



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 630

DATA: 12/09/2013

A P P U N T I

STUDENTE: Chiabrando

MATERIA: Termodinamica Applicata e Trasmissione del Calore
Prof. Giaretto

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

SISTEMA

• APERTO $\Rightarrow q - l_x^{id} = \Delta h$

• CHIUSO $\Rightarrow q - l_i^{id} = \Delta u$

TRASF. ISOCORA $r; v = \text{cost}$

CHIUSO $q - l_i^{id} = \Delta u$

$$l_i^{id} = \int_{r; v=\text{cost}} P dv = 0 \Rightarrow q = \Delta u = C_v \Delta T$$

APERTO $q - l_x^{id} = \Delta h$

$$l_x^{id} = - \int_{r; v=\text{cost}} v dp = -v \int_1^2 dp = -v(p_2 - p_1)$$

$$q + v(p_2 - p_1) = C_p(T_2 - T_1)$$

$$Pv = RT = P_1 v = RT_1$$

$$P_2 v = RT_2$$

$$q + RT_2 - RT_1 = C_p(T_2 - T_1)$$

$$q = (C_p - R)(T_2 - T_1) = C_v \Delta T$$

APERTO

$$q - l_x^{ID} = c_p \Delta T = \phi \Rightarrow q = l_x^{ID}$$

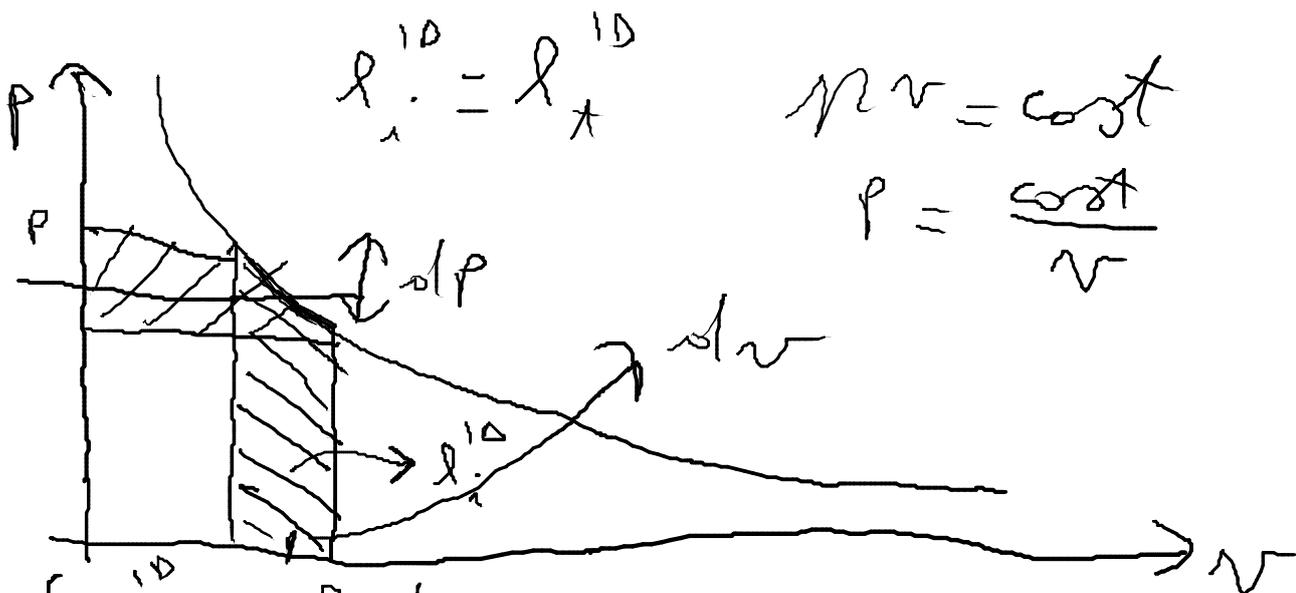
$$l_x^{ID} = - \int_{T=const} v dp = - \int_{T=const} RT \frac{dp}{p} = -RT \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$P_2 V_2 = RT$$

$$P_1 V_1 = RT \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$l_x^{ID} = -RT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = l_i^{ID}$$

DIAGRAMMA DI CLAPEYRON



$$\delta l_i^{ID} = P dv$$

$$|\delta l_x^{ID}| = v dp$$

$$P V^\gamma = \text{cost}$$

ADIABATICA
IDEALE
REVERSIBILE
($l_a = 0!$)

$$P V = R T$$

$$P = \frac{R T}{V}$$

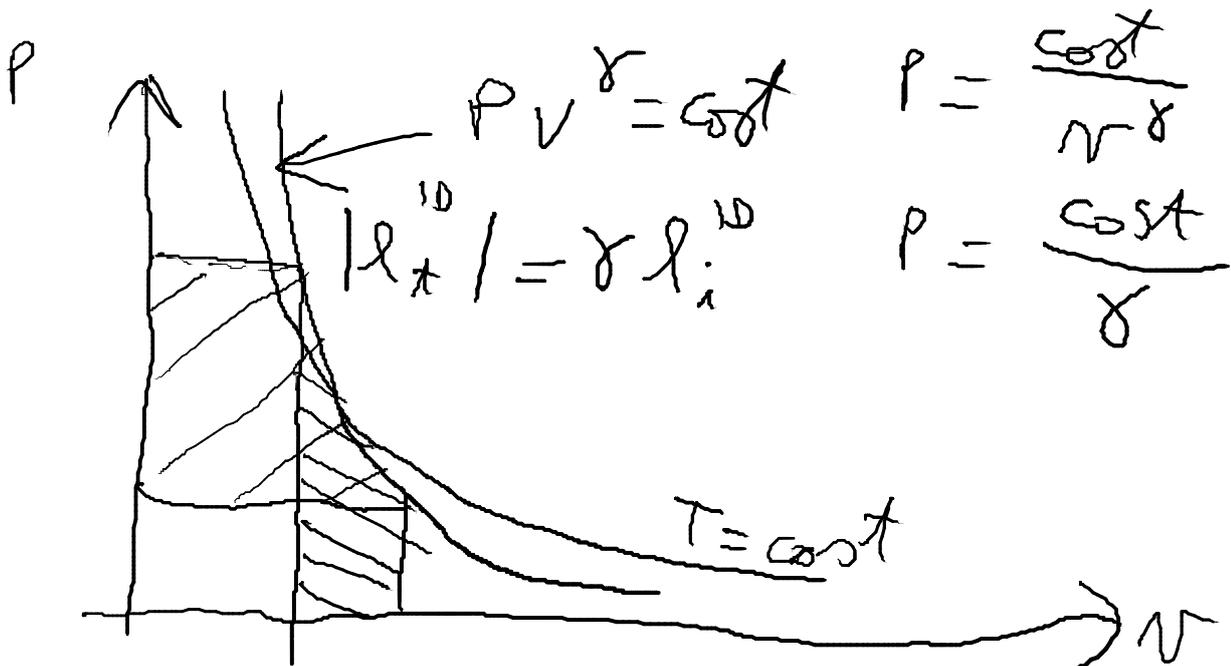
$$\frac{R T}{V} V^\gamma = \text{cost} \Rightarrow$$

$$T V^{\gamma-1} = \text{cost}$$

$$V = \frac{R T}{P}$$

$$P \left(\frac{R T}{P} \right)^\gamma = P^{1-\gamma} T^\gamma = \text{cost}$$

$$T P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{cost}$$



ESERCIZIO N. 1

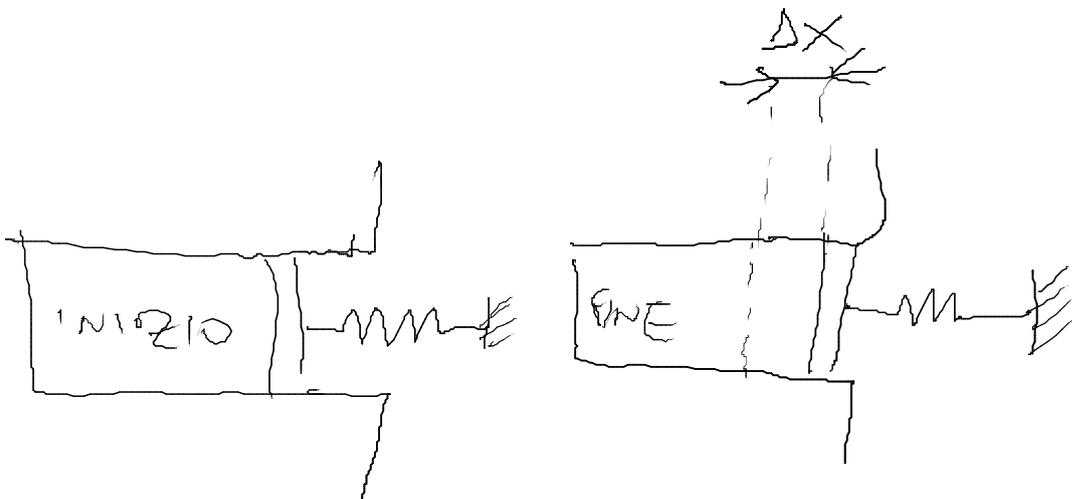
3

DATI (e → esterna)

$$S_{pir.} = 0,1 \text{ m}^2; P_e = 1 \text{ bar}; K = 150 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$\Delta X = 10 \text{ cm}; \Delta X_{id} = 2 \cdot \Delta X$$

Schema del problema



7

Lavoro dissipato x attrito interno 7

$$\Delta X_{id} = 2 \Delta X$$

$$L_{i, id} = \frac{K}{2} \Delta X_{id}^2 + p_e S_{pist} \Delta X_{id} = 5,227 \cdot 10^3 \text{ J}$$

Il lavoro interno di dissipazione:

$$L_{ai} = L_{i, id} - L_i = 3,263 \cdot 10^3 \text{ J}$$

Esercizio 2 (A-11 P. Gregorio) 8

Dati

$$p_e = 1 \text{ bar}; A = 1 \text{ dm}^2; V_1 = 9 \text{ dm}^3;$$

$$T_1 = 27^\circ \text{ C}; K = 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}}; \Delta X = 1 \text{ dm};$$

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

Il sistema cilindro-pistone opera senza attrito ed è di massa trascurabile

Fulla base delle informazioni raccolte 11

$$L_i = L_A + L_0$$

L_0 :

$$L_0 = p_e \cdot \Delta V = p_e \cdot A \cdot \Delta X$$

L_A : (massa $p \approx 0 \rightarrow L_A \times \text{sollevarlo} \approx 0$)

$$L_A = \frac{1}{2} K \Delta X^2$$

$$\rightarrow L_i = L_A + L_0 = 150 \text{ J} \quad (\text{INCOGNITE})$$

Variatione di energia interna:

$$\Delta U_{12} = M \cdot \Delta u_{12} = \underbrace{M}_{\substack{\text{(massa)} \\ \text{GAS}}} \cdot C_v \cdot \underbrace{(T_2 - T_1)}_{\substack{\text{(H.P. gas ideale)}}}$$

Calcolo della massa contenuta all'interno del cilindro: 12

Equazione di stato dei gas ideali:

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R^* \cdot T_1} \quad R^* = \frac{R}{M} = \left(\frac{R}{M} \right)_{\substack{\text{COST.} \\ \text{UNIVERSALE} \\ \text{GAS}}} = 287 \text{ J/kgK}$$

($R^* = R$)

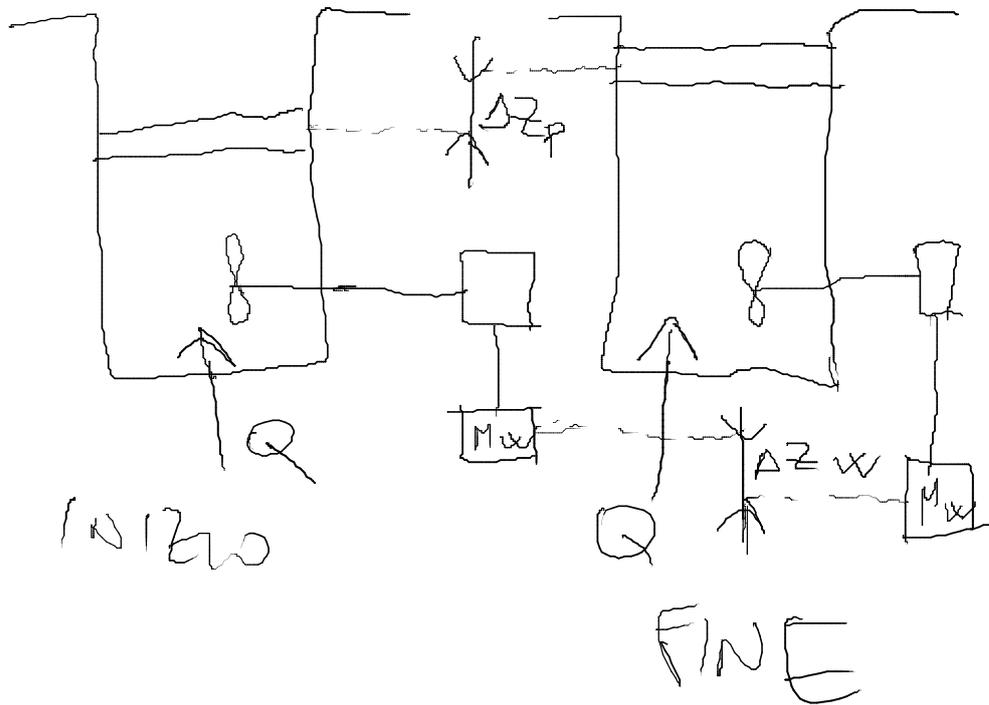
$$M = 4,646 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}$$

Calcolo della pressione nello stato 2:

$$p_2 = p_1 + \frac{K \Delta X}{A} = 2 \text{ bar}$$

(\downarrow
 $= p_e$)

(Q? x QUINTUPLICARE V_{gas})



Procedura suggerita

Calcolo del volume del gas all'istante iniziale:

Equazione di stato: $P_1 v_1 = R^* T_1$

equilibrio con l'ambiente esterno:

$$T_1 = T_0$$

$$P_1 = P_0 + (\rho M P) / S_p$$

$$v_1 = \frac{R^* T_1}{P_1}$$

$$V_1 = v_1 \cdot M_{gas}$$

$$V_1 = 0,084 \text{ m}^3$$

$$(V_2 = 5 \cdot V_1)$$

$$L_{Ap} = -gM_p \cdot \frac{4V_1}{S_p} = -1,655 \text{ KJ} \quad 19$$

Dal punto di vista del gas:

$$L_{A\text{ gas } p} = -L_{Ap} = 1,655 \text{ KJ}$$

Il lavoro termico netto del gas è:

$$L_{A\text{ gas}} = L_{A\text{ gas } w} + L_{A\text{ gas } p} = 0,915 \text{ KJ}$$

Consideriamo il gas come sistema:

equazione di conservazione dell'energia cinetica

$$L_{i\text{ gas}} = L_{A\text{ gas}} + L_{o\text{ gas}} + \Delta E_{c\text{ gas}} + \Delta E_{p\text{ gas}}$$

$$H_p: \Delta E_{c\text{ gas}} \approx 0 \quad ; \quad E_{p\text{ gas}} \approx 0 \quad 20$$

$$\rightarrow L_{i\text{ gas}} = L_{A\text{ gas}}^{(H_p)} + L_{o\text{ gas}}^{(?)}$$

$$L_{o\text{ gas}}: \quad L_{o\text{ gas}} = p_0 \Delta V = p_0 (V_2 - V_1) = \\ = p_0 4V_1 = 33,76 \text{ KJ}$$

$$L_{i\text{ gas}} = L_{A\text{ gas}} + L_{o\text{ gas}} = 34,172 \text{ KJ}$$

I principi della termodinamica applicati
al gas: $Q - L_i = \Delta U$ (SIST. CHLUSO)

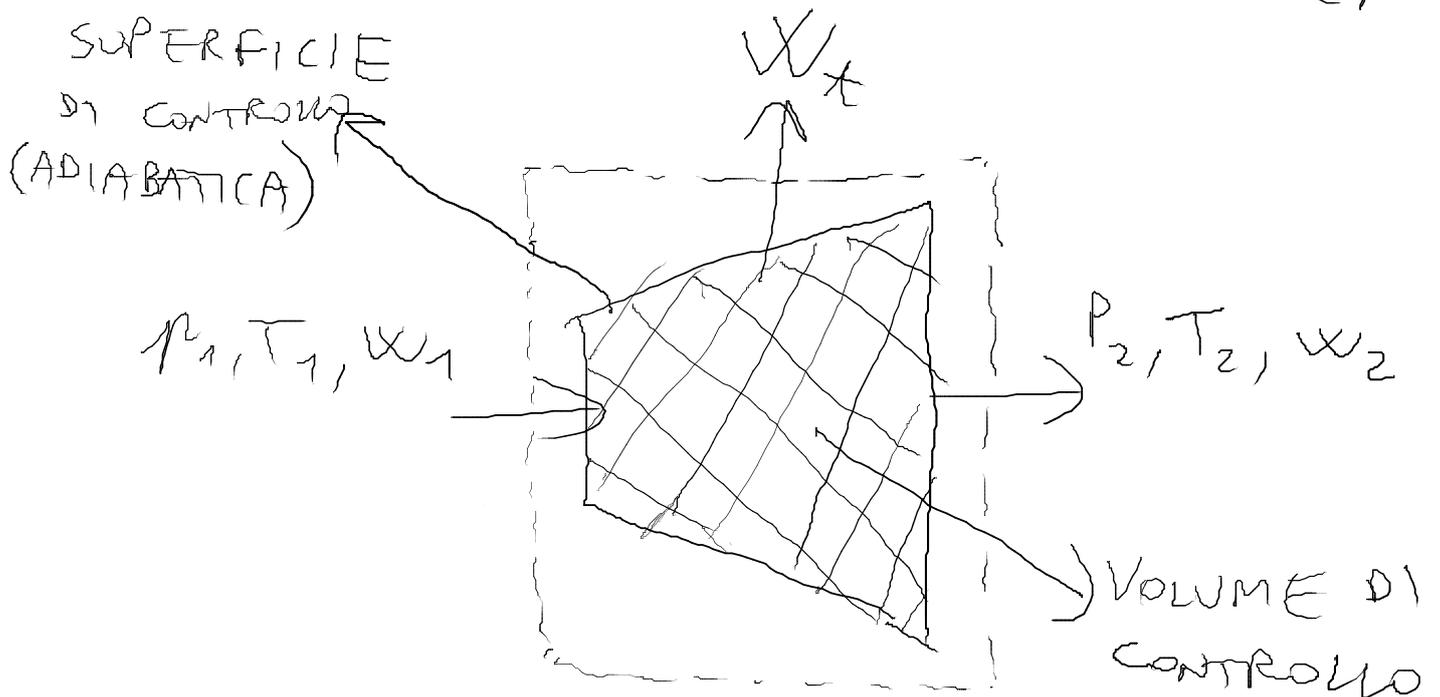
Esercizio N° 5

23

Dati del problema

$\gamma = 1,4$ Aria, $R^* = 287 \frac{J}{kgK}$; $G_{max} \approx \frac{K_{eff}}{\omega}$
 $p_1 = 90 \text{ bar}$; $w_1 = 180 \frac{m}{s}$; $T_2 = 773,15 \text{ K}$;
 $w_2 = 270 \text{ m/s}$; $W_t = 6 \text{ MW}$; processo *adiabatico*
 Schema grafico

29



È possibile esprimere la portata in massa:

27

$$G_m = \rho_1 v_1 \cdot A_1$$

$$\rho_1 = \frac{1}{v_1} \quad v_1 = \frac{R^* T_1}{p_1} = 0,078 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\rho_1 = 12,763 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad A_1 = \frac{G_m}{\rho_1 v_1} = 87,06 \text{ cm}^2$$

Esercizio N° 6 (c-28 P. Gregoris)

28

Fisica Tecnica

Dati:

(P DI MANDATA)

$$\gamma = 1,4 \quad p_1 = 1 \text{ bar} ; T_1 = 273,15 \text{ K}$$

$$M_m = 28,964 \text{ kg/kmol} ; p_2 = 8 \text{ bar}$$

Gas ideale, trasformazioni reversibili.

Schema grafico del problema

$$l_t = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{n_1 v_1}{p} = - n_1 v_1 \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = \quad 32$$

$$= - n_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = - R^* T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = -162,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = T_1 \quad p_{12} \text{ è isoterma}$$

I Principio: $q = l_t$ nel caso studiato

b) Per esercizio (a caso)

$$p v^\gamma = \text{cost}$$

TRASFORMAZIONI POLITROPICHE
REVERSIBILI

1

$$n = \frac{c_p - c}{c_v - c}$$

$$p v^n = \text{cost}$$

$$-\infty \leq c \leq +\infty$$

$$c = c_p \Rightarrow n = 0$$

ISOBARA

$$c = c_v \Rightarrow n \rightarrow \infty$$

ISOCORA

$$c \rightarrow \pm \infty \Rightarrow n \rightarrow 1$$

ISOTERMA

$$c = 0 \Rightarrow n = \gamma$$

ADIABATICA

$$T v^{n-1} = \text{cost} ; T p^{\frac{1-n}{n}} = \text{cost}$$

$$\int_{\Gamma} v \, dp \quad \text{per } p v^n = \text{cost} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad 4$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-n}{n}} = T_2 p_2^{\frac{1-n}{n}} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$p_1 v_1 = R T_1$$

$$\int_{\Gamma} v \, dp = \frac{n}{n-1} R T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = \frac{n}{n-1} R (T_2 - T_1)$$

$\Gamma: p v^n = \text{cost}$

IPRINCIPIO $\Rightarrow q = c_p \Delta T - \frac{n}{n-1} R \Delta T = \left(c_p - \frac{n}{n-1} R \right) \Delta T$

$$n = \frac{c_p - c}{c_v - c} ; \quad n-1 = \frac{c_p - c - c_v + c}{c_v - c} = \frac{R}{c_v - c}$$

$$q = \left(c_p - \frac{n}{n-1} R \right) \Delta T \quad 5$$

$$\frac{n}{n-1} R = \frac{c_p - c}{c_v - c} \cdot \frac{c_v - c}{R} \cdot R = c_p - c$$

$$q = c \Delta T$$

POTENZIALI TERMODINAMICI 3

$$du = Tds - p dv \quad (= dg^{DA} - dli)$$

$$dh = Tds + v dp$$

ENERGIA LIBERA

$$f = u - Ts \Rightarrow df = du - Tds - s dT$$

$$df = \cancel{Tds} - p dv - \cancel{Tds} - s dT$$

ENTALPIA LIBERA

$$g = h - Ts \Rightarrow dg = dh - Tds - s dT$$

$$dg = \cancel{Tds} + v dp - \cancel{Tds} - s dT$$

$$du = \overset{a}{\downarrow} T \overset{x}{\downarrow} ds - \overset{b}{\downarrow} p \overset{y}{\downarrow} dv \Rightarrow u(s, v)$$

$$dh = Tds + v dp \Rightarrow h(s, p)$$

$$df = -p dv - s dT \Rightarrow f(v, T)$$

$$dg = v dp - s dT \Rightarrow g(p, T)$$

$$dz(x, y) = a(x, y) dx + b(x, y) dy$$

$$\left(\frac{\partial a}{\partial y} \right)_{x(\text{cost})} = \left(\frac{\partial b}{\partial x} \right)_{y(\text{cost})} \quad \leftarrow$$

Esercitazione N° 2 30/03/2012

1

Esercizio (B.12; P. Gregoris)

Dati:

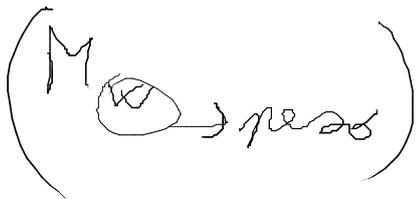
Fluido \rightarrow Aria (gas ideale)

$\gamma = 1,4$ (gas biatomico); $p_1 = 10 \text{ bar}$; $T_1 = 300,15 \text{ K}$;

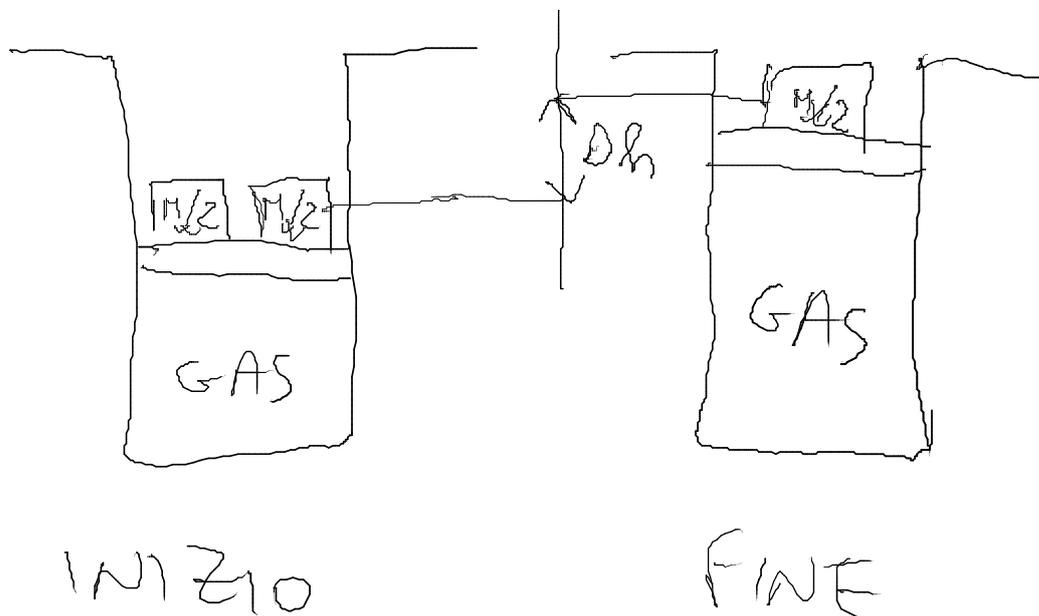
$M_{\text{aria}} = 10 \text{ Kg}$; $p_2 = 1 \text{ bar}$; $R^* = 287 \text{ J/kgK}$

Γ : adiabatica

Schema:



2



$$L_i = L_A + L_0 + \underbrace{\Delta E_c}_{\approx 0} + \underbrace{\Delta E_p}_{\approx 0} \quad H_p: \quad 5$$

$$L_i = L_{i,rev} - L_{a,i} \quad \Delta E_c \approx 0$$

$$\Delta E_p \approx 0$$

Systema è il gas:

$$L_A = \frac{M_{ox}}{2} g \Delta z = \frac{\frac{F_w}{2} g \Delta V}{S_p} = \frac{\frac{F_w}{2} \Delta V}{S_p} = \frac{P_w}{2} \Delta V$$

$$\rightarrow L_A = \frac{P_w}{2} (V_2 - V_1)$$

$$L_0 = p_e (V_2 - V_1)$$

$$\text{Restante: } L_i = L_A + L_0 = \left(p_e + \frac{P_w}{2} \right) (V_2 - V_1) = p_2 (V_2 - V_1)$$

Dal I principio:

6

$$-L_i = \Delta U = U_2 - U_1 = M_{ARIA} \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$-p_2 (V_2 - V_1) = M_{ARIA} \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$-p_2 (V_2 - V_1) = M_{ARIA} \frac{R^*}{1-\gamma} (T_2 - T_1)$$

→ applicando equazione di stato:

$$-p_2 (V_2 - V_1) = \frac{1}{1-\gamma} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

$$-p_2 (1-\gamma)(V_2 - V_1) = p_2 V_2 - p_1 V_1$$

$$\rightarrow V_2 = \frac{(p_1 - p_e + \gamma p_2)}{\gamma p_e} V_1 \rightarrow V_2 = 1,365 \text{ m}^3$$

Esercizio N°2 (B.06 P. Gregorio)

9

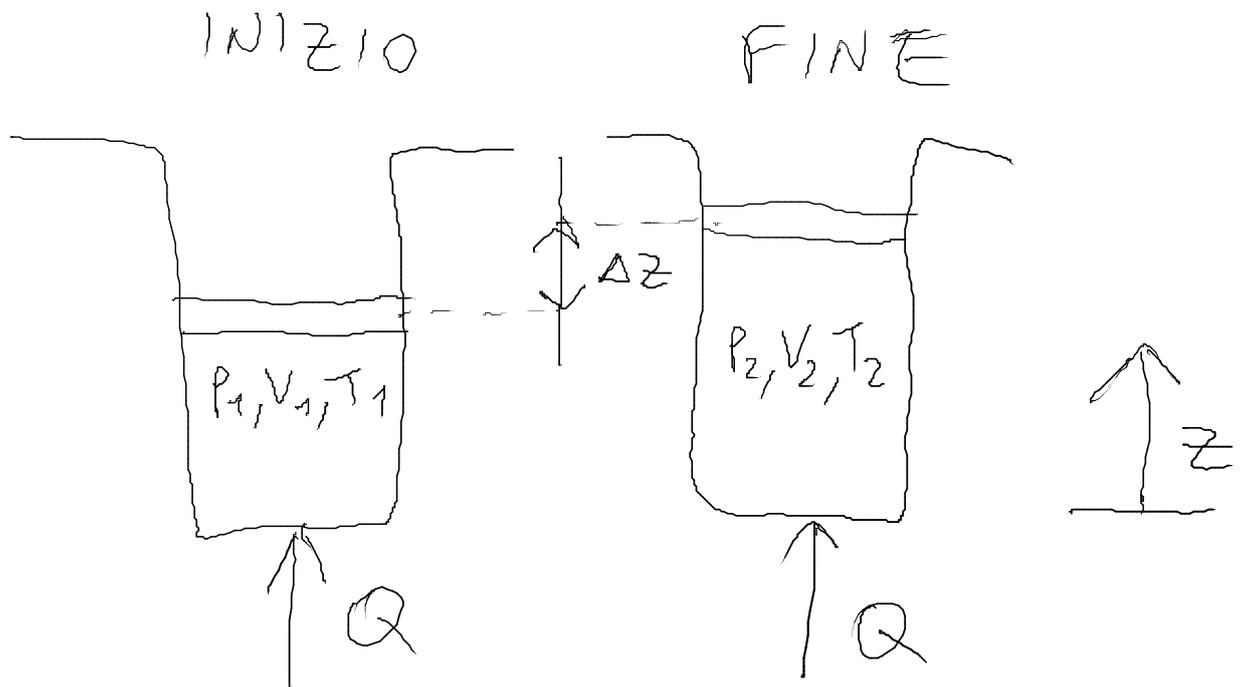
Dati:

$$p_1 = 2 \text{ bar}; p_2 = 1 \text{ bar}; p_e = 1 \text{ bar}$$

$$T_1 = T_2 = T_e; T_e = 300 \text{ K}; n = 1 \text{ mole}$$

Schema del problema:

10



Il lavoro dissipato per attrito: 13

$$L_{a,i} = L_{i,rev} - L_i = nRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} - nRT_1 \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$p_2 = p_e ; p_1 = 2p_e$$

$$L_{a,i} = nRT_1 \ln 2 - \frac{nRT_1}{2} = nRT_1 \left(\ln 2 - \frac{1}{2}\right) > 0$$

Variatione di entropia del gas:

$$\Delta S_{gas} = nC_p \ln \frac{T_e}{T_1} - nR \ln \frac{p_2}{p_1} = -nR \ln \frac{p_2}{p_1} = nR \ln 2$$

□ ISOTERMA

Variatione di entropia dell'ambiente: 14

$$\Delta S_e = -\frac{Q}{T_e} = -\frac{nR}{2}$$

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_{gas} + \Delta S_e = nR \left(\ln 2 - \frac{1}{2}\right) > 0$$

Procedura suggerita:

18

$$\dot{\phi} - \dot{W}_A = \frac{d}{dt} (U + E_c + E_p + P_o V)_{V_c} + \sum_{i=1}^{N_c} \pm \dot{G}_i (h + l_c + l_p)_i$$

$\xrightarrow{\quad} = 0 \xleftarrow{\quad}$

- Condizioni stazionarie

- 1 condotto di ingresso e 2 condotti di uscita

$$\dot{\phi}_a - \dot{\phi}_r - \dot{W}_A = \dot{G}_{01} (h_{01} + l_{c01} + l_{p01}) + \dot{G}_{02} (h_{02} + l_{c02} + l_{p02}) + \sum \dot{G}_i (h_i + l_{ci} + l_{pi})$$

Conservazione della massa:

STAZIONARIO

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_{V_c} = \sum \dot{G}_i - \sum \dot{G}_u \quad \left(\frac{dM}{dt} \right)_{V_c} = 0$$

$$\rightarrow \dot{G}_i = \dot{G}_{01} + \dot{G}_{02}$$

$$\dot{\phi}_a - \dot{\phi}_r - \dot{W}_A = \dot{G}_{01} (h_{01} - h_i) + \dot{G}_{01} (l_{c01} - l_{ci}) + \dot{G}_{01} (l_{p01} - l_{pi}) + \dot{G}_{02} (h_{02} - h_i) + \dot{G}_{02} (l_{c02} - l_{ci}) + \dot{G}_{02} (l_{p02} - l_{pi})$$

$$\rightarrow \dot{W}_A = 444,65 \text{ kW}$$

Flusso di entropia del processo

II principio per sistemi aperti:

$$\sum_K \frac{\dot{\phi}_K}{T_K} + \sum_i \dot{S}_i = \frac{d}{dt} (S)_{V_c} + \sum_{i=1}^{N_c} \pm \dot{G}_i s_i$$

$\xrightarrow{\quad} = 0 \xleftarrow{\quad}$

- condizioni stazionarie

$$\rightarrow \frac{\dot{\phi}_a}{T_{HTS}} - \frac{\dot{\phi}_r}{T_{LTS}} + \sum_i \dot{S}_i = \dot{G}_{01} s_{01} + \dot{G}_{02} s_{02} - \dot{G}_i s_i$$

$$\dot{G}_i = \dot{G}_{01} + \dot{G}_{02}$$

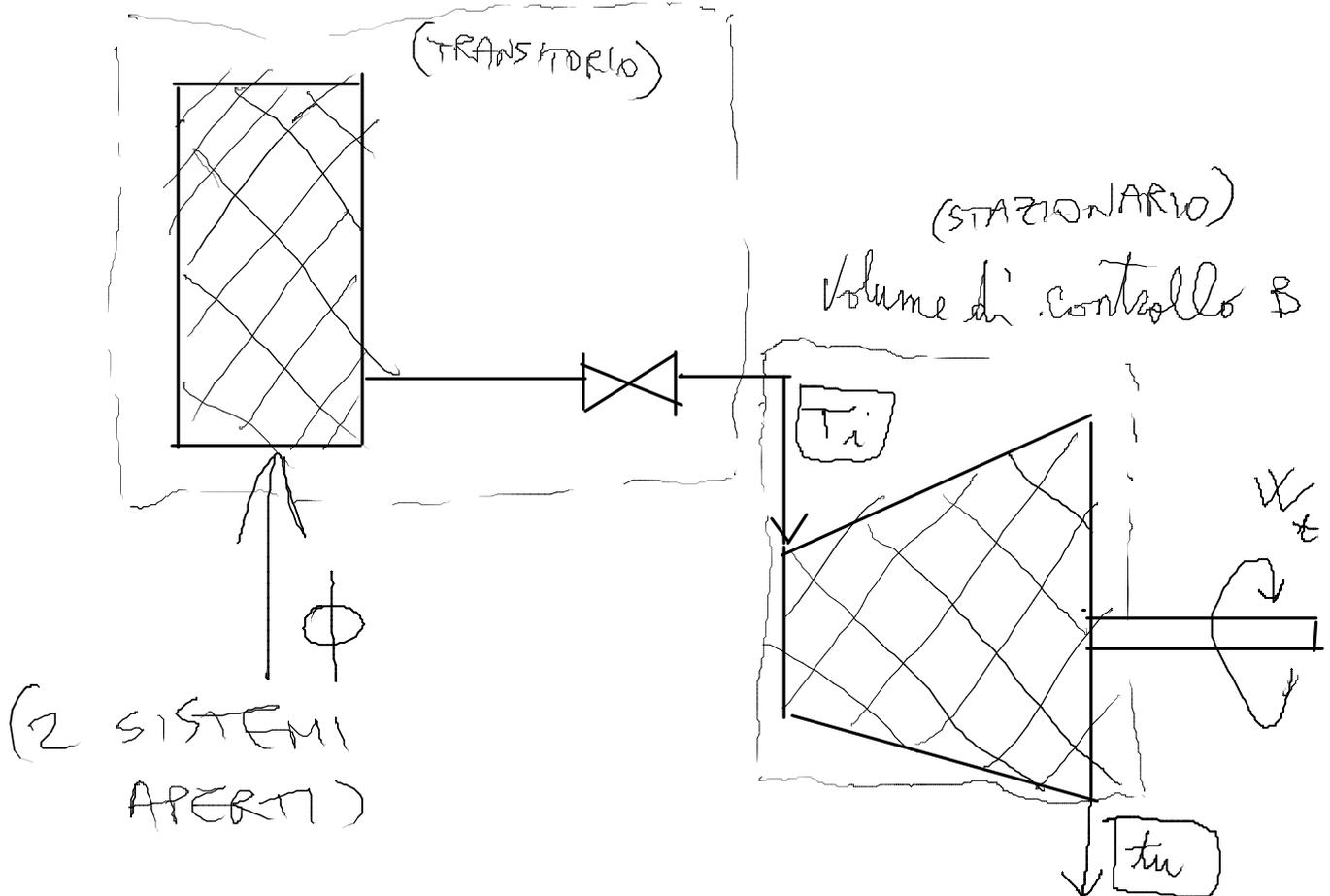
Esercizio N°5 (C.31, P. Gregorio)

21

Dati: $\gamma = 1,4$; $P_{v1} = 140 \text{ bar}$; $P_{v2} = 7 \text{ bar}$
 $P_{xi} = 7 \text{ bar}$; $P_{xout} = 1 \text{ bar}$; $\Delta T = 3600 \text{ s}$
 $R^* = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$; $T_{v1} = T_{v2} = T_v = 293,15 \text{ K}$
 $W_t = 75 \text{ W}$; Γ_x : adiabatica reversibile
 Schema del problema:

volume di controllo A
(TRANSITORIO)

22



$$T_{v1} = T_{v2} \rightarrow M_{v1} = M_{v2}$$

25

$$Q = (M_{v1} - M_{v2}) \mu_{v2} \sqrt{v_2} = (M_{v1} - M_{v2}) R^* T_{v2} = \\ = P_{v1} V_v - P_{v2} V_v = (P_{v1} - P_{v2}) \cdot V_v$$

Volume di controllo B:

$$\phi - \dot{W}_A = \frac{d}{dt} (U + E_c + E_p + \mu_0 V)_{V_c} + \sum_{i=1}^{N_c} \pm G (h + \cancel{e_c} + \cancel{e_p})_i$$

Γ_t : Adiabatica e reversibile $\rightarrow \phi = 0$

Condizioni stazionarie

$$e_c \approx 0; e_p \approx 0$$

$$-\dot{W}_A = G \dot{m}_i (h_{t,out} - h_{t,i})$$

$$T_{v1} = T_{v2} = T_{t,i}$$

26

Temperatura all'uscita della turbina:

$$T_{t,out} = T_{t,i} \left(\frac{P_{t,out}}{P_{t,i}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{t,out} = 168,125 \text{ K}$$

$$\dot{W}_A = \int_{(INTEGRANDO)} \left(\frac{dM}{dt} \right)_{V_c} (h_{t,out} - h_{t,i}) = \left(\frac{dM}{dt} \right)_{V_c} \cdot c_p (T_{t,out} - T_{t,i})$$

$$L_A = (M_{v2} - M_{v1}) c_p (T_{t,out} - T_{t,i})$$

$$L_A = \dot{W}_A \cdot \Delta t = 270 \text{ KJ}$$

$$\Delta M = M_{v2} - M_{v1} = \frac{L_A}{\frac{\gamma R^*}{\gamma-1} (T_{t,out} - T_{t,i})} = -2,15 \text{ Kg}$$

$$\Delta v_2 - \Delta v_1 = \frac{\gamma R^*}{\gamma - 1} \ln \frac{T_{v2}}{T_{v1}} - R^* \ln \frac{p_{v2}}{p_{v1}} \quad 29$$

$\rightarrow = 0$ (ISOTERMA)

$$\Delta v_2 - \Delta v_1 = -R^* \ln \frac{p_{v2}}{p_{v1}} = 859,775 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$S_i = M_{v1} (\Delta v_2 - \Delta v_1) - \frac{Q}{T_v} = 1,329 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}$$

Esercizio N° 7 (c-92, P. Gregorio) 30

DATI:

$$V_1 = 0,15 \text{ m}^3; \quad p_1 = 1 \text{ bar}; \quad x_1 = 0,01$$

$$T_{\text{scor}} = 533,15 \text{ K}; \quad p_2 = 21 \text{ bar}; \quad p_3 = p_2; \quad x_3 = 0,9$$

Schema del problema:

TRASF. 1-2 COMPRESS. 2

$$T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_a}{v_b}\right)^{\gamma-1} = 2^{\gamma-1}$$

TRASF. 3-4 ESPANSIONE

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_a}{v_b}\right)^{\gamma-1} = 2^{\gamma-1} \quad \text{(se ho 4 transf. a 2 a 2 uguali)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow$$

$$\boxed{T_2 T_4 = T_3 T_1}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

CICLO OTTO 3

$$\eta = 1 - r_v^{1-\gamma}$$

$$T_4 = T_3 v_c^{\gamma-1} \cdot v_v^{1-\gamma}$$

6

$$T_4 = T_2 v_c^{\gamma} \cdot v_v^{1-\gamma}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\gamma(T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2 v_c^{\gamma} v_v^{1-\gamma} - T_2 v_v^{1-\gamma}}{\gamma(T_2 v_c - T_2)}$$

$$\eta = 1 - v_v^{1-\gamma} \left[\frac{v_c^{\gamma} - 1}{\gamma(v_c - 1)} \right]$$

$$\eta_{\text{DIESEL}} = 1 - v_v^{1-\gamma} \left[\frac{v_c^{\gamma} - 1}{\gamma(v_c - 1)} \right]$$

7

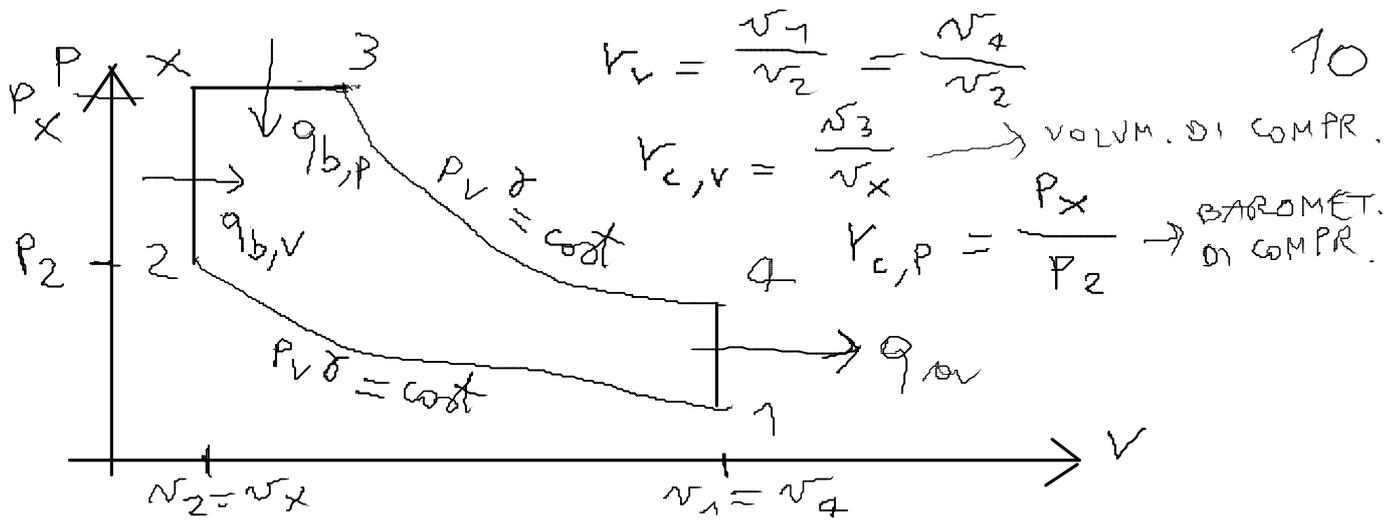
$$\eta_{\text{OTTO}} = 1 - v_v^{1-\gamma}$$

$$\lim_{v_c \rightarrow 1} \left[\frac{v_c^{\gamma} - 1}{\gamma(v_c - 1)} \right] = 1$$

$$v_c > 1 \Rightarrow \left[\frac{v_c^{\gamma} - 1}{\gamma(v_c - 1)} \right] > 1$$

$$\text{e } v_v = \text{cost}$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{OTTO}} > \eta_{\text{DIESEL}}$$



$$\eta = 1 - \frac{|q_{a,v}|}{q_{b,p}}$$

$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_x - T_2) + c_p(T_3 - T_x)}$$

$$T_1 = T_2 v_v^{1-\gamma}$$

11

$$\begin{cases} P_2 v_2 = R T_2 \\ P_x v_x = R T_x \end{cases} \Rightarrow \frac{P_x}{P_2} = \frac{T_x}{T_2}$$

$$T_x = T_2 v_{c,p}$$

$$\frac{T_3}{T_x} = \frac{v_3}{v_x} \Rightarrow T_3 = T_x v_{c,v}$$

$$T_3 = T_2 v_{c,p} \cdot v_{c,v}$$

$$T_3 v_3^{\gamma-1} = T_4 v_4^{\gamma-1}$$

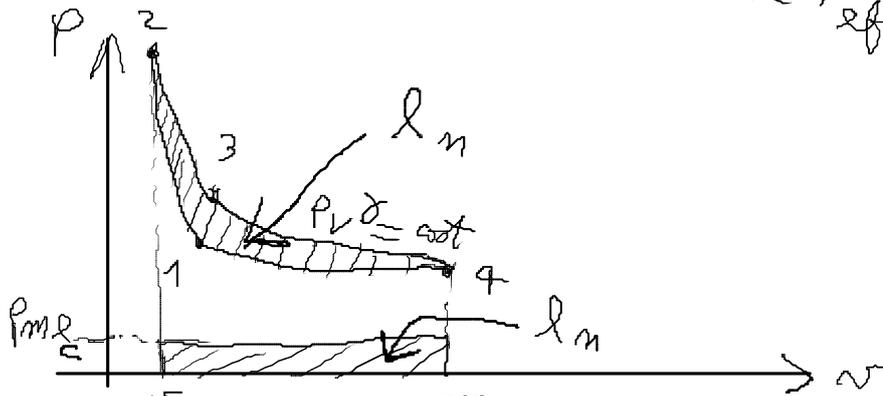
$$T_3 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_3} \right)^{\gamma-1} = T_4 \left(\frac{v_4}{v_2} \cdot \frac{v_2}{v_3} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_3 = T_4 v_v^{\gamma-1} \cdot v_{c,v}^{1-\gamma}$$

CARNOT

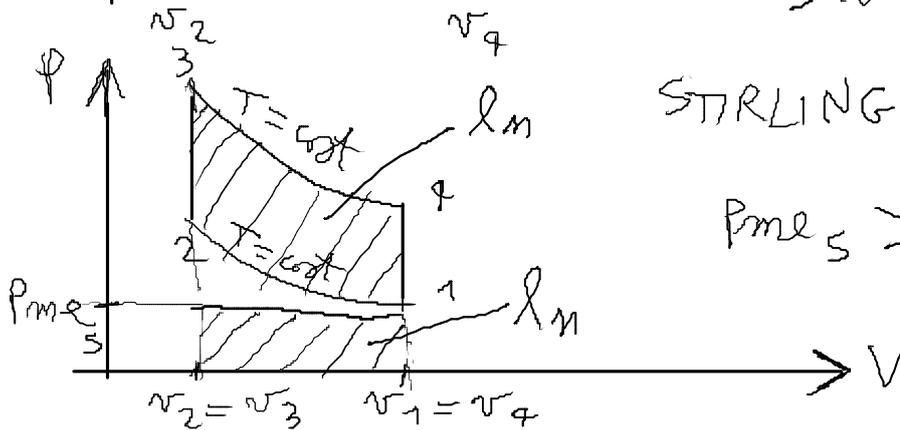
P_{me} press. media efficace

14



STIRLING

$P_{me_s} \gg P_{me_c}$



CALORE DI RIGENERAZIONE

15

$$|q_R| = c_v (T_b - T_a)$$

II° PRINC. SU ISOTERME 1-2, 3-4

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{q_a}{T_a}$$

$$\Delta_1 - \Delta_2 = \frac{|q_a|}{T_a}$$

$$|q_a| = T_a (\Delta_1 - \Delta_2)$$

$$|q_a| = T_a \left[c_v \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) + R \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \right]$$

$$k_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$T_1 = T_2 = T_A$$

$$|q_a| = T_a R \ln k_v$$

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

18

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left[\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right]$$

$$T_2 T_4 = T_1 T_3 \quad (4 \text{ TRASF. A } 2 \text{ A } 2 \Rightarrow)$$

$$\Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

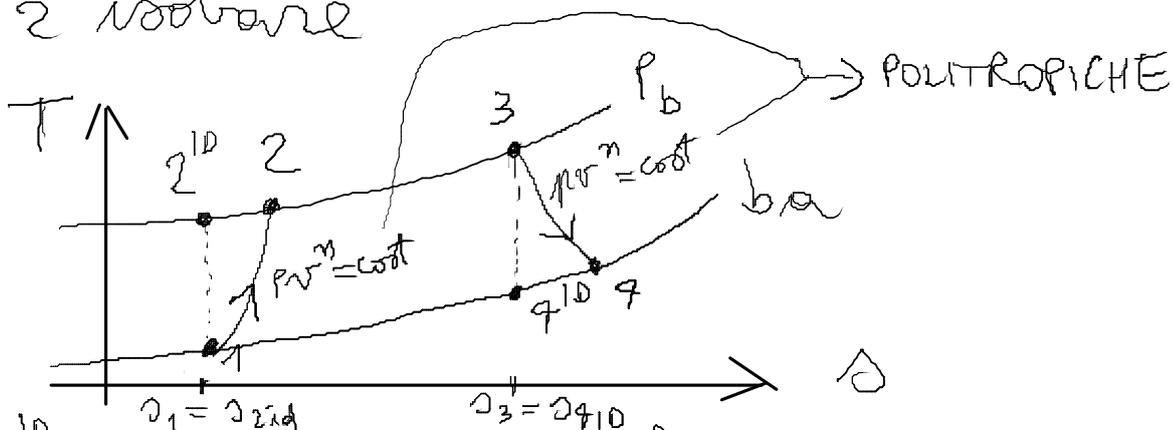
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \gamma_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$\eta = 1 - \gamma_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

CICLO JOULE "REALE"

19

- 2 adiabatiche non reversibili
- 2 isobare



$$s_2 - s_1 = \int_{s_1}^{s_2} \frac{\delta q}{T} \Big|_{\text{irr}} \Rightarrow s_2 = s_1$$

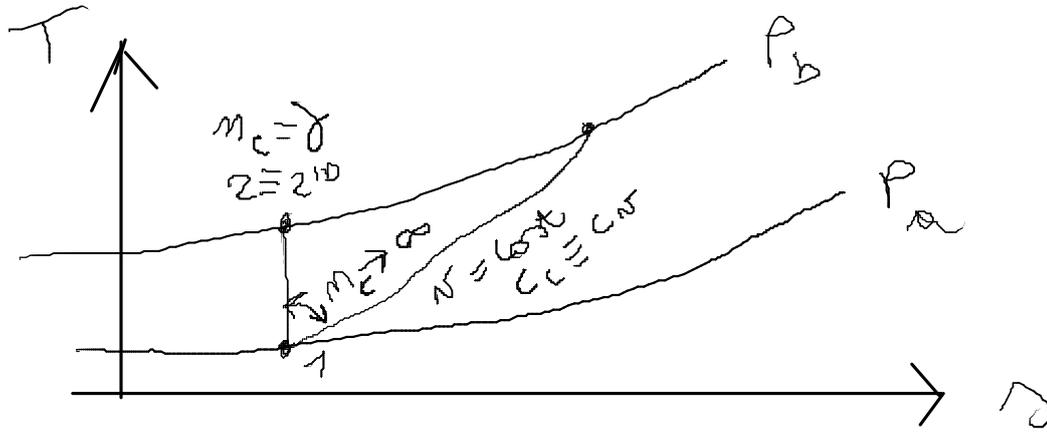
$$s_2 - s_1 = \delta_{\text{irr}} > 0$$

$$s_4 - s_3 = \delta_{\text{irr}} > 0$$

$$l_{a,c} = l_{a,i,c} + l_{c,r}$$

22

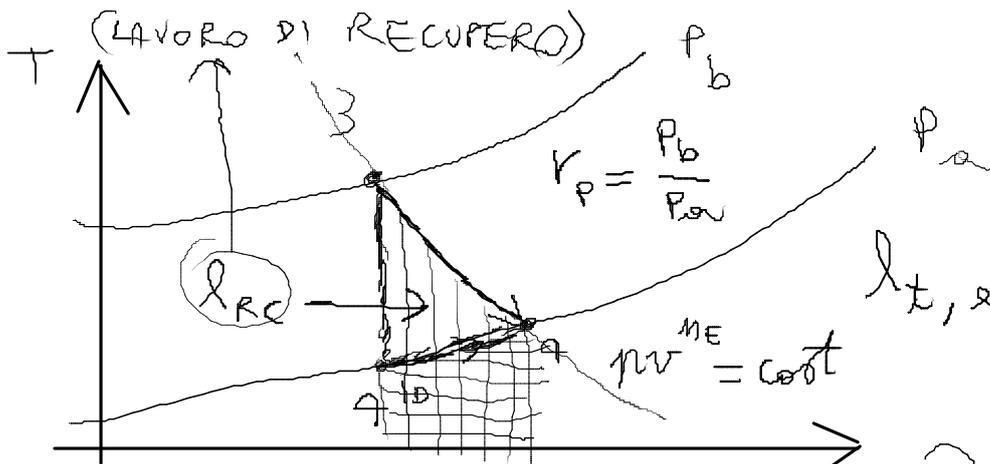
LAVORO DI CONTROLLO RECUPERO



$$m_c = \frac{C_p - C_c}{C_{N'} - C_c}$$

$$C_c = C_{N'} \frac{\gamma - m_c}{1 - m_c} > 0$$

$$\frac{C_c > 0}{m_c \leq 1} \quad \frac{C_c > 0}{m_c \geq \gamma}$$



23

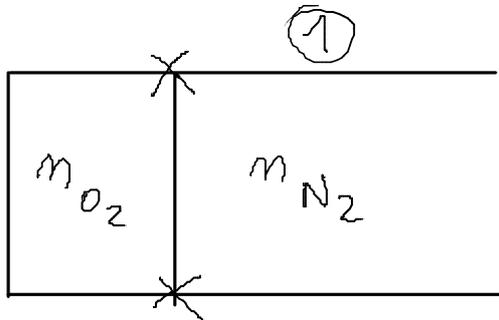
$$\eta_{IS,E} = \frac{|l_{t,e}|}{|l_{t,e}^{10}|} = \frac{C_p (T_3 - T_4)}{C_p (T_3 - T_4^{10})} = \frac{1 - \frac{T_4}{T_3}}{1 - \frac{T_4^{10}}{T_3}}$$

$$\frac{T_4^{10}}{T_3} = \left(\frac{P_b}{P_{a0}}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \Rightarrow T_4 = T_3 \left[1 - \eta_{IS,E} \left(1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right]$$

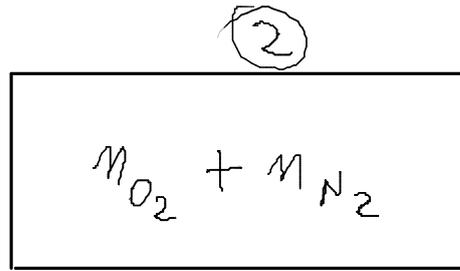
(ESERCIZI)

26

MISCELE IDEALI DI GAS IDEALI



SETTO RIGIDO E
ADIABATICO



Il processo è reversibile?

① → ②

DATI: $m_{O_2} = 2 \text{ moli}$ $V_{O_2} = 3 \text{ m}^3$
 $m_{N_2} = 4 \text{ moli}$ $V_{N_2} = 5 \text{ m}^3$
 $T_1 = T_2 = 400 \text{ K}$

STATO INIZIALE

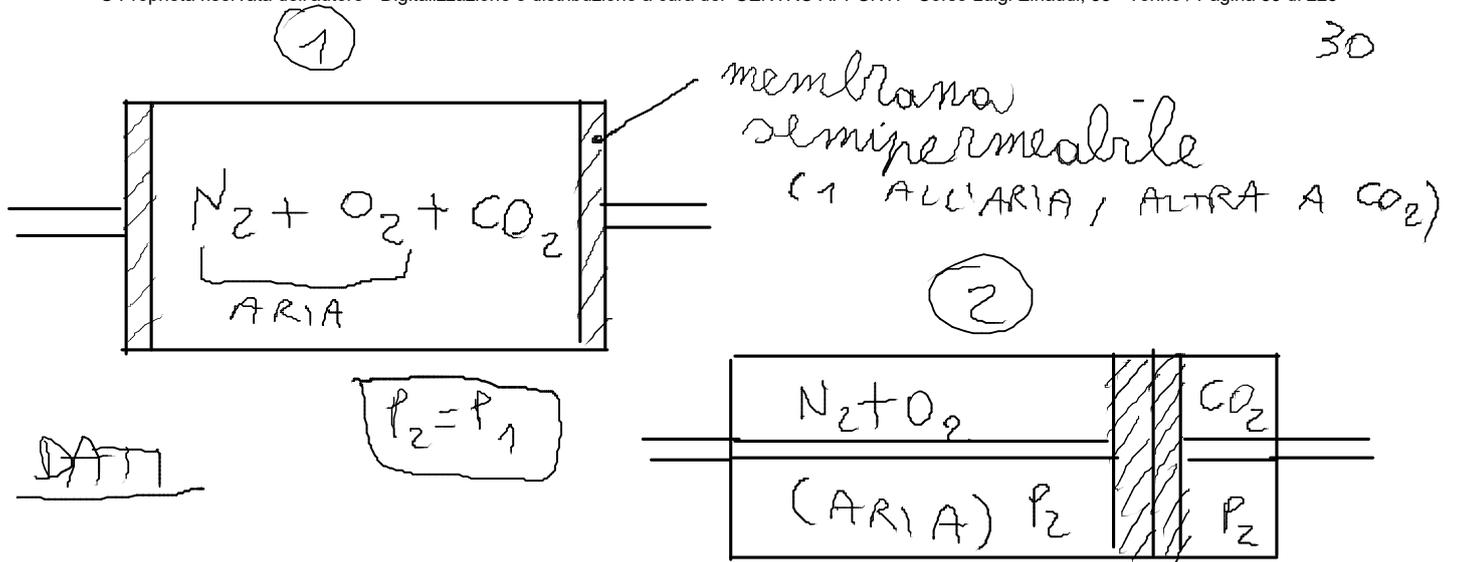
27

$$P_{1,O_2} = \frac{m_{O_2} \bar{R} T_1}{V_{O_2}} \approx 2,217 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_{1,N_2} = \frac{m_{N_2} \bar{R} T_1}{V_{N_2}} \approx 2,661 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

STATO FINALE ($= T_1$)

$$P_2 = \frac{(m_{O_2} + m_{N_2}) \bar{R} T_2}{V_{O_2} + V_{N_2}} \approx 2,494 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$



$T_1 = 300 \text{ K}$ $n_{\text{aria}} = 0,9 \text{ kmol}$

$P_1 = 1 \text{ bar}$ $n_{\text{CO}_2} = 0,1 \text{ kmol}$

RICAVARE IL LAVORO MINIMO PER SEPARARE LA CO₂

STATO INIZIALE

• Pressioni parziali

$P_1 = P_{1, \text{ARIA}} + P_{1, \text{CO}_2}$

$P_{1, \text{ARIA}} = \frac{n_{\text{ARIA}}}{n_{\text{ARIA}} + n_{\text{CO}_2}} \cdot P_1 = 0,9 \text{ bar}$

$P_{1, \text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{ARIA}} + n_{\text{CO}_2}} \cdot P_1 = 0,1 \text{ bar}$

• Volumi parziali

$V = V_{1, \text{CO}_2} + V_{1, \text{ARIA}} = V_{2, \text{CO}_2} + V_{2, \text{ARIA}}$

$V_{1, \text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \frac{\bar{R} T_1}{P_1}$; $V_{1, \text{ARIA}} = n_{\text{ARIA}} \frac{\bar{R} T_1}{P_1}$

STATO FINALE

$V_{2, \text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \frac{\bar{R} T_2}{P_2}$; $V_{2, \text{ARIA}} = n_{\text{ARIA}} \frac{\bar{R} T_2}{P_2}$

BILANCIO DI MASSA (sul vapore)

37

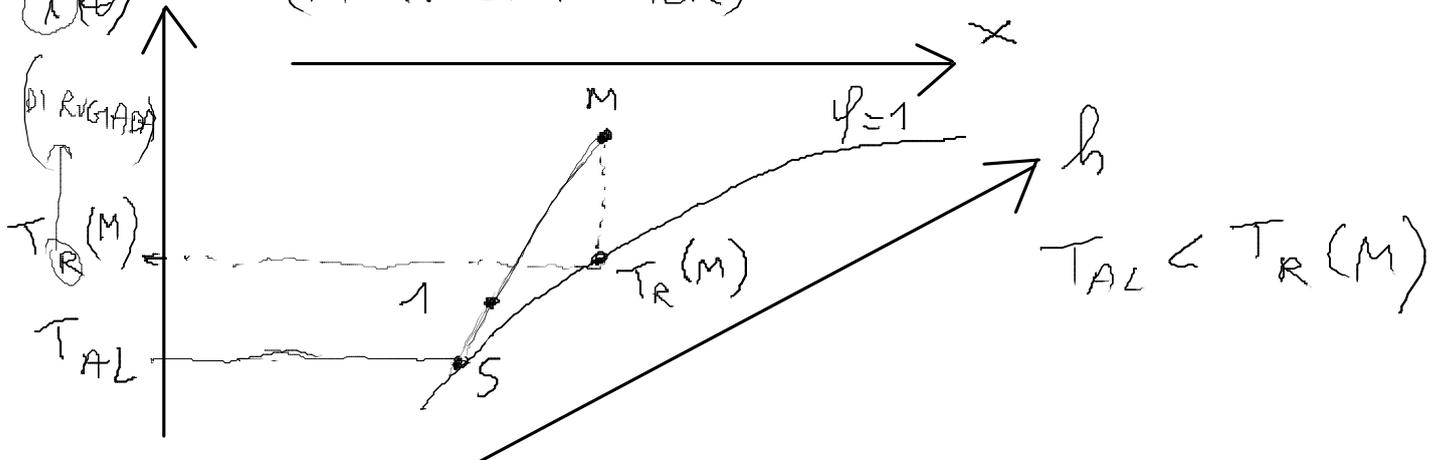
$$G_{bp} X_M + G_S X_S = G_{a1} X_1 = (G_{bp} + G_S) X_1$$

$$\frac{h_1 - h_S}{h_M - h_1} = \frac{G_{bp}}{G_S} = \frac{X_1 - X_S}{X_M - X_1} = f_{bp} \Rightarrow \frac{h_1 - h_S}{X_1 - X_S} = \frac{h_M - h_1}{X_M - X_1}$$

(TEMPERATURA)

$$h_1 = h_S - \left[\frac{X_1 - X_S}{X_M - X_1} \right] (h_M - h_S)$$

(DIAGR. DI MOULIER)



PORTATA D'ARIA DI RICAMBIO

38

$$G_R = \rho_{ARIA} \cdot \frac{2V}{3600} \quad ; \quad \rho_{ARIA} = \frac{P}{RT_A} \quad ; \quad P = 101335 \frac{Pa}{J}$$

$$= 0,12 \frac{kg}{s} \quad ; \quad R_A = 287 \frac{J}{kgK}$$

CARICHI TERMICI ED IGROMETRICI

- CARICO SENSIBILE $\Rightarrow \phi_S = \phi_{EXT} + \phi_{INT} = 10 \text{ KW}$
 - CARICO LATENTE $\Rightarrow \phi_L = G_V \cdot h_V$ (DA METABOLISMO UMANO)
- Temp. a cui è prodotta $C_V : \left(\frac{kg}{s} \right) \rightarrow T_V = 37^\circ C$

VAPORE SATURO A $T_V \Rightarrow h_V = 2569 \frac{kJ}{kg}$

$$\Rightarrow \phi_L = 3,9 \text{ KW}$$

↓ LATENTE

$$h_I = h_A - \left[\frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} \right] (X_A - X_I) \quad 41$$

$$h_I = c_{p,a} T_I + X_I (v_0 + c_{p,v} T_I) \quad c_{p,a} = 1 \frac{kJ}{kgK}$$

\uparrow DATO \rightarrow DA RICAVARE

$c_{p,v} = 1,9 \frac{kJ}{kgK}$
 $v_0 = 2500 \frac{kJ}{kg}$

$$X_I = \frac{\frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} + c_{p,a} T_I - h_A}{\frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} - (v_0 + c_{p,v} T_I)}$$

(DI ARIA SECCA)

ENTALPIA DA T, ψ ; $\psi_A = \frac{p_v}{p_s(T_A)}$

DA TABELLE VAR. H₂O $\Rightarrow p_s(T_A) = 0,03360 \text{ bar}$

$$X_A = 0,622 \frac{\psi_A p_s(T_A)}{p - \psi_A p_s(T_A)} \approx 10,5 \frac{g_v}{kg \text{ a.s.}}$$

$$h_A \approx 52,7 \frac{kJ}{kg \text{ a.s.}}$$

Esercitazione 20 Aprile 2012

42

$$h_i = c_{p,a} T_i + X_i (v_0 + c_{p,v} T_i) \quad \left(\begin{array}{l} a \rightarrow \text{ARIA} \\ v \rightarrow \text{VAPORE} \end{array} \right)$$

$$\frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} = \frac{h_a - h_i}{X_a - X_i}$$

$$X_i = \frac{c_{p,a} T_i - h_a + \frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} \cdot X_a}{\frac{\phi_S + \phi_L}{G_V} - (v_0 + c_{p,v} T_i)} = 0,0092 \frac{kg_v}{kg \text{ a.s.}}$$

$$* h_i = 41,423 \frac{kJ}{kg}$$

Calcolo del fattore di by-pass:

45

$$f_{bp} = \frac{h_1 - h_2}{h_m - h_1} \quad \left(\begin{array}{l} \text{A T BATTERIA IN} \\ \text{SATURAZIONE} \end{array} \right)$$

$$X_D = 0,622 \frac{\psi_s P_{ss}}{P_e - \psi_s P_{ss}}$$

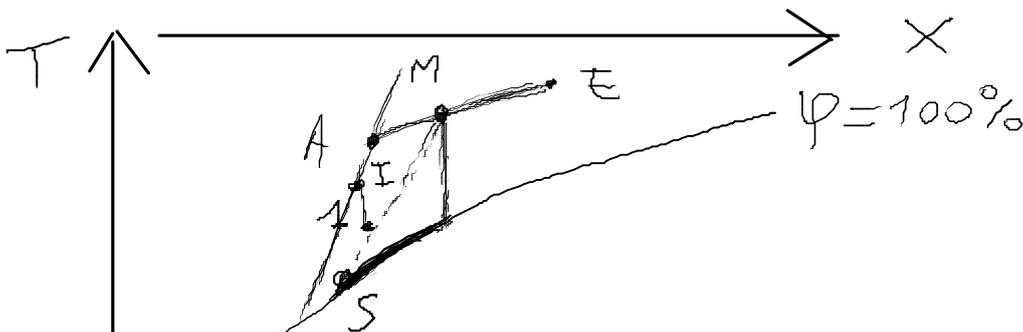
$\psi_s = 1$
condizioni di saturazione

$$P_{ss} = P_{SAT}(T_s) = 0,01228 \text{ bar (da tabelle vapore d'acqua)}$$

$$\begin{aligned} h_s &= c_{pa} T_s + X_s (h_g + c_{pv} T_s) = \\ &= 29,212 \text{ KJ/Kg} \end{aligned}$$

Calcolare l'entalpia in - 1 -

46



(M - I - S → stessa retta)

$$\frac{h_m - h_s}{x_m - x_s} = \frac{h_1 - h_s}{x_1 - x_s}$$

(1 → i risale al titolo cost.)

$$h_1 = (x_1 - x_s) \frac{h_m - h_s}{x_m - x_s} + h_s \quad x_1 = x_i$$

$$h_1 = 40,007 \text{ KJ/Kg}$$

Calore fornito al fluido:

49

$$q^+ = 190 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kgx}}$$

Temperatura sorgente che fornisce calore: $T_s = 1773,15 \text{ K}$

Temperatura del pozzo a cui viene ceduto il calore:

$$T_e = 288,15 \text{ K}$$

Procedura suggerita

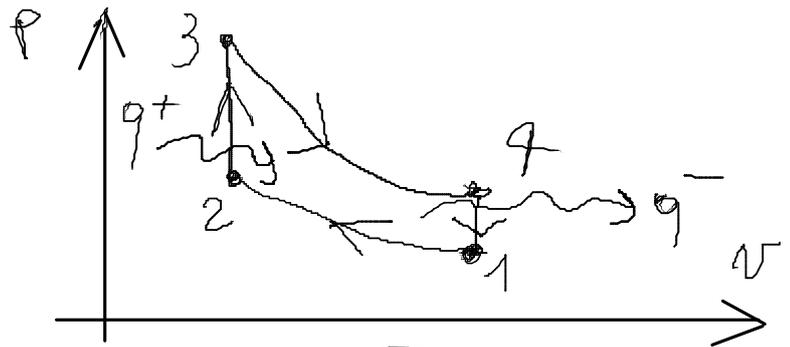
50

Γ_{12} : compressione
isentropanica

Γ_{23} : riscaldamento isocoro
con $q^+ > 0$

Γ_{34} : espansione
isentropanica

Γ_{41} : raffreddamento
isocoro con $q^- < 0$



$$\Gamma_{23} \rightarrow q^+$$

SISTEMA CHIUSO:

$$q - l_i = \Delta U$$

$$l_i = 0$$

Γ_{23} è isocoro

Esercizio N° 3

53

Dati:

ciclo ad aria standard (Proprietà
aria)

Temperatura all'inizio della fase di compressione: $T_1 = 303,15 \text{ K}$

Pressione all'inizio della fase di compressione: $P_1 = 15 \text{ psi}$

Temperatura alla fine della fase di compressione: $T_2 = 673,15 \text{ K}$

Temperatura all'inizio della fase di espansione: $T_3 = 1973,15 \text{ K}$

54

Ciclo Diesel ideale.

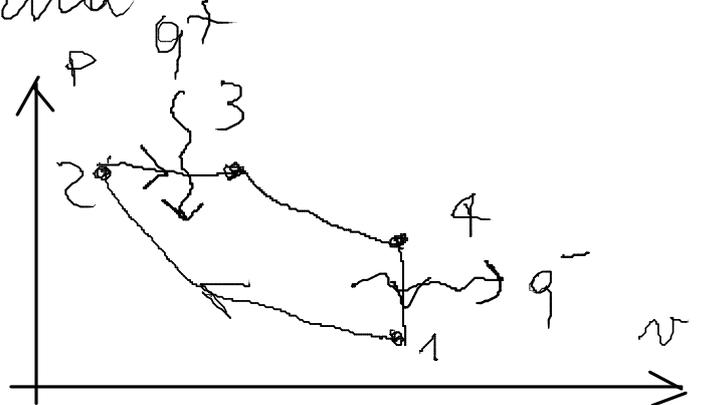
Procedura suggerita

Γ_{12} : compressione isentropica

Γ_{23} : riscaldamento isobaro con $q^+ > 0$

Γ_{34} : espansione isentropica

Γ_{41} : raffreddamento isocoro con $q^- < 0$



$$\rightarrow r_v = \frac{T_1}{T_2}^{\frac{1}{1-\gamma}} = 7,347 \quad 57$$

$$r_c = \frac{T_3}{T_2} = 2,931$$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{r_v^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_c^{\gamma}-1}{r_c-1} = 0,416$$

Esercizio N° 5

58

Dati:

licio ad aria standard

$$\gamma = 1,4; R^* = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}; C_p = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}; C_v = 717,6 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Temperatura all'inizio della fase di compressione: $T_1 = 300,15 \text{ K}$

Temperatura all'inizio della fase di espansione: $T_3 = 1443,15 \text{ K}$

$$\text{Rapporto di compressione: } r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = 11$$

$$\frac{T_{4i}}{T_3} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow T_{4i} = T_3 \gamma_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 727,396 \text{ K} \quad 61$$

Compressore : (STAZIONARIO) (SIST. APERTO)

$$\dot{Q} - \dot{W}_t = \frac{d}{dt} (U + E_c + E_p + P_0 V)_{V_c} + \sum \pm \dot{G}_i (h + r_c + r_p)$$

$$\dot{Q}_{c,i} = \dot{h}_1 - \dot{h}_{2i} = C_p (T_1 - T_{2i}) = -296,53 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

↓ DA EST. A SIST

Turbina

$$\dot{Q}_{e,i} = \dot{h}_3 - \dot{h}_{4i} = C_p (T_3 - T_{4i}) = 718,617 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$\text{Lavoro netto: } \dot{Q}_{n,i} = \dot{Q}_{e,i} + \dot{Q}_{c,i} = 422,09 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Rendimento termico:

$$\eta = 1 - \gamma_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 0,496 \quad 62$$

Reale:

$$\eta_{ic} = \frac{h_{2i} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2i} - T_1}{\eta_{ic}} = 628,313 \text{ K}$$

$$\eta_{ie} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4i}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4i}} \Rightarrow T_4 = 798,971 \text{ K}$$

Lavoro espansione:

$$\dot{Q}_e = C_p (T_3 - T_4) = 646,756 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \quad \left(< \text{ DI QUELLO IDEALE OK! } \right)$$

$$\textcircled{1} \lambda_{aic} = 24,304 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

65

Espansione:

$$\lambda_{aie} = c_x (T_4 - T_3) \textcircled{2}$$

$$\eta_x = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = r_p^{\frac{1-\eta_x}{\gamma}}$$

$$\rightarrow \eta_x = 1,327 ; c_x = -0,158 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$$

$$\textcircled{2} \lambda_{aie} = 101,731 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\lambda_{ai} = \lambda_{aic} + \lambda_{aie} = 126,035 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

Compressore:

66

$$\lambda_{ac} = \lambda_{ic} = 32,947 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} > \lambda_{aic}$$

per effetto del counter-recupero

Turbina:

$$\lambda_{at} = \lambda_{ie} - \lambda_e = 71,861 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} < \lambda_{aic}$$

per effetto del recupero

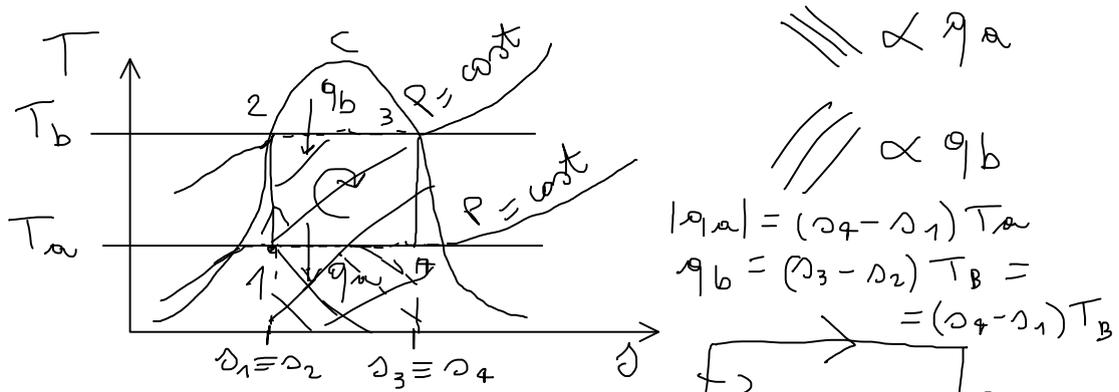
$$\Delta u_{23} = 0 \Rightarrow q_{23} = \lambda_{i23}$$

69

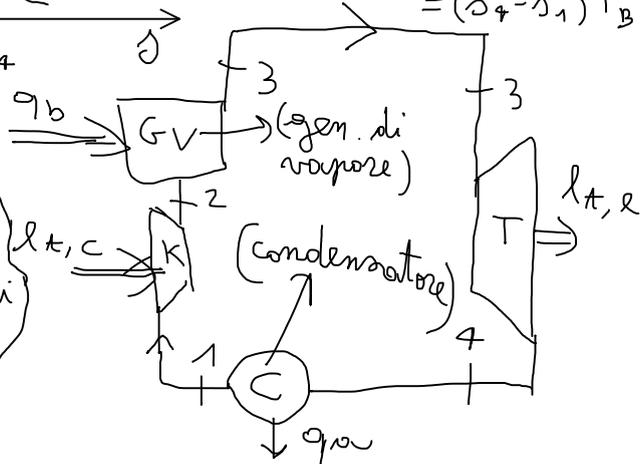
Finire a casa



CICLO DI CARNOT



(K e T non su stesso asse perché le 2 energie scambiate non sono comparabili)
 $(l_{t,c} \ll l_{t,e})$



I° PRINC. $\Delta l_c \approx 0; \Delta l_p \approx 0$, FUNZIONAMENTO STAZIONARIO

$$\phi - W_t = \sum_j \pm G_j h_j$$

$$\phi - W_t = G \Delta h \quad \begin{matrix} 1 \text{ sola ingresso} \\ 1 \text{ sola uscita} \end{matrix}$$

\Downarrow

$$\phi - l_t = \Delta h$$

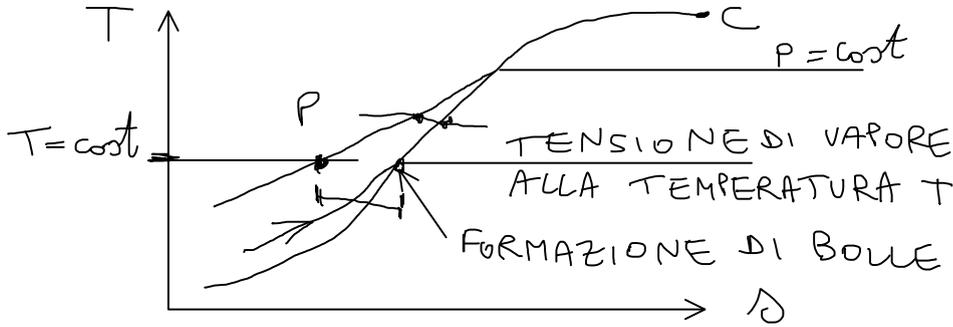
($h_{1 \rightarrow 4}$ DA TABELLE E DIAGRAMMI DEL FLUIDO (FLUIDO NON + IDEALE!))

ENERGIE SCAMBIATE

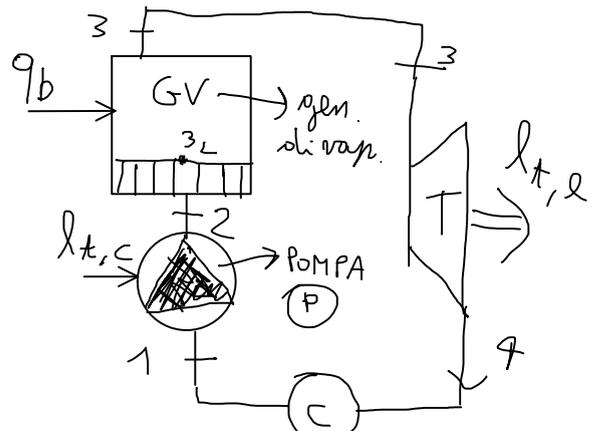
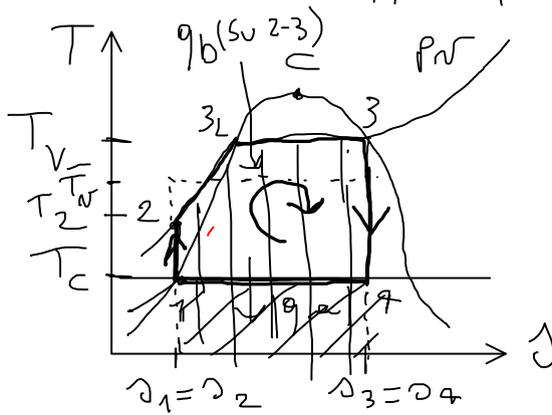
- (K) $-l_{t,c} = h_2 - h_1$ ($q=0$) $l_{t,c} < 0!$
- (T) $-l_{t,e} = h_4 - h_3$ ($q=0$) $l_{t,e} > 0!$
- (GV) $q_b = h_3 - h_2$ ($l_t=0$) $q_b > 0!$
- (C) $q_a = h_1 - h_4$ ($l_t=0$) $q_a < 0!$

CAVITAZIONE (DA EVITARE → DA PROBLEMI MECCANICI)

FORMAZIONE DI BOLLE DI VAPORE CAUSATE DA LOCALI DEPRESSIONI



CICLO RANKINE (A VAPORE SATURO)



(P) I° PRINC. ⇒ $l_{A,c} = h_2 - h_1$ Hp: $v = \text{cost}$ ↓ q_a

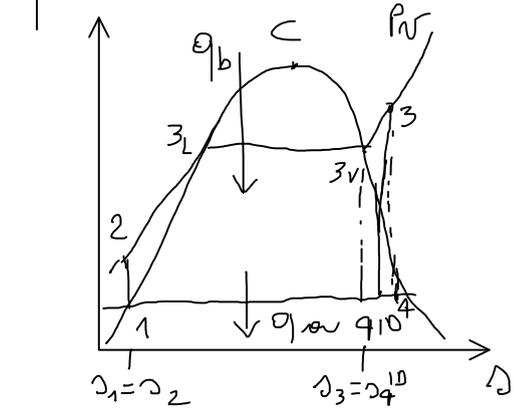
TRASF. 1-2 ($s = \text{cost}$)
 $\Delta_{irr} = 0$

$l_{t,c} = - \int v \, dp \approx v_1 \Delta P$
 $r: v = \text{cost}$

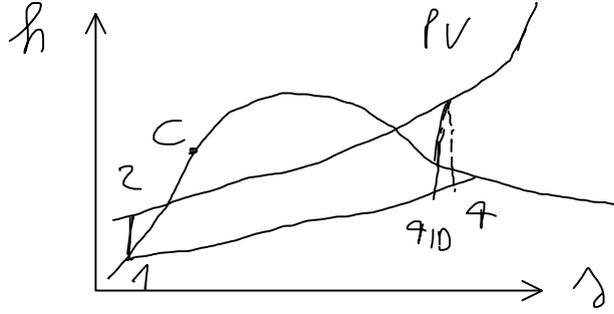
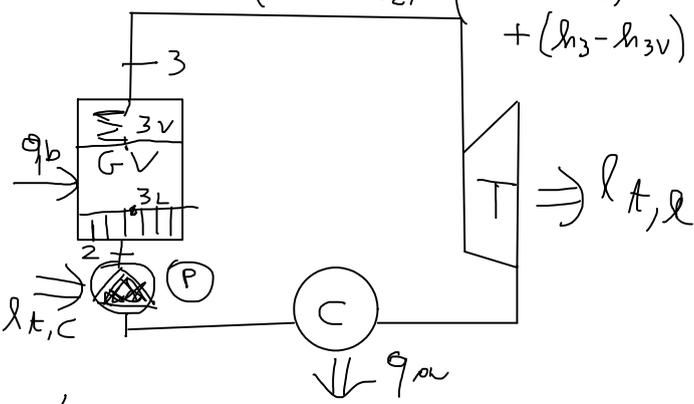
$h_2 \approx h_1 + v_1 (P_2 - P_1)$
 $(\text{IN KJ}) \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) (\text{IN KP}_2)$

$\Delta P = P_2 - P_1$

RANKINE - HIRN

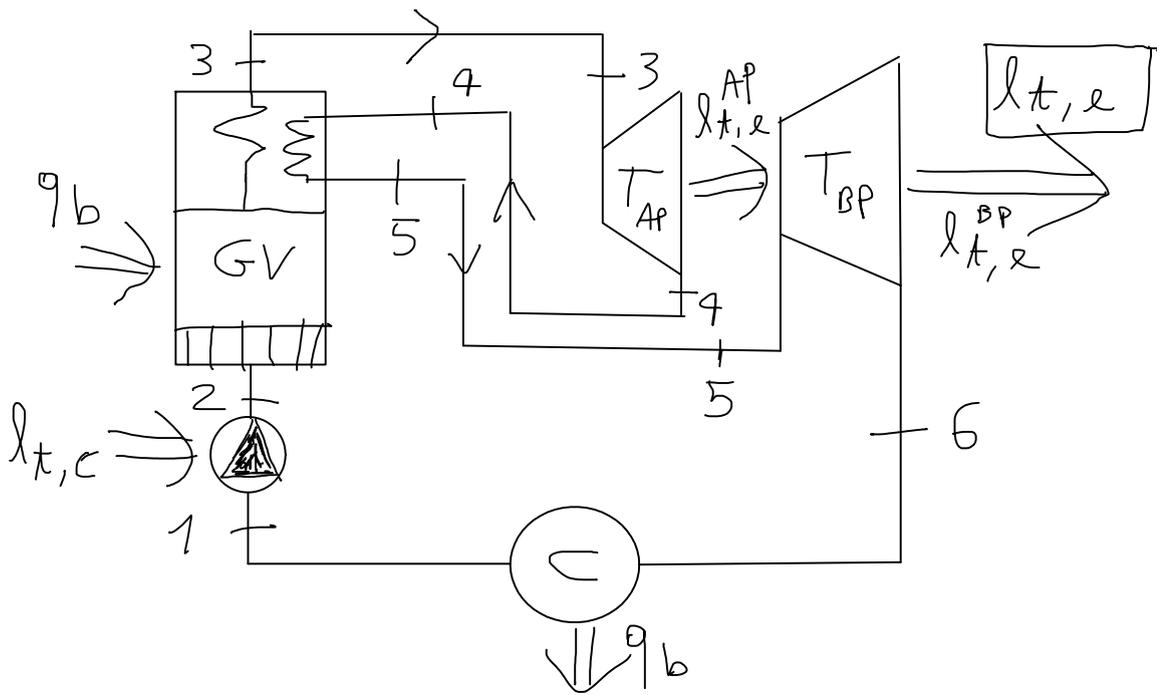


$$q_b = h_3 - h_2 + (h_{3L} - h_2) + (h_{3v} - h_{3L}) + (h_3 - h_{3v})$$

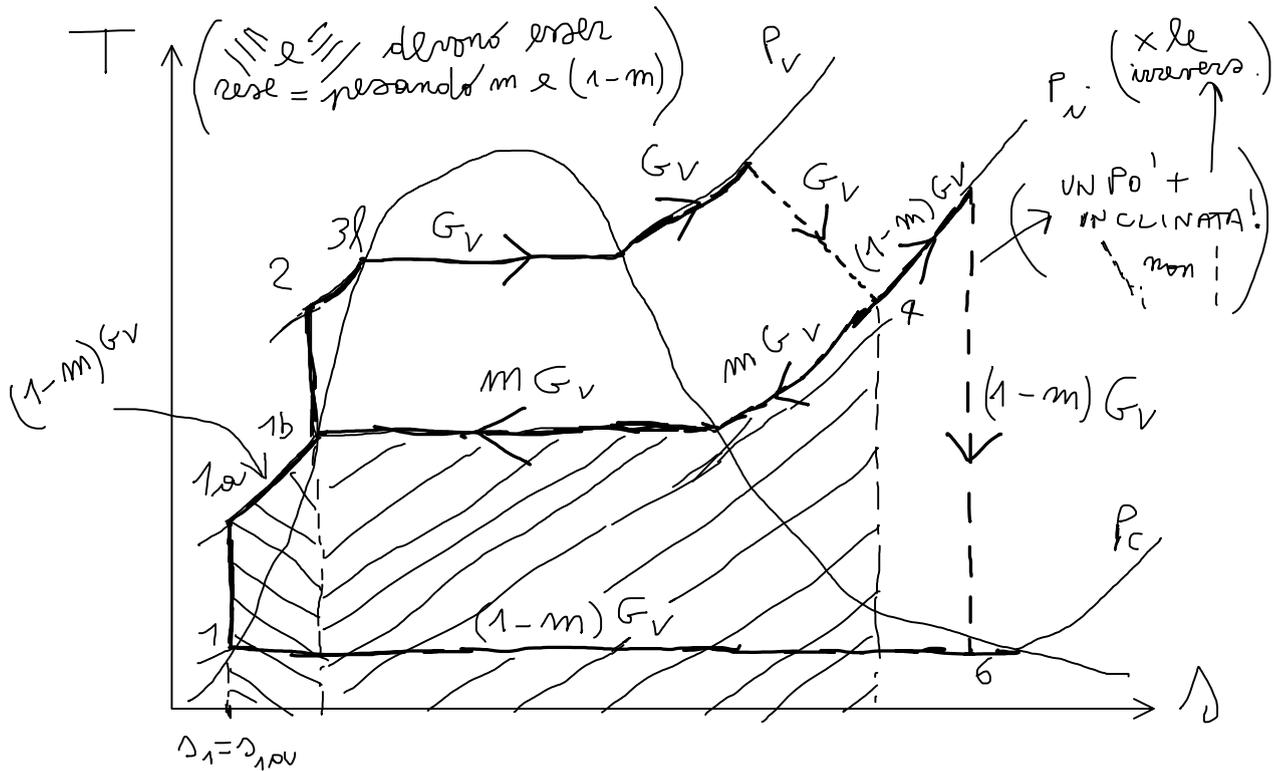
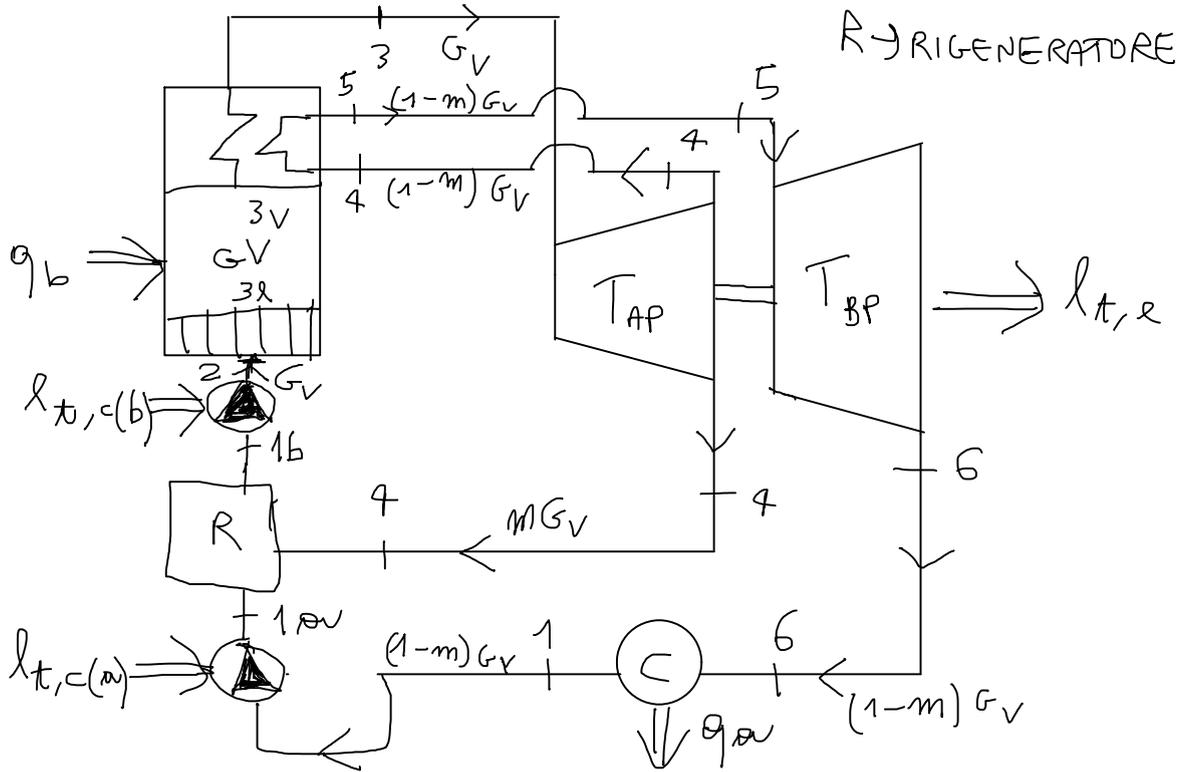


$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

CICLO RANKINE-HIRN CON 1 SURRISCALDAMENTO DI VAPORE



RIGENERAZIONE FRAZIONATA CON SCAMBIATORE A MISCELA



ENERGIE SCAMBIATE

$$q_a = \frac{\phi_a}{G_v} = (1-m)(h_1 - h_6) < 0$$

$$q_b = \frac{\phi_b}{G_v} = (h_3 - h_2) + (1-m)(h_5 - h_4) > 0$$

$$-l_{t,e} = \frac{w_{t,e}}{G_v} = (h_4 - h_3) + (1-m)(h_6 - h_5) > 0$$

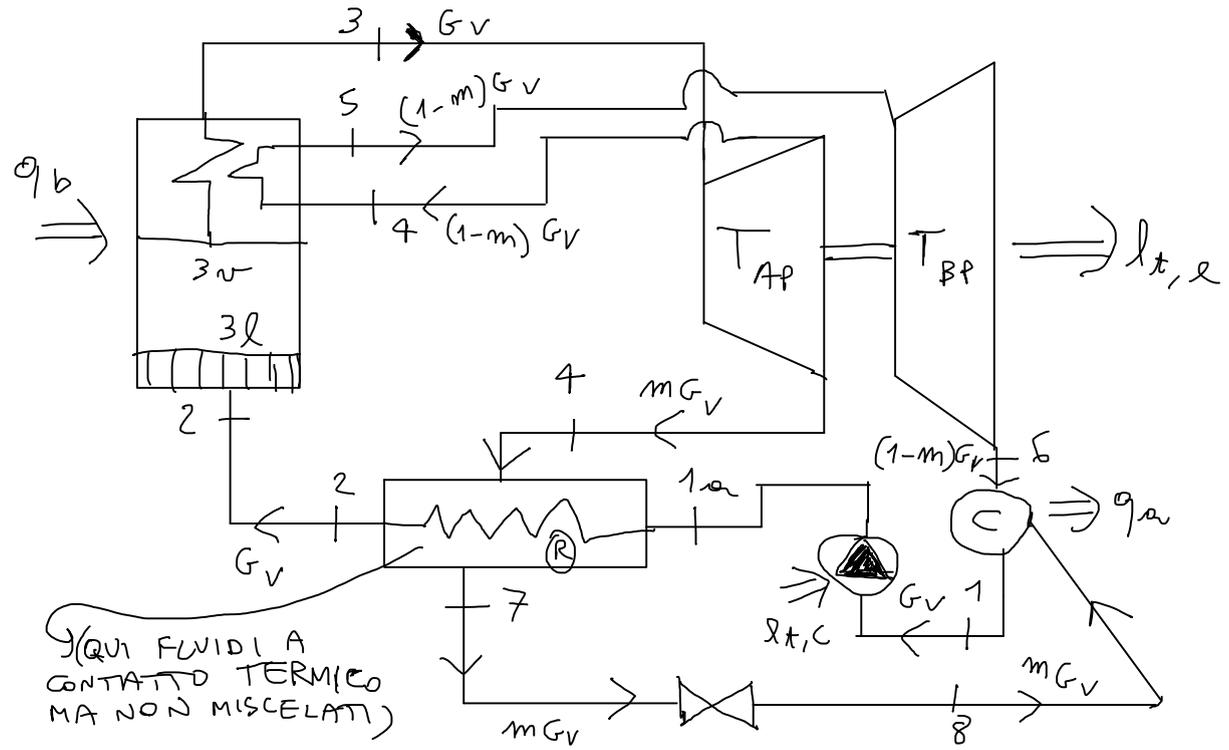
$$-l_{t,c} = -\frac{w_{t,c}}{G_v} \approx (1-m)v_1(p_{1,a} - p_i) < 0$$

IPOTESI DI FLUIDO INCOMPRESSIBILE

$$-l_{t,c}(h) = -\frac{w_{t,c}(h)}{G_v} \approx v_{1b}(p_2 - p_{1b})m < 0$$

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{(1-m)(h_6 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (1-m)(h_5 - h_4)}$$

RIGENERAZIONE CON SCAMBIATORI A SUPERFICIE (FLUIDO NON MISCELATO)



$$T_7 > T_{1,a} ? \iff h_7 = h_{1,a}$$

$$dh = c_p dt - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp$$

$$\text{FLUIDO INCOMPRESS.} \Rightarrow v \approx \text{cost} \Rightarrow \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \approx 0$$

$$\Downarrow$$

$$dh = c_p dt + v dp \quad (\text{per } h_7 = h_{1,a})$$

$$\Downarrow$$

$$h_7 - h_{1,a} = c_p (T_7 - T_{1,a}) + v (P_7 - P_{1,a}) = 0$$

$$T_7 = T_{1,a} + \frac{v}{c_p} (P_{1,a} - P_7) \quad \left\{ \begin{array}{l} P_{1,a} > P_7 \\ \leftarrow (P_v) \quad (P_c) \end{array} \right.$$

$$\Downarrow$$

$$T_7 > T_{1,a} \quad (\text{lo stesso vale i punti 2 e 4})$$

ENERGIE SCAMBIATE

$$\Phi_a = G_v h_1 - m G_v h_a - (1-m) G_v h_6$$

$$q_a = \frac{\Phi_a}{G_v} = h_1 - m h_a - (1-m) h_6 = (h_1 - h_6) + m(h_6 - h_a)$$

$$\Phi_b = G_v (h_3 - h_2) + (1-m) G_v (h_5 - h_4)$$

$$q_b = \frac{\Phi_b}{G_v} = h_3 - h_2 + (1-m)(h_5 - h_4)$$

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b} = 1 - \frac{|(h_1 - h_6) + m(h_6 - h_a)|}{(h_3 - h_2) + (1-m)(h_5 - h_4)}$$

$$\boxed{\eta_{15,2} = \frac{h_{1,2}}{h_{1,2}^{id}} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_6^{id}} \neq \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_6^{id}}}$$

NO!

anche perché $T_6 = T_6^{id}$

$$COP_P - COP_R = 1 \quad \left(\text{POMPA DI CALORE OLTRE} \right. \\ \left. \text{A } q_c \text{ usa anche } l_t \text{ per} \right. \\ \left. \text{scaldare} \right)$$

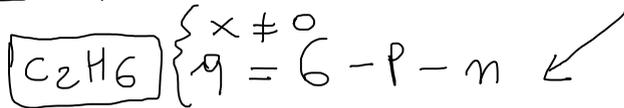
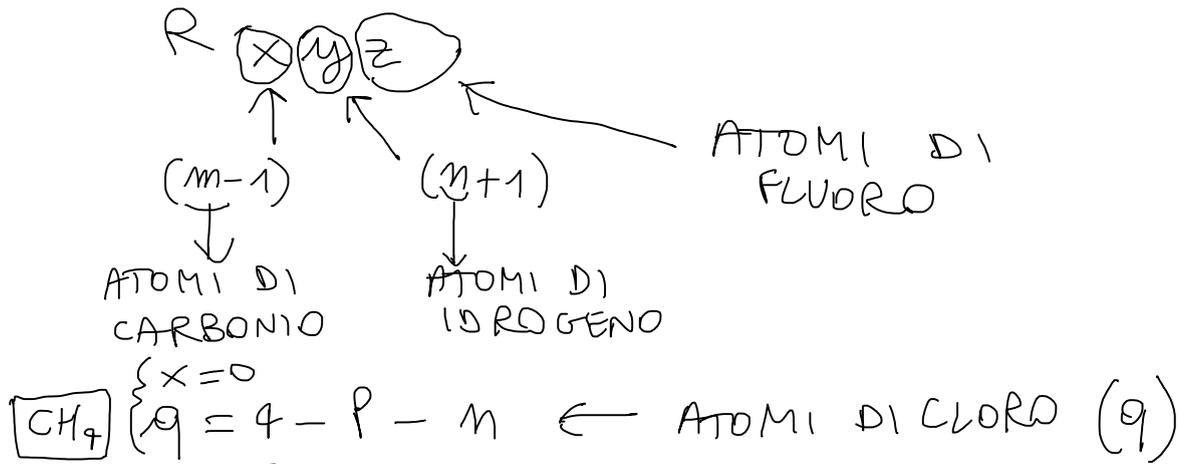
CICLO DI CARNOT INVERSO

$$\forall \text{ CICLO } \left[\begin{array}{l} COP_R = \frac{q_E}{|l_m|} \quad T_E < T_C \\ COP_P = \frac{|q_c|}{|l_m|} \quad \text{POMPA DI CALORE} \end{array} \right.$$

$$COP_P - COP_R = 1$$

$$\left. \begin{array}{l} COP_R = \frac{T_E}{T_C + T_E} \\ COP_P = \frac{T_C}{T_C - T_E} \end{array} \right\} \text{SOLO X} \\ \text{CICLO DI} \\ \text{CARNOT}$$

CLASSIFICAZIONE



(effetto serra) GWT (ANNI IN CUI MOLECOLE RESTANO STABILI) (riduzione potenziale ozono) ODP

(CFC) R12 2900 (SU 100 ANNI effetto di 1Kg R12 come 2900 Kg di CO₂) 1 (=100%)

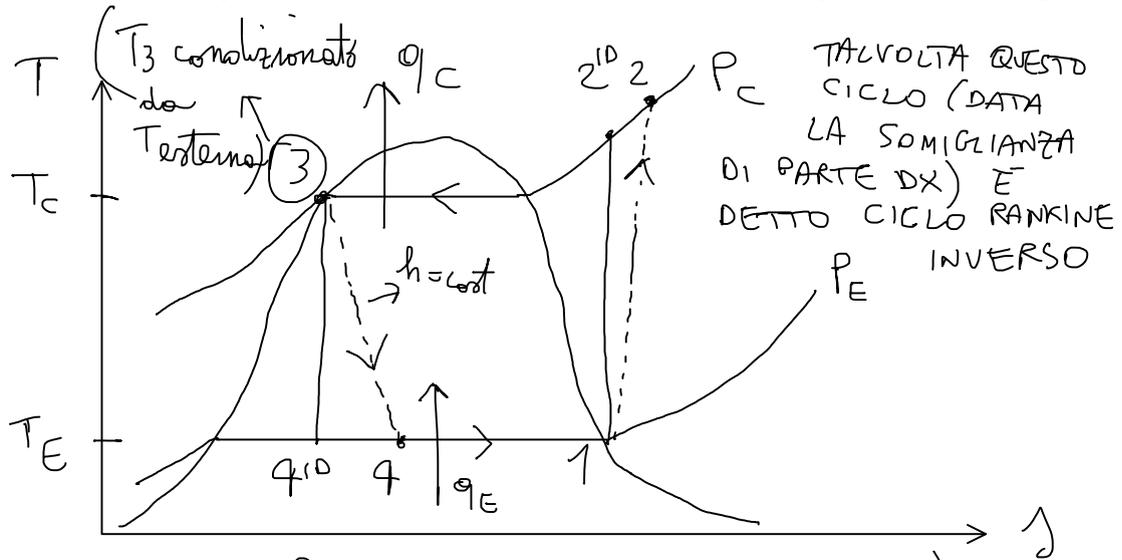
(HFC) R22 1700 0,05

$\boxed{R134a} \quad 1300 \quad \circ$ TETRAFLUORO ETANO $C_2H_2F_4$
 (+ usato)

$\boxed{R152a} \quad 130 \quad \circ$ FLUORO ETANO $C_2H_4F_2$
 (monitor in auto)

$\boxed{CO_2} \quad 1 \quad \circ$

→ ORA SI PENSA DI TORNARE AD USARE LA CO₂ (USARE DIAGRAMMA CON STESSO RIF. X T_{2h} DI TABELLE)
 (SU DIAGRAMMA → 10 bar → 1 MPa CIRCA)
 (v da dm³/Kg a m³/Kg)

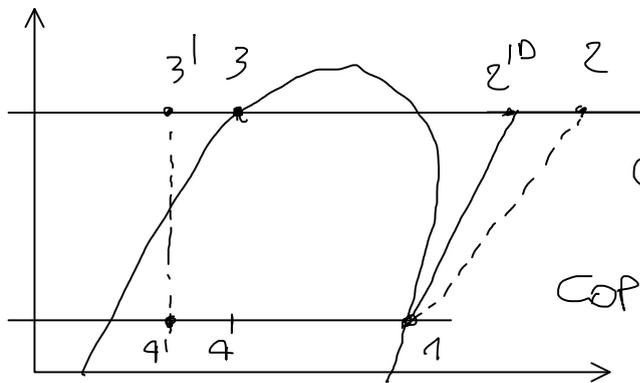


$$COP_f = \frac{q_e}{|q_m|} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \left(\neq \frac{\Delta T_{1-4}}{\Delta T_{2-1}} \right)$$

$$l_m \equiv l_{t,c}$$

$$COP_p = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{|q_c|}{|q_{t,c}|}$$

CICLO INVERSO A SEMPLICE
 COMPRESSIONE CON SOTTO RAFFREDDA =
 = MENTO



$$COP_f = \frac{h_1 - h_4'}{h_2 - h_1}$$

$$COP_p = \frac{h_2 - h_3'}{h_2 - h_1}$$

$\Delta h_E = h_1 - h_4' > h_1 - h_4$ (in 3 si raffredda il MAX POSSIBILE compatibilmente con T esterna)