M



$$Q = 55 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$z_2 - z_1 = z = 55 \text{ m}$$

$$H_E = 20 \left(\frac{\text{m}}{1000} \right)^2 - \frac{\text{m}}{1000} - \frac{Q}{10}$$

$$H_c = \left(\frac{Q}{10} \right)^2 \quad m = 2500 \text{ g/min}$$

Gasolio

$$H_i = 45000 \text{ kJ/kg} \quad \rho = 750 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{Q}_2/\dot{Q}_1 = 0,725 \quad \eta_b = 0,85 = \eta_m$$

Calcoliamo l'energia occorrente al fluido per passare da 1 a 2.

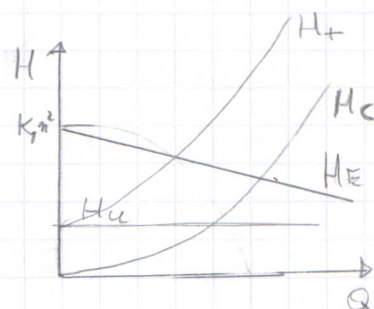
$$H_T = H_u + H_c = (z_2 - z_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + H_c$$

$$H_t = 55 + \left(\frac{45}{10}\right)^2 = 75,25 \left[\frac{m}{h}\right] \rightarrow \text{ma non lo scriviamo}$$

$$H_E = 20 \cdot \left(\frac{2400}{1000}\right)^2 - \left(\frac{2400}{1000}\right)\left(\frac{45}{10}\right) = 104,4 \text{ m}$$

$$\eta_p = \frac{H_t}{H_E} = 0,721$$

del - si capisce
che le perdite sono rivestite indirette
in questo caso



Per calcolare la potenza dobbiamo ricordarci che H è una energia espressa in metri, quindi per convertirla in energia dobbiamo moltiplicarla per ρ per chilogrammo.

$$P = \dot{m} \Delta h = \dot{m} H_t \cdot g = \frac{\rho Q H_t g}{3600} = 12,8 \text{ kW}$$

Per calcolare il rendimento reale dell'IMT: per convertire ora in secondi.

$$\eta_r = \frac{L}{Q_1} = \frac{\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2}{Q_1} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 0,275$$

$$\eta_g = \eta_r \cdot \eta_b \cdot \eta_m = 0,85 \cdot 0,275 \cdot 0,85 = 0,199$$

$$\eta_b = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_c H_i} \rightarrow \text{ma usiamo quella globale che } \dot{Q}_1 \text{ non la hai}$$

$$\eta_g = \frac{P}{\dot{m}_c H_i} = \frac{P}{\rho_c Q_c H_i} \rightarrow Q_c = \frac{12800}{750 \cdot 0,199 \cdot 44000 \cdot 10^3}$$

$$Q_c = 9000000 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1}{5} = 1,02 \frac{l}{h}$$

ESERCIZIO N

$$Z_2 - Z_1 = 55 \text{ m}$$

$$H_i = K_1 \left(\frac{m}{1000}\right)^2 + 2 \left(\frac{m}{1000}\right) Q - Q^2 \quad K_1 = 50$$

$$H_E = H_u + Q^2$$

$$\eta_p = 0,88$$

$$m = 2600 \text{ g/min}$$

$$\beta = 5,3$$

$$\eta_{p,c} = \eta_{p,t}$$

$$T_1 = 310 \text{ K} \quad T_2 = 490 \text{ K}$$

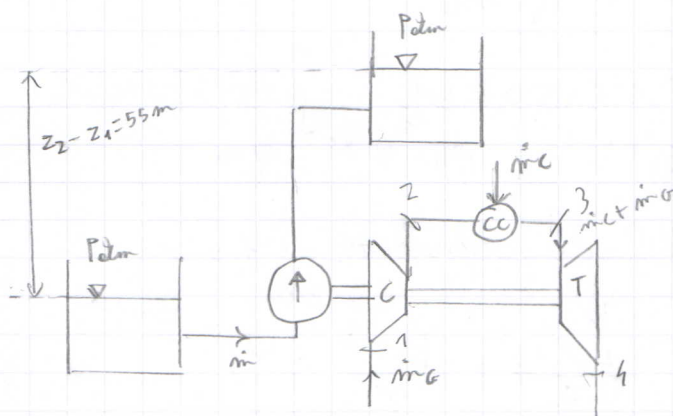
GAS ELABORATO: Aria $\rightarrow k = 1,4$

$$R = 287 \frac{J}{kg \cdot K} \quad C_p = 1004,5 \frac{J}{kg \cdot K}$$

COMBUST. METANO $h_i = 44000 \text{ kJ/kg}$

$$\alpha = 80,5 \quad R_{CH_4} = 518 \frac{J}{kg \cdot K}$$

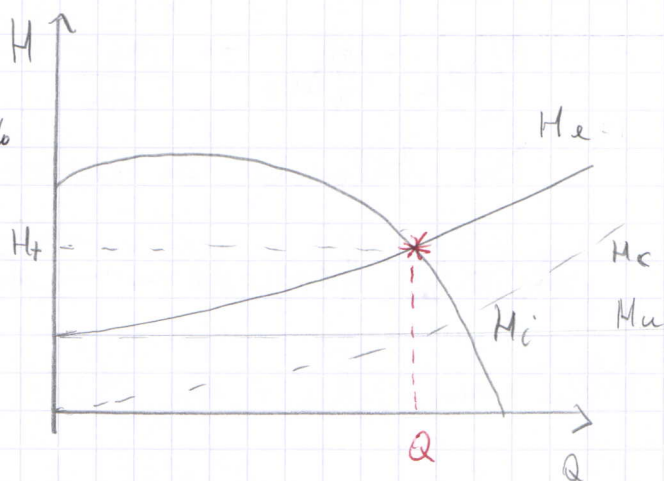
$$C_p = 2189 \frac{J}{kg \cdot K}$$



La portata a regime è quella del punto * che si trova eguagliando H_e ed H_i :

$$K_1 \left(\frac{m}{1000} \right)^2 + 2 \left(\frac{m}{1000} \right) Q - Q^2 = H_u + Q^2$$

$z_2 - z_1$ solo



$Q = 13,266 \text{ m}^3/\text{min} \rightarrow \text{esatto}$ m^3/min perché K_1 e K_2 hanno delle dimensioni \rightarrow quindi m.

$$H_e(Q) = H_t = H_u + H_c = 55 + (13,266)^2 = 230,99 \text{ m}$$

Convertiamo in energia: $E_t = H_t \cdot \rho = 2366,01 \text{ kJ}_{\text{kg}}$
energia totale richiesta alla portata Q

$$E_i = H_i \cdot \rho = \rho \left[K_1 \left(\frac{m}{1000} \right)^2 + 2 \left(\frac{m}{1000} \right) Q - Q^2 \right] = 2577,65 \text{ kJ}_{\text{kg}}$$

Quest'ultima però è l'energia erogata al netto delle perdite interne alla pompa, quella realmente fornita alle pompe è invece data dal lavoro Euleriano: Prevot:

$$H_e \rightarrow \eta_p = \frac{H_t}{H_E} \rightarrow H_E = \frac{1}{0,88} \cdot 230,99 = 262,49 \text{ m}$$

Convertiamo in energia fornita alle pompe:

$$E_p = \rho H_E = 2575 \text{ kJ}_{\text{kg}} \rightarrow P_p = \rho \frac{Q E_p}{60 \rightarrow \text{in secondi}} = 569,35 \text{ kW}$$

Siccome il rendimento nella trasmissione è unitario, deduciamo che la potenza necessaria alla pompa è pari a quella fornita dall'IMT:

$$E_{\text{IMT}} = E_p = 2575,03 \text{ kJ}_{\text{kg}}$$

$$\eta_{\text{Edc}} = \eta_{\text{EdT}} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \rightarrow \beta_c = \beta_T$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \beta^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow m_c = 1,45 + \frac{1}{2} \text{ kJ}_{\text{kgK}} \rightarrow \eta_{\text{pol}} = \frac{k-1}{k} \frac{m}{m-1} = 0,91$$

$$\eta_{Pdc} = \eta_{Pdr} = \frac{m_T - 1}{m_T} \frac{k}{k-1} = 0,91 \rightarrow m_T = 1,351 //$$

Da bilancio su camera di combustione

$$\dot{m}_G h_2 + \dot{m}_C h_2 + \dot{m}_C H_i = (\dot{m}_G + \dot{m}_C) h_3$$

$$(\dot{m}_G + \dot{m}_C) h_2 + \dot{m}_C H_i = (\dot{m}_G + \dot{m}_C) h_3$$

$$(\dot{m}_G + \dot{m}_C) (h_3 - h_2) = \dot{m}_C H_i$$

$$(\dot{m}_G + \dot{m}_C) c_p (T_3 - T_2) = \dot{m}_C H_i$$

$$(T_3 - T_2) = \frac{\dot{m}_C H_i}{(\dot{m}_G + \dot{m}_C) c_p} = \frac{\dot{m}_C}{(\dot{m}_G + \dot{m}_C)} \frac{H_i}{c_p} = \frac{1}{\frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_C} + 1} \frac{H_i}{c_p}$$

$$= \frac{1}{\alpha + 1} \frac{H_i}{c_p} \rightarrow T_3 = T_2 + \frac{1}{\alpha + 1} \frac{H_i}{c_p} = 1027,46 \text{ K}$$

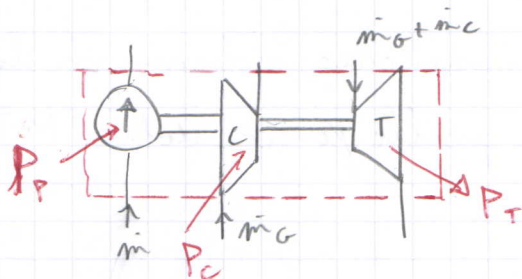
Calcolo lavori specifici turb e comp:

$$l_c = c_p (T_2 - T_1) = 180,81 \text{ KJ/kg}$$

$$l_T = c_p (T_3 - T_4) = c_p T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) = c_p T_3 \left(1 - \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{m_T - 1}{m_T}} \right)$$

$$= 325,55 \text{ KJ/kg}$$

$$\eta_n = \frac{l_T - l_c}{q} = \frac{l_T - l_c}{c_p (T_3 - T_2)} = \frac{(325,55 - 180,81) \cdot 1000}{1004,5 \cdot (1027,46 - 490)} = 0,268$$



$$P_T = P_P + P_c$$

$$(\dot{m}_G + \dot{m}_C) c_p (T_3 - T_4) = P_P + \dot{m}_G (T_2 - T_1)$$

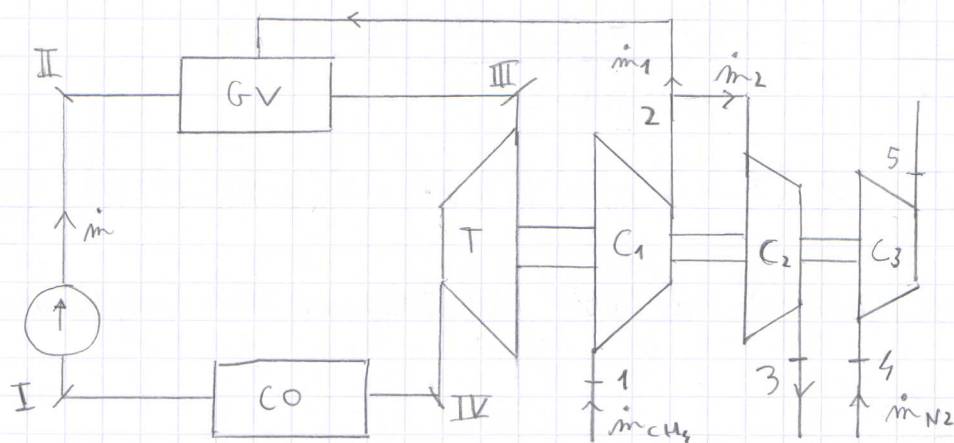
$$\frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_C} = \alpha \rightarrow \dot{m}_G = \alpha \dot{m}_C$$

$$(\alpha \dot{m}_C + \dot{m}_C) c_p (T_3 - T_4) = P_P + \alpha \dot{m}_C c_p (T_2 - T_1)$$

$$= \dot{m}_C (\alpha + 1) l_T = P_P + \dot{m}_C \alpha l_c =$$

$$\Rightarrow \dot{m}_C = \frac{P_P}{(\alpha + 1) l_T - \alpha l_c} = 0,0475 \text{ kg/s} = 171 \text{ kg/h} \rightarrow \text{consumo orario}$$

ESERCIZIO 0



COMPRESSORI

$$\dot{m}_{CH_4} = 5,3 \text{ kg/s} \quad H_i = 44 \text{ MJ/kg} \quad p_1 = 0,8 \text{ bar} \quad T_1 = 300 \text{ K}$$

$$p_2 = 3,3 \text{ bar} \quad T_2 = 455 \text{ K} \quad p_3 = 5,7 \text{ bar} \quad \dot{m}_{N_2} = 12 \text{ kg/s}$$

$$p_4 = 1 \text{ bar} \quad T_4 = 300 \text{ K} \quad p_5 = 8,8 \text{ bar}$$

$$\eta_{Rel, C1} = \eta_{Rel, C2} = \eta_{Rel, C3}$$

RANKINE

$$p_{I, IV} = 0,082 \text{ bar} \quad p_{II, III} = 19,5 \text{ bar} \quad \eta_b = 0,84 \quad \eta_{m, T} = 0,9$$

Imponendo titolo 0 in I e titolo 1 in III

	$p [\text{bar}]$	$T [\text{K}]$	$h [\text{KJ/kg}]$	$s [\text{KJ/kgK}]$	x
I	0,082	41,51	173,87	0,6224	0
II _s	19,5				≈ 0
II	19,5	484,25	902,8	2,435	≈ 0
III	19,5	484,25	2799	6,350	1
IV _s	0,082	315	1976	6,350	0,75
IV	0,082				

Mel liquido le proprietà variano poco con la pressione

Interpolaz.

$$s_{II} = 2,3981 + \frac{(19,5 - 18)}{(20 - 18)} \cdot (2,4443 - 2,3981) = 2,435 \text{ KJ/kgK}$$

$$s_{III} = 6,34936 + \frac{(19,5 - 18)}{(20 - 18)} \cdot (6,34088 - 6,34936) = 6,350 \text{ KJ/kgK}$$

$$h_{II} = 884,79 + 0,75(908,79 - 884,79) = 902,8 \text{ KJ/kg}$$

$$h_{III} = 2797,15 + 0,75(2799,53 - 2797,15) = 2798,9 \text{ KJ/kg}$$

IV_s isentropica (supponendo 0,08 bar)

$$x = \frac{s_{IVs} - s_a}{s_s - s_a} = \frac{6,350 - 0,5926}{8,22869 - 0,5926} \approx 0,75$$

$$h_{IVs} = h_a + x(h_s - h_a) = 173,87 + 0,75(257,9 - 173,87) = 1946,3 \text{ kJ/kg}$$

COMPR. 1

Calcoliamo l'esponente della politropica nel compressore 1.

$$\frac{T_2}{T_1} = \beta_{11}^{\frac{m-1}{m}} \rightarrow m_{c1} = 1,416 \quad (K=1,31)$$

$\frac{3,3}{0,8} = 4,125$

$$M_{CH_4} = M_{WC} + 4 M_{WH} = 12 + 4 \cdot 1 = 16 \text{ g/mol}$$

$$R = \frac{\tilde{R}}{M_{CH_4}} = \frac{8,313}{16 \cdot 10^{-3}} = 519 \text{ J/kg K}$$

$$c_p = \frac{R \cdot K}{K-1} = 219,4 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$\eta_{Pol, c1} = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{m_{c1}}{m_{c1}-1} = 0,80$$

COMPR. 2

Per il compressore 2 abbiamo $\beta_2 = \frac{P_3}{P_2} = \frac{5}{3} = 1,67$

la sostanza è la stessa e η_{Pol} è uguale

$$T_3 = T_2 \beta_2^{\frac{m_{c1}-1}{m_{c1}}} = 534 \text{ K}$$

COMPR. 3

Per il compressore 3 pure abbiamo tutto: $K_{N_2} = 1,4$

$$R_{N_2} = \frac{\tilde{R}}{M_{N_2}} = \frac{8,313}{28 \cdot 10^{-3}} = 297 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \rightarrow c_p = \frac{K R_{N_2}}{K-1} = 1039,5 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$\rightarrow 14-2 \text{ atomi}$

$$\eta_{Pol, c1} = \eta_{Pol, c3} = 0,80 = \frac{K_{N_2}-1}{K_{N_2}} \cdot \frac{m_{N_2}}{m_{N_2}-1} \rightarrow m_{N_2} = 1,56$$

$$T_5 = T_4 \left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{m_{N_2}-1}{m_{N_2}}} = 655 \text{ K}$$

Eccoci un bilancio su tutte le macchine (ricorda $\eta_{mec} P_T = P_{c1} + P_{c2} + P_{c3}$)

$$\eta_m \dot{m} (h_{III} - h_{IV}) = \dot{m}_{CH_4} (h_2 - h_1) + \dot{m}_2 (h_3 - h_2) + \dot{m}_{N_2} (h_5 - h_4)$$

Ora ricordando che $\dot{m}_2 = \dot{m}_{CH_4} - \dot{m}_1$

$$\eta_m \dot{m} (h_{III} - h_{IV}) = \dot{m}_{CH_4} (h_2 - h_1) + \dot{m}_{CH_4} (h_3 - h_2) - \dot{m}_1 (h_3 - h_2) + \dot{m}_{N_2} (h_5 - h_4)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_{CH_4} (\cancel{h_2} - h_1 + h_3 - \cancel{h_2}) + \dot{m}_{N_2} (h_5 - h_4) - \eta_m \dot{m} (h_{III} - h_{IV})}{(h_3 - h_2)}$$

Do balanceo su GV:

$$\eta_m \dot{m}_1 H_i = \dot{m} (h_{III} - h_{IV}) \rightarrow \frac{\dot{m}}{\dot{m}_1} = \frac{0,84 \cdot 44 \cdot 10^6}{(2799 - 173,84) \cdot 10^3} = 14$$

$$\dot{m} = 14 \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_{CH_4} c_p (T_3 - T_1) + \dot{m}_{N_2} c_p (T_5 - T_4) - \eta_m \dot{m}_1 \cdot 14 \cdot (h_{III} - h_{IV})}{c_p (T_3 - T_2)}$$

$$0 = \dot{m}_{CH_4} c_p (T_3 - T_1) + \dot{m}_{N_2} c_p (T_5 - T_4) - \eta_m \dot{m}_1 \cdot 14 (h_{III} - h_{IV}) - \dot{m}_1 c_p (T_3 - T_2)$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\overset{CH_4}{\dot{m}_{CH_4} c_p (T_3 - T_1)} + \overset{N_2}{\dot{m}_{N_2} c_p (T_5 - T_4)}}{\eta_m \cdot 14 \cdot \underbrace{(h_{III} - h_{IV})}_{\substack{\text{CONVERTIR EN SOULEC} \cdot 10^3}} + \underbrace{c_p (T_3 - T_2)}_{\substack{\text{CH}_4}}} = 0,65 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 14 \cdot \dot{m}_1 = 14 \cdot 0,65 = 9,1 \text{ kg/s}$$

$$P_{C1} + P_{C2} + P_{C3} = \eta_m \cdot P_T = \eta_m \cdot \dot{m} (h_{III} - h_{IV}) = 6965 \text{ kW}$$

$$\eta_g = \frac{P_u}{\dot{m}_c H_i} = \frac{\eta_m P_T}{\dot{m}_1 H_i} = \frac{6965 \cdot 10^3}{0,65 \cdot 44 \cdot 10^6} = 0,24$$