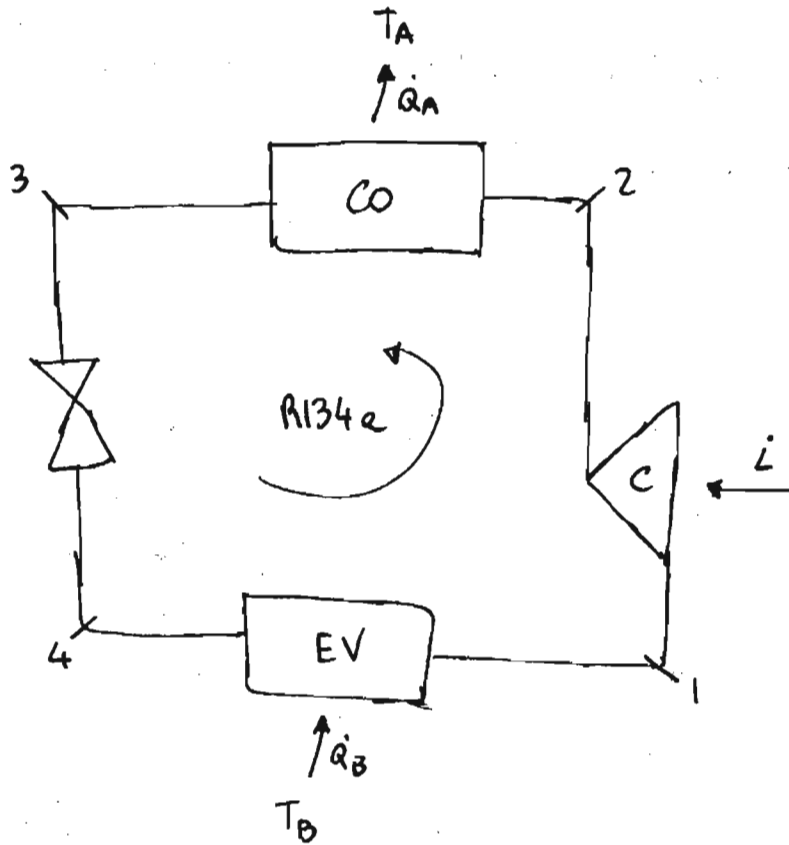


Termodinamica x ingegneri - Es. 3.11



$P_2 = P_3 = 8 \text{ bar}$
 $P_1 = P_4 = 2 \text{ bar}$
 $x_1 = 1 \quad T_2 = 40^\circ\text{C}$
 $T_3 = 10^\circ\text{C} \quad \dot{Q}_A = 5 \text{ kW}$

$c_{p0} = ? \quad u_i = ? \quad L = ?$
 $\eta_{s,c} = ?$

Diagrammi: T-s e P-h

Esplichiamo i risultati:

$$COP_P = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{L}} = \frac{u_i (h_2 - h_3)}{u_i (h_2 - h_1)} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

in realtà già sappiamo che $h_2 - h_3 = 5 \text{ kW}$

$$\dot{L} = u_i (h_2 - h_1) \quad \eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Possiamo sfruttare ciò per u_i :

$$\dot{Q}_A = u_i (h_2 - h_3) \quad u_i = \frac{\dot{Q}_A}{h_2 - h_3}$$

Costruiamo tabella per calcoli dati:

	P	T(°C)	h	s	x
1	②	-10,1 ^B	391,9 ^B	1,73 ^B	①
2s	8 ^A	35 ^E	425 ^E	1,73 ^E	Supr ^E
2	⑧	④0	430 ^C	1,75 ^C	Supr ^C
3	⑧	⑩0	211,5 ^D	1,04 ^D	liq. ^D
4	②	-10,1 ^F	211,5 ^F	1,04 ^F	0,12 ^F

Ⓐ $P_2 = P_{2s}$

Ⓑ Poiché $x_1 = 1$, allora
 $h_1 = h_3(2 \text{ bar}) \quad s_1 = s_3(2 \text{ bar}) \quad T = T_{\text{sat}}$

Ⓒ Conoscendo p e T, valutiamo fase: vapore surriscaldato

Utilizziamo Diagramma p-h

① Conoscendo p e T , valutiamo fase: liquido

Per il calcolo delle proprietà dobbiamo scegliere un punto di riferimento:

→ liquido saturo a $p = 8 \text{ bar}$ ← $p_0 = 8 \text{ bar}$ $h_0 = h_e = 241,7$ $s_0 = s_e = 1,14$ $T_0 = 31,3^\circ\text{C}$

$$h_3 = h_0 + c(T_3 - T_0) + v(p_3 - p_0) = 211,5 \text{ kJ/kg} \quad s_3 = s_0 + e \log \frac{T_3}{T_0} = 1,04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$c = 1,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times R134e$$

② $s_1 = s_{2s}$ - Conoscendo p ed s , determiniamo fase: vapore surriscaldato
 Utilizziamo diagramma $p-h$

③ Calcoliamo anche i dati per stato 4, tenendo presente che $h_3 = h_4$ (x valvola) (calcolo fase, ecc...)

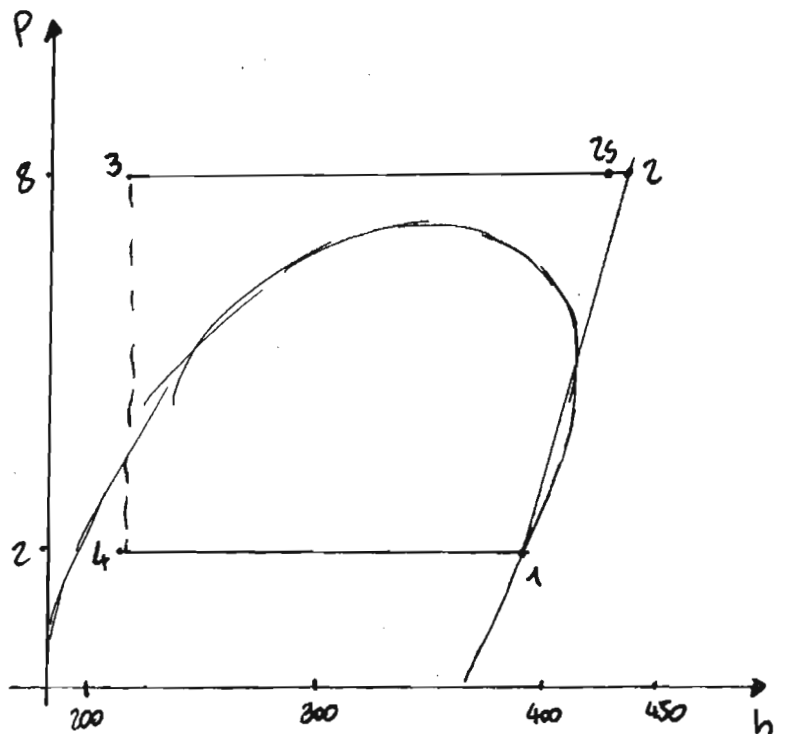
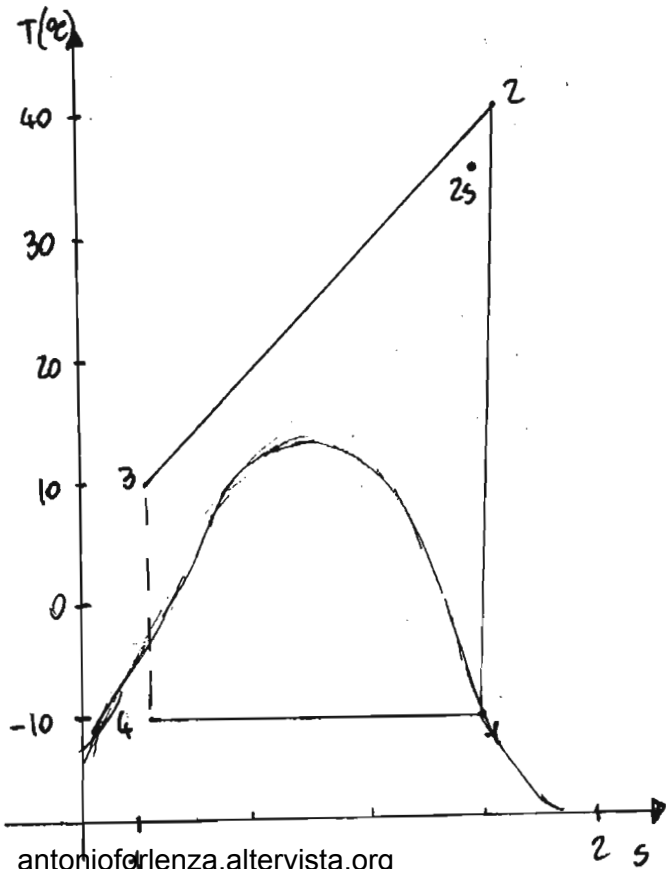
Calcoliamo i risultati:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}(h_2 - h_3) \Rightarrow \dot{m} = 0,023 \text{ kg/s}$$

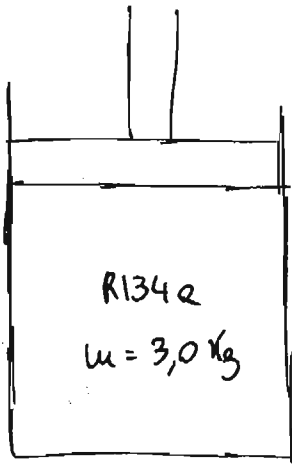
$$\text{COP}_P = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{5}{0,88} = 5,71$$

$$\dot{L} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 0,88 \text{ kW} \quad \eta_{s,c} = 0,87$$

Disegnamo i due diagrammi:



Es. 1



Trasformazioni endoreversibili
 $Q_{ij}, L_{ij}, S_{gen,ij}$

- 1) $T_1 = -20^\circ\text{C}$ $V_1 = 0,18 \text{ m}^3$
↓ Acquisto \dot{Q}_1 $T_A = 25^\circ\text{C}$ $v = \text{cost}$
- 2) $x_2 = 1$
↓ $p = \text{cost}$ $T_B = -10^\circ\text{C}$
- 3) ↓ Adiabatica

	P	T	h	S	x	v	u
1	1,33 ^B	-20 ^B	260,8 ^B	1,24 ^B	0,41 ^B	0,06 ^A	252,8 ^B
2	3,4 ^D	4 ^D	400 ^D	1,72 ^D	1 ^C	0,06 ^C	380 ^D
3	3,4 ^E		267,4 ^F	1,24 ^E	0,32 ^F	0,0196 ^F	260,7 ^F

Ⓐ $V_1 = 0,18 \text{ m}^3 \rightarrow v_1 = \frac{V_1}{m} = 0,06 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Ⓑ Conoscendo p e v , determiniamo fase: vapore saturo

$x_1 = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = 0,41$

$h_1 = h_f + x_1(h_g - h_f) = 260,8 \text{ kJ/kg}$

$s_1 = s_f + x_1(s_g - s_f) = 1,24 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

$p_1 = p_{\text{sat}} \quad u_1 = h_1 - p_1 v_1$

Ⓒ $v_1 = v_2$

Ⓓ Vediamo per quale p e T abbiamo
 $v_s = 0,06 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T_2 = 4^\circ\text{C}$ $p_2 = 3,4 \text{ bar}$

↓
Conoscuti p e T , ottengo $h = h_s$ e $s = s_s$
 $u = h - p v$

Ⓔ $p_2 = p_3$ - Inoltre la trasformazione 3-1 è adiabatica e internamente reversibile: $s_1 = s_3$

Ⓕ Volentieri la fase: vapore saturo

$x_3 = \frac{s - s_f}{s_g - s_f} = 0,32$

$h_3 = h_f + x_3(h_g - h_f) = 267,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$v_3 = v_f + x_3(v_g - v_f) = 0,0196 \text{ m}^3/\text{kg}$

$u_3 = h_3 - p_3 v_3$

TRASF. 1-2

$L_{12} = 0$ ($v = \text{cost}$)

$Q_{12} = \Delta U_{12} = m \Delta u_{12} = 381,6 \text{ kJ}$

$S_{gen,12} = m \Delta s_{12} - \frac{Q_{12}}{T_A} = 0,159 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

TRASF. 2-3

$L_{23} = m p_2 \Delta v_{23} = -41,2 \text{ kJ}$

$Q_{23} = \Delta U_{23} + L_{23} = -399 \text{ kJ}$

$S_{gen,23} = m \Delta s_{23} - \frac{Q_{23}}{T_B} = 0,077 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

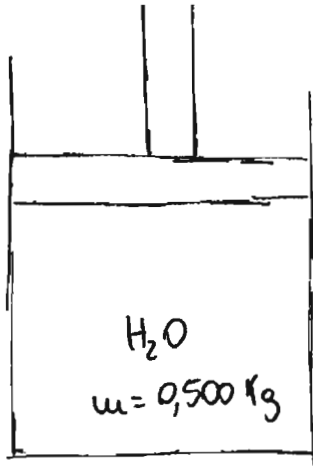
TRASF. 3-1

$Q_{31} = 0$ (adiabatica)

$L_{31} = -m \Delta u_{31} = 23,7 \text{ kJ}$

$S_{gen,31} = 0$

Esercizio sistema chiuso



$S_{gen,INT,i} = 0 \quad \forall$ trasformazione

$L_{ij} = ? \quad Q_{ij} = ? \quad S_{gen,ij} = ?$

1) $p_1 = 20 \text{ bar} \quad T_1 = 400^\circ\text{C}$

↓ Trasf. adiabatica

2) $x_2 = 1$

↓ $p = \text{cost}$ con cessione di Q_F a $T_F = 20^\circ\text{C}$

3)

↓ $v = \text{cost}$ con acquisto di Q_C da $T_C = 500^\circ\text{C}$

1)

	P	T(°C)	h	s	x	v	u
1	20	400	3260 ^A	7,1 ^A	sum. ^A	0,15 ^A	2960 ^A
2	2 ^D	113 ^D	2707 ^D	7,1 ^C	①	0,89 ^D	2529 ^D
3	2 ^E		879,1 ^F	2,48 ^F	0,17 ^F	0,15 ^B	845,1 ^F

Ⓐ Conoscendo p e T , determiniamo fase: vapore surriscaldato Utilizziamo Mollier ($u = h - pv$)

Ⓑ $v_3 = v_1$ Ⓒ La trasf. è adiabatica e internamente reversibile: $s_1 = s_2$

Ⓓ Conoscendo x e s , determiniamo a quali valori di p e T ci troviamo: cioè usiamo per quel valore di p , il vapore saturo secco ha $s = 7, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Trovati p e T , riportiamo anche h_s e v_s inoltre abbiamo $u = h - pv$

Ⓔ Da 2 a 3 $p = \text{cost}$ Ⓕ Conoscendo p e v determiniamo fase: vapore saturo

$$u = h - pv$$

$$L \rightarrow x = \frac{v - v_e}{v_s - v_e} = 0,17$$

$$h = h_e + x(h_s - h_e) = 879,1 \text{ kJ/kg}$$

$$s = s_e + x(s_s - s_e) = 2,48 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Trasf. 1-2

$$Q_{12} = 0 \text{ (trasf. adiabatica)}$$

$$L_{12} = -\Delta U_{12} = -m \Delta U_{12} = 219 \text{ kJ}$$

$$S_{gen_{12}} = m \left(\Delta S_{12} - \frac{Q_{12}}{T} \right) = 0$$

Trasf. 2-3

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + L_{23} = m \Delta U_{23} + L_{23} = -916 \text{ kJ}$$

$$L_{23} = m p_{23} \Delta V_{23} = -74 \text{ kJ}$$

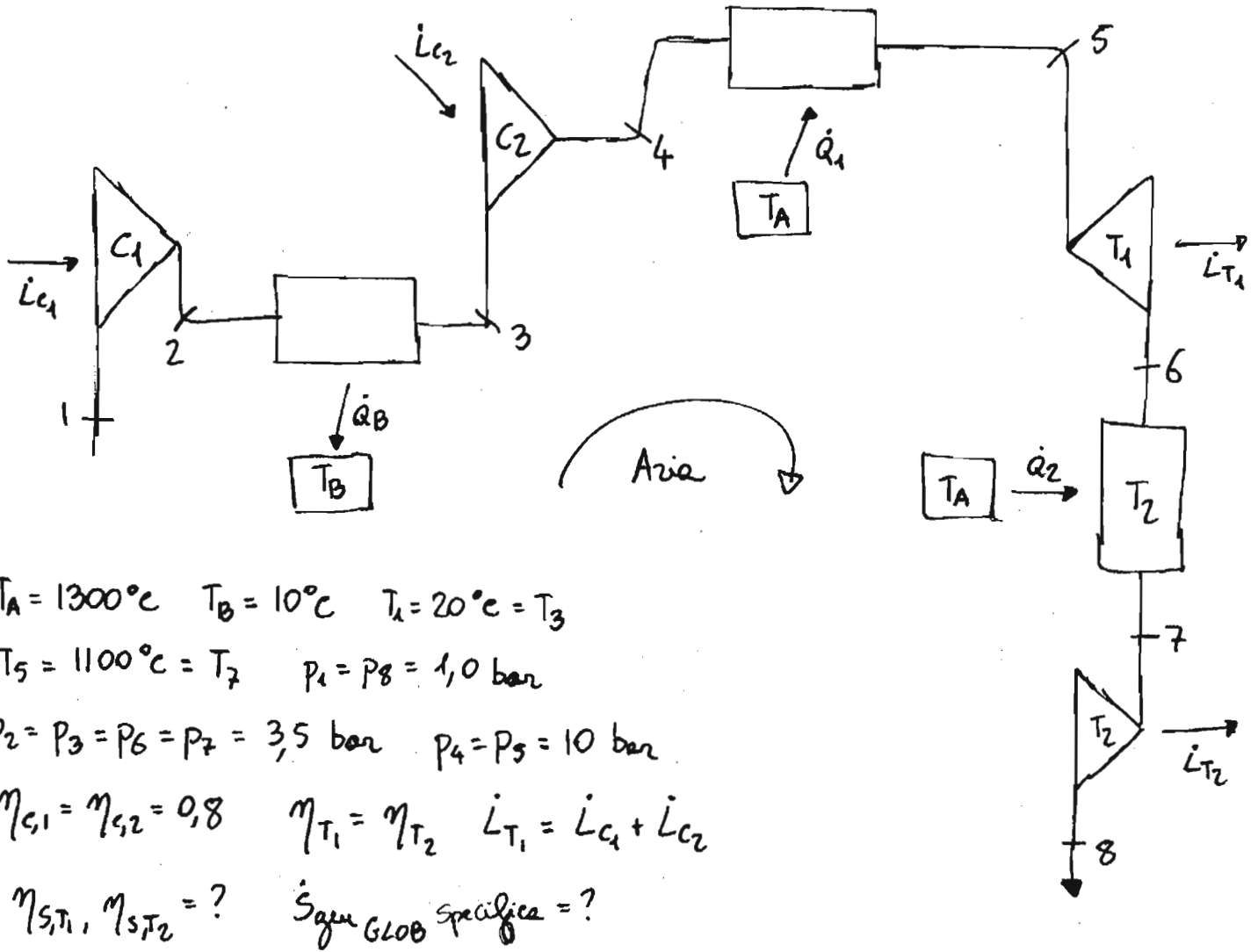
$$S_{gen_{23}} = m \Delta S_{23} - \frac{Q_{23}}{T_f} = 0,81 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

Trasf. 3-1

$$L_{31} = 0 \text{ (v = cost)}$$

$$Q_{31} = \Delta U_{31} = m \Delta U_{31} = 1057,5 \text{ kJ}$$

$$S_{gen_{31}} = m \Delta S_{31} - \frac{Q_{31}}{T_c} = 0,94 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$



Esplichiamo le quantita' da calcolare:

$$\eta_{S,T1} (\text{x i gas}) = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_{6s}} \quad \eta_{S,T2} (\text{x i gas}) = \frac{T_7 - T_8}{T_7 - T_{8s}}$$

Effettuando un bilancio di II legge sul tutto il sistema (lambendo i SET):

$$i s_1 + \frac{\dot{Q}_1}{T_A} + \frac{\dot{Q}_2}{T_A} + \dot{S}_{gen\ GLOB} = \frac{\dot{Q}_B}{T_B} + i s_8$$

$$\dot{S}_{gen\ GLOB} = \frac{\dot{Q}_B}{T_B} - \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{T_A} + i (s_8 - s_1) =$$

$$= \frac{\dot{Q}_B}{T_B} - \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{T_A} + i \left(c_p \log \frac{T_8}{T_1} - R \log \frac{p_8}{p_1} \right)$$

le Q in seguito possiamo esprimere come:
 $\dot{Q} = i \Delta h = i c_p \Delta T$
 x gas

Trattandosi di aria è necessario costruire una tabella x ogni stato, di cui è necessario chiedere soltanto temperatura e pressione:

	P (bar)	T (K)
1	1,0	293
2s	3,5 ^A	421,4 ^B
2	3,5	453,5 ^D
3	3,5	293
4s	10 ^A	397,3 ^C
4	10	423,4 ^E
5	10	1373
6s	3,5 ^A	1012,6 ^C
6	3,5	1082,1 ^F
7	3,5	1373
8s	1,0 ^A	954,8 ^C
8	1,0	1035,5 ^G

(A) gli stati isentropici hanno la stessa pressione di quelli non isentropici:

(B) La trasformazione 1-2s avviene con $\Delta S = 0$
Possiamo applicare la formula: $\epsilon \times aria = 0,29$

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_{2s}}{P_1}\right)^\epsilon = 1,438 \Rightarrow T_{2s} = 421,4 \text{ K}$$

(C) Lo stesso ragionamento fatto in (B) vale x le trasformazioni: 3-4s 5-6s 7-8s

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_{4s}}{P_3}\right)^\epsilon = 1,356 \Rightarrow T_{4s} = 397,3 \text{ K}$$

$$\frac{T_{6s}}{T_5} = \left(\frac{P_{6s}}{P_5}\right)^\epsilon = 0,738 \Rightarrow T_{6s} = 1012,6 \text{ K}$$

$$\frac{T_{8s}}{T_7} = \left(\frac{P_{8s}}{P_7}\right)^\epsilon = 0,695 \Rightarrow T_{8s} = 954,8 \text{ K}$$

(D) Sfruttiamo $\eta_{s,c1} = (\text{x gas}) = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = 453,5 \text{ K}$

(E) Sfruttiamo $\eta_{s,c2} = \frac{T_{4s} - T_3}{T_4 - T_3} \Rightarrow T_4 = 423,4 \text{ K}$

(F) Sfruttiamo la relazione $\dot{L}_T = \dot{L}_{c1} + \dot{L}_2$

$$\dot{x} (h_5 - h_6) = \dot{x} (h_2 - h_1) + \dot{x} (h_4 - h_3) \quad \text{x gas}$$

$$c_p (T_5 - T_6) = c_p (T_2 - T_1) + c_p (T_4 - T_3)$$

$$T_5 - T_6 = T_2 - T_1 + T_4 - T_3$$

$$T_6 = T_5 - T_2 + T_1 - T_4 + T_3 = 1082,1 \text{ K}$$

(G) Equagliamo i rendimenti delle due turbine:

$$\eta_{s,T1} = \eta_{s,T2}$$

$$\frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_{6s}} = \frac{T_7 - T_8}{T_7 - T_{8s}}$$

$$0,807 = \frac{T_7 - T_8}{418,2} \Rightarrow T_8 = 1035,5 \text{ K}$$

Calcoliamo i risultati:

$$\eta_{S,T_1} = \eta_{S,T_2} = 0,807 \quad (\text{già calcolata nel punto G})$$

$$\dot{S}_{gen\ GLOB} = \frac{\dot{Q}_B}{T_B} - \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{T_A} + u_i \left(c_p \log \frac{T_8}{T_1} - R \log \frac{P_8}{P_1} \right) =$$

$\llcorner 0 \times R \quad P_8 = P_1$

La trasmissiono in $u_i c_p \Delta T$ attraverso bilanci di I legge attorno scambiatori:

$$= \frac{u_i c_p (T_2 - T_3)}{T_B} - \frac{u_i c_p (T_5 - T_4) + u_i c_p (T_7 - T_6)}{T_A} + u_i c_p \log \frac{T_8}{T_1}$$

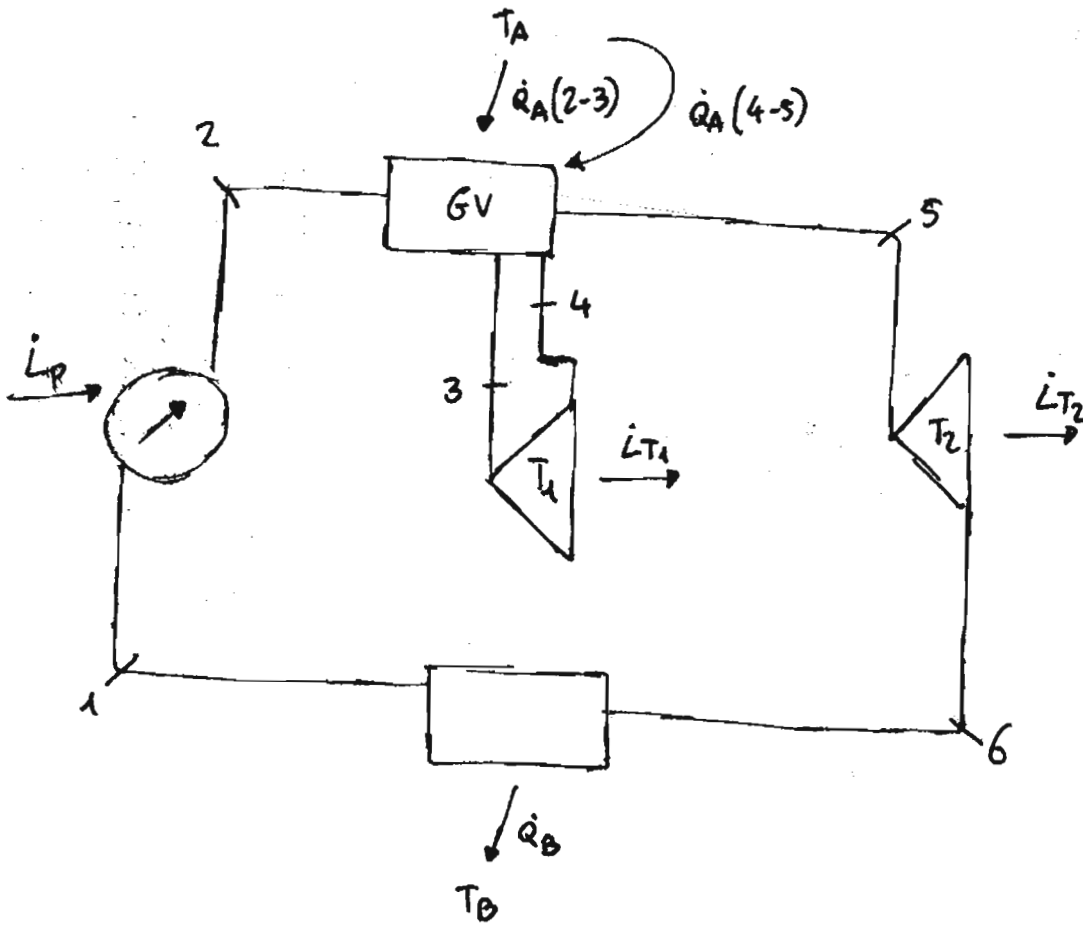
ATTENZIONE!!!

\dot{S}_{gen} è specifica quindi non è necessaria u_i :

$$\dot{S}_{gen\ GLOB} = c_p \left(\frac{T_2 - T_3}{T_B} - \frac{T_5 - T_4 + T_7 - T_6}{T_A} + \log \frac{T_8}{T_1} \right)$$

1)
1,04 $\frac{KJ}{kg\ K}$

Termodinamica per ingegneri - p. 143 n° 2.9



$P_2 = P_3 = 35 \text{ bar}$

$T_3 = 350^\circ\text{C}$

$P_4 = P_5 = 8 \text{ bar}$

$T_5 = 350^\circ\text{C}$

$P_6 = P_1 = 0,1 \text{ bar}$

$\Delta S_{12} = \Delta S_{34} = \Delta S_{56}$
 \parallel
 0

(macchine reversibili)

$\eta_{\text{ciclo}} = ? \quad \text{PHU} = ?$

$x_g = ?$

Ciclo sui piani T_s e h_s

Espletiamo i risultati da ottenere:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{\dot{L}_{T1} + \dot{L}_{T2}}{\dot{Q}_A} = \frac{u_i (h_3 - h_4) + u_i (h_5 - h_6)}{\dot{Q}_A(2-3) + \dot{Q}_A(4-5)} = \frac{h_3 - h_4 + h_5 - h_6}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4}$$

Il SET fornisce due volte energia, x il riscaldamento e il surriscaldamento

$$\text{PHU} = \frac{u_i}{\dot{L}_{T1} + \dot{L}_{T2}} = \frac{1}{h_3 - h_4 + h_5 - h_6}$$

Costruiamo la tabella per esprimere i dati dei vari stati.

Non sono necessari gli stati isentropici poiché le macchine sono reversibili e $2 \equiv 2s \quad 4 \equiv 4s \quad 6 \equiv 6s$

	P	T	h	s	x
1	0,1	319 ^H	191,8 ^H	0,65 ^H	0 ^H
2	35		195,3 ^J	0,65 ^J	liq. ^J
3	35	623	3075 ^A	6,7 ^A	sum. ^A
4	8		2750 ^G	6,7 ^B	sum ^G
5	8	623	3175 ^C	7,45 ^C	sum. ^C
6	0,1		2321 ^F	7,45 ^D	0,89 ^E

Ⓐ Conoscendo p e T, determiniamo fase: vapore surriscaldato
Utilizziamo Mollier x h e s

Ⓑ $\Delta S_{34} = 0 \Rightarrow s_3 = s_4$

Ⓒ Conoscendo p e T, determiniamo fase: vapore surriscaldato
Utilizziamo Mollier x h e s

Ⓓ Sappiamo che

$\Delta S_{56} = 0 \quad s_5 = s_6$

Ⓔ Conoscendo p ed s, determiniamo fase: vapore saturo

$x = \frac{s_6 - s_e}{s_s - s_e} = 0,89$

Ⓕ $h_6 = h_e + x(h_s - h_e) = 2321 \text{ kJ/kg}$

Ⓖ Conoscendo p ed s, calcoliamo fase: surriscaldato
Utilizziamo Mollier

Ⓗ Se non specificato, nel ciclo Rankine, H_2O entra nella pompa come liquido saturo $\Rightarrow x_1 = 0$

$h_1 = h_e \quad s_1 = s_e$
 $p_1 = 0,1 \rightarrow T_1 = T_{sat}$

Ⓙ $\Delta S_{12} = 0 \quad s_1 = s_2$ - Conoscendo ora p ed s, determiniamo fase: liquido.

$h_2 = h_0 + c(T_2 - T_0) + v(p_2 - p_0)$ Rendiamo come riferimento: stato 1
 $\Delta S_{12} = c \log T_2/T_1 = 0 \Rightarrow T_2 = T_1$

$h_2 = 191,8 + 3,49 = 195,3 \text{ kJ/kg}$

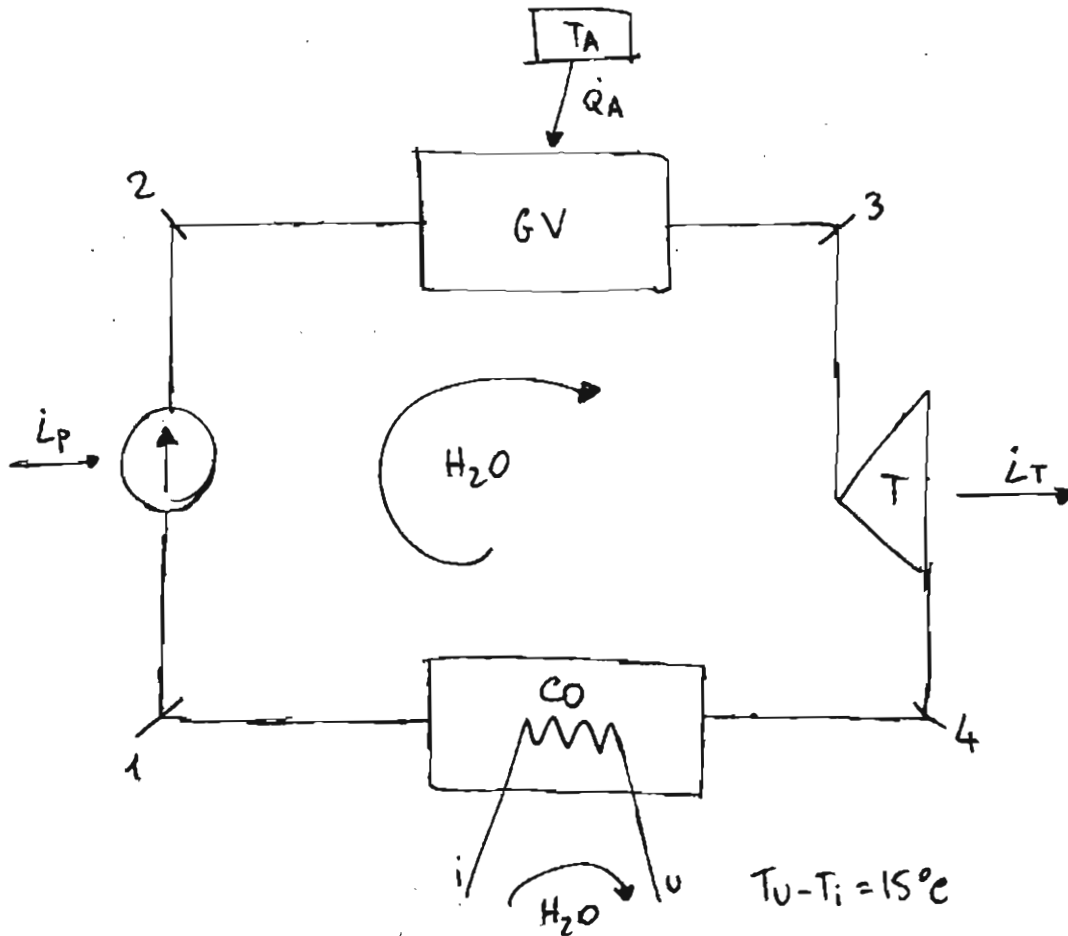
Calcoliamo i risultati:

$\eta_{ciclo} = \frac{h_3 - h_4 + h_5 - h_6}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4} = \frac{1179}{3305} = 0,357$

$x_6 = 0,89$

$PMU = \frac{1}{1179} = 8,48 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{kJ}}$

Termodinamica x ingegneri - Es. 2.8

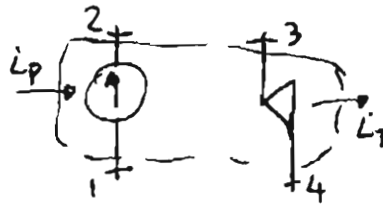


$P_3 = 80 \text{ bar}$
 $T_3 = 480^\circ\text{C}$
 $\eta_{s,T} = 0,88$
 $P_1 = P_4 = 0,08$
 $\eta_{s,P} = 0,70$
 $\dot{L}_T - \dot{L}_P = 100 \text{ MW}$
 $\eta_{ciclo} = ?$
 $w_i = ?$
 $w_{cH} = ?$

Esplichiamo i risultati:

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{L}_T - \dot{L}_P}{w_i(h_3 - h_2)}$$

Effettuiamo un bilancio di I legge su una superficie che comprende pompa e turbina:



$$\dot{L}_P + w_i h_1 + w_i h_3 = \dot{L}_T + w_i h_2 + w_i h_4$$

↓

$$\dot{L}_T - \dot{L}_P = w_i (h_1 + h_3 - h_2 - h_4)$$

$$w_i = \frac{\dot{L}_T - \dot{L}_P}{h_1 + h_3 - h_2 - h_4}$$

Bilancio di I legge attorno al condensatore:

$$w_i h_4 + w_{cH} h_i = w_i h_1 + w_{cH} h_u$$

$$w_{cH} = w_i \frac{h_4 - h_1}{h_u - h_i}$$

→ Poiché H₂O è allo stato liquido:

$$\Delta h = c \Delta T + v \Delta p \Rightarrow h_u - h_i = c \Delta T$$

x K scambi di calore

Costruiamo la tabella x i dati:

	p (bar)	T (°C)	h	s	x
1	0,08	41,5 ^E	173,9 ^E	0,59 ^E	0 ^E
2s	80 ^D	41,5 ^F	181,8 ^F	0,59 ^F	liq. ^F
2	80 ^D		185,2 ^G		
3	80	480	3350 ^A	6,66 ^A	sur. ^A
4s	0,08 ^B		2072 ^B	6,66 ^B	0,79 ^B
4	0,08		2225 ^C		

(A) Conoscendo p e T determiniamo
 la fase: vapore surrisc.
 Utilizziamo Mollier

$$(B) s_3 = s_{4s} \quad p_4 = p_{4s}$$

Conoscendo p ed s, determiniamo
 la fase: vapore saturo

$$x_{4s} = \frac{s_{4s} - s_e}{s_s - s_e} = 0,79$$



Possiamo calcolare h_{4s} :

$$h_{4s} = h_e + x_{4s} (h_s - h_e) = 2072 \text{ kJ/kg}$$

(C) Sfruttiamo η_{sc} :

$$\eta_{sc} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \Rightarrow h_4 = h_3 - \eta_{sc} (h_3 - h_{4s}) = 2225 \text{ kJ/kg}$$

(D) Sappiamo che $p_2 = p_3$ e $p_{2s} = p_2$

(E) Se non specificato, l'acqua entra nella
 pompa come liquido saturo: $x_1 = 0$

$$h_1 = h_e = 173,87 \text{ kJ/kg} \quad s_1 = s_e = 0,59 \text{ kJ/kgK}$$

$$T = T_{sat} = 41,5^\circ\text{C}$$

(F) $s_1 = s_{2s}$ - Conoscendo p ed s,
 determiniamo fase: liquido

$$\Delta s = 0 = c \log \frac{T_{2s}}{T_1} \Rightarrow T_{2s} = T_1$$

$$h_{2s} = h_1 + c \Delta T + \sqrt{\Delta p} = 181,8 \text{ kJ/kg}$$

(riscaldamento: 1)

$$(G) \text{ Sfruttiamo } \eta_{sp} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,7$$

$$\Downarrow$$

$$h_2 = 185,2 \text{ kJ/kg}$$

Calcoliamo i dati prima solo esplicitati in formule:

$$\dot{m}_i = \frac{100000}{1114} = 89,8 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_H = \dot{m}_i \frac{h_4 - h_1}{c \cdot 15^\circ\text{C}} = 2,9 \cdot 10^3 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{100000}{89,8 (3165)} = 0,35$$

	P	T(°C)	h	s	x
1	0,05	33	137,8	0,48	0
2	170		154,8	0,48	liq.
3	170	550	3429	6,45	svmr
4	30		2943	6,45	svmr.
5	30	550	3570	7,38	svmr
6	0,05		2246,4	7,38	0,87

(A) gli scambi di calore avvengono isoboricamente $P_1 = P_6$ $P_2 = P_3$ $P_4 = P_5$

(B) Identifichiamo sulle tabelle h_e e s_e e T_{sat} a $p = 0,05$ bar poiché sappiamo che in 1 vi è liquido saturo

(C) Conoscendo p e T , identifichiamo la fase: vapore surriscaldato (sia x il punto 3 che per 5)
Utilizziamo Mollier x escludere i vari dati

(D) Sappiamo che $z \cong z_5$ ecc...
quindi $s_1 = s_{2s} = s_2$ così anche $s_3 = s_4$ $s_5 = s_6$

(F) Conoscendo p ed s , determiniamo fase:
vapore surriscaldato leggiamo h da Mollier

(G) Conoscendo p ed s , determiniamo fase:
vapore saturo

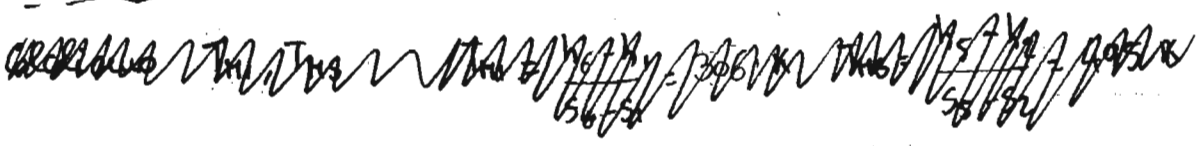
$$h_6 = h_e + x_6(h_s - h_e) = 2246,4 \text{ kJ/kg}$$

$$x_6 = \frac{s - s_e}{s_s - s_e} = 0,87$$

(E) Conoscendo p ed s , det. fase: liquido. Per il calcolo di h , prendiamo come riferimento 1

$$h_2 = h_1 + c(T_2 - T_1) + v(P_2 - P_1)z$$

$$= 154,8 \text{ kJ/kg}$$



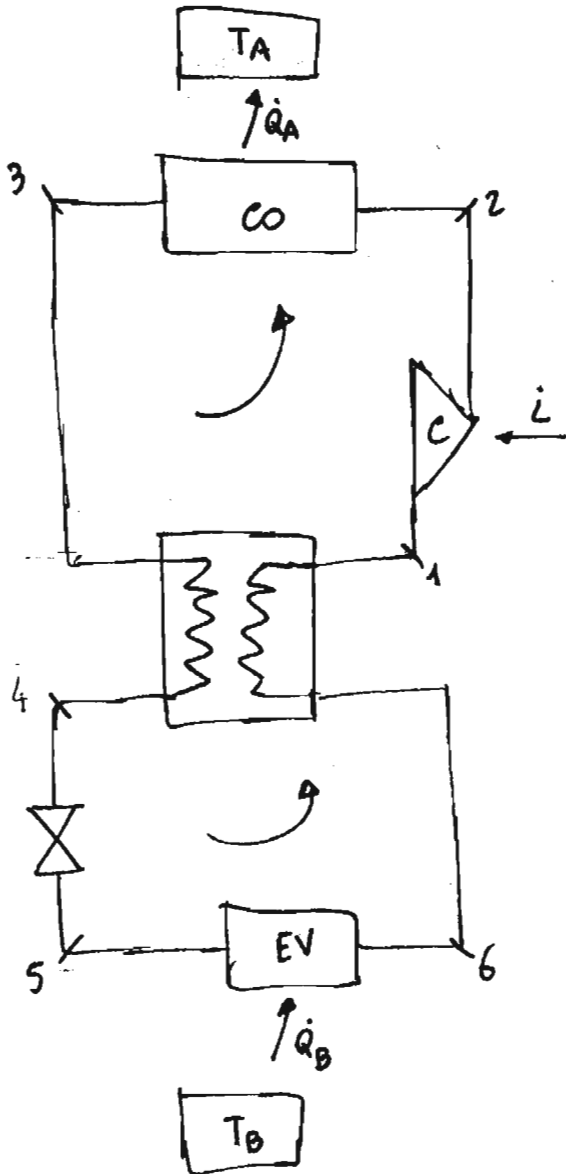
Calcoliamo η_{acco} nei due modi:

$$\eta_{acco} = \frac{h_3 - h_4 + h_5 - h_6}{h_3 - h_2 + h_5 - h_4} = 0,46$$



Termodinamica x ingegneri - Es. 3.5

Ciclo frigorifero



$P_5 = P_6 = 2,00 \text{ bar}$

$P_2 = P_3 = 7,7 \text{ bar}$

$x_6 = 1 \quad x_3 = 0$

$\eta_{s,c} = 0,8$

$T_3 - T_4 = 10^\circ\text{C}$

$\dot{Q}_B = 1 \text{ kW}$

$\text{COP}_F = ?$

$\dot{V}_1 = ?$

Espliecitiamo i risultati:

$$\text{COP}_F = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{L}} = \frac{u_i (h_6 - h_5)}{u_i (h_2 - h_1)} = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_1}$$

$$\dot{V}_1 = u_i v_1$$

(A) Poiché $x_3 = 0$

$h_3 = h_e \quad s_3 = s_e \quad T_3 = T_{\text{sat}}$

(effettuando interpolazione)

(B) Poiché $x_6 = 1$

$h_6 = h_s \quad s_6 = s_s \quad T_6 = T_{\text{sat}}$

(C) $T_3 - T_4 = 10$

$T_4 = T_3 - 10 = 20^\circ\text{C}$

Inoltre $P_3 = P_4 \times K$ gli scambi di calore avvengono lungo isobore (diunque anche $P_1 = P_6$)

Costruiamo la tabella x il ciclo dei dati richiesti:

	P	T(°C)	h	s	x
1	2 ^c	8 ^G	406 ^F	1,78 ^G	sup. ^G
2s	7,7 ^H	50 ^J	440 ^J	1,78 ^H	sup. ^J
2	(7,7)		449 ^K		
3	(7,7)	30 ^A	240 ^A	1,13 ^A	(0)
4	7,7 ^C	20 ^C	226 ^D	1,08 ^D	liq. ^D
5	(2)		226 ^E		
6	(2)	-10 ^B	391,9 ^B	1,73 ^B	(1)

④ Conoscendo p e T determiniamo fase: liquido

$$h_4 = h_0 + c(T_4 - T_0) + v(p_4 - p_0) \quad \text{scegliamo come rif. stato 3}$$

↓

$$h_4 = h_3 + c(T_4 - T_3) + v \cdot 0 = 226 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$c = 1,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Lo stesso vale $\times s$: $s_4 = s_3 + c \log \frac{T_4}{T_3} = 1,08$

⑤ In la solida di liquefazione vale: $h_4 = h_5$

⑥ Effettuando un bilancio di I legge attorno allo scambiatore di calore interno

$$u_i h_6 + u_i h_3 = u_i h_4 + u_i h_1$$

$$h_4 = h_6 + h_3 - h_1 = 406 \text{ kJ/kg}$$

⑦ Conoscendo p ed h , determiniamo fase: vapore surr. → Diagramma $p-h$

⑧ $s_1 = s_{2s}$ $p_2 = p_{2s}$

⑨ Conoscendo p ed s , determiniamo

fase: vapore surr. → Diagramma $p-h$

Calcoliamo anche

$$v_1 = \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{9} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

⑩ Sfruttiamo $\eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s,c}}$

E' necessario inoltre calcolare u_i : lo facciamo
con un bilancio di I legge attorno all'evaporatore:

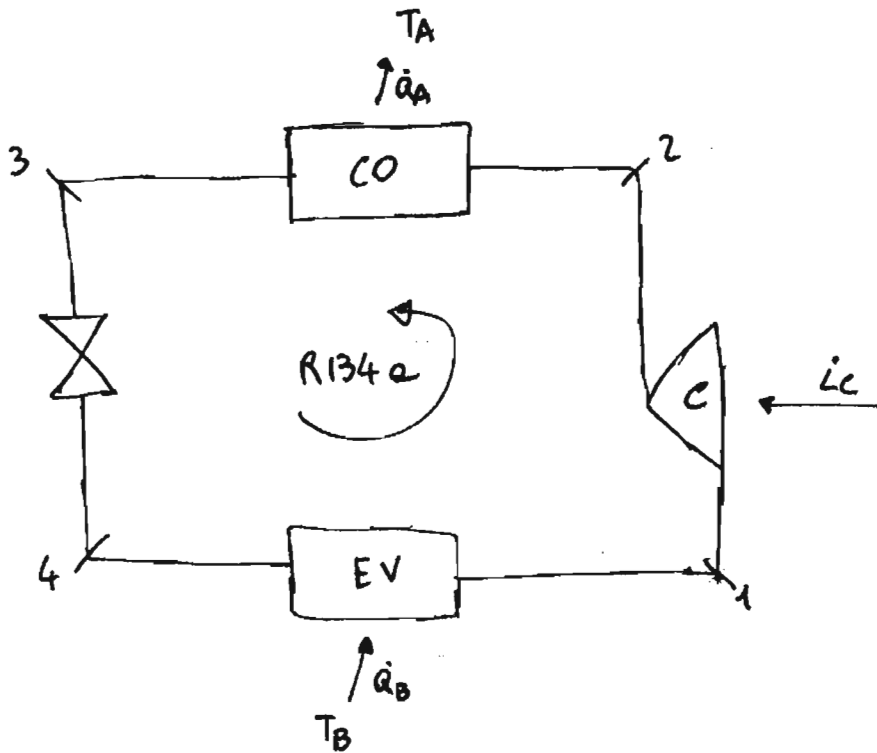
$$u_i h_5 + \dot{Q}_0 = u_i h_6 \rightarrow u_i = \frac{\dot{Q}_0}{h_6 - h_5} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Procediamo al calcolo dei risultati:

$$\dot{V}_1 = u_i v_1 = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{COP}_F = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_1} = 3,9$$

Termodinamica x ingegneri - u° 3.12



$P_2 = P_3 = 9 \text{ bar}$
 $P_1 = P_4 = 2,4 \text{ bar}$
 $x_3 = 0 \quad T_2 = 60^\circ\text{C}$
 $T_1 = 10^\circ\text{C}$
 $\dot{V}_1 = 0,6 \text{ m}^3/\text{min}$

$\text{COP}_P = ? \quad \dot{w} = ?$
 $\dot{Q}_c = ? \quad \eta_{s,c} = ?$

Espressioni e risultati:

$\text{COP}_P = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}_c} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$

$\dot{w} = \frac{\dot{V}_1}{V_1} \cdot \frac{1}{60}$

$\dot{Q}_c = \dot{w} (h_2 - h_1) \quad \eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$

Costruiamo la tabella:

	P	T	h	s	x
1	2,4	10	408 ^B	1,76 ^B	sum ^B
2s	9 ^A	50	435	1,76 ^C	sum ^D
2	9	60	447 ^E	1,8 ^E	sum ^E
3	9		248 ^F	1,16 ^F	○
4	2,4				

Ⓐ $P_2 = P_{2s}$

Ⓑ Conoscendo p e T, det. fase: vapore surriscaldato

Utilizziamo diagramma p-h

Ⓒ $s_1 = s_{2s}$

Ⓓ Conoscendo p ed s, determiniamo fase: vap. surr.

Diagramma p-h

Calcoliamo anche
 $\rho_1 = 13 \text{ kg/m}^3$
 \Downarrow
 $v_1 = 0,077 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Ⓔ Conoscendo p e T, determiniamo fase: vapore surriscaldato

Ⓕ Poiché abbiamo $x = 0$
 $h = h_e(p=9) \quad s = s_e(p=9)$

Abbiamo determinato tutti i risultati necessari,
calcoliamo i risultati:

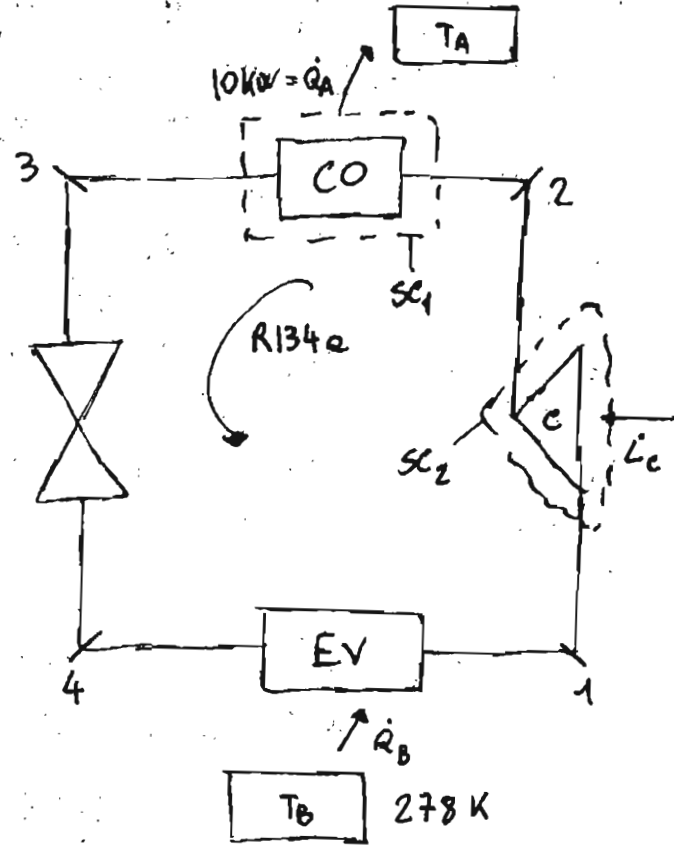
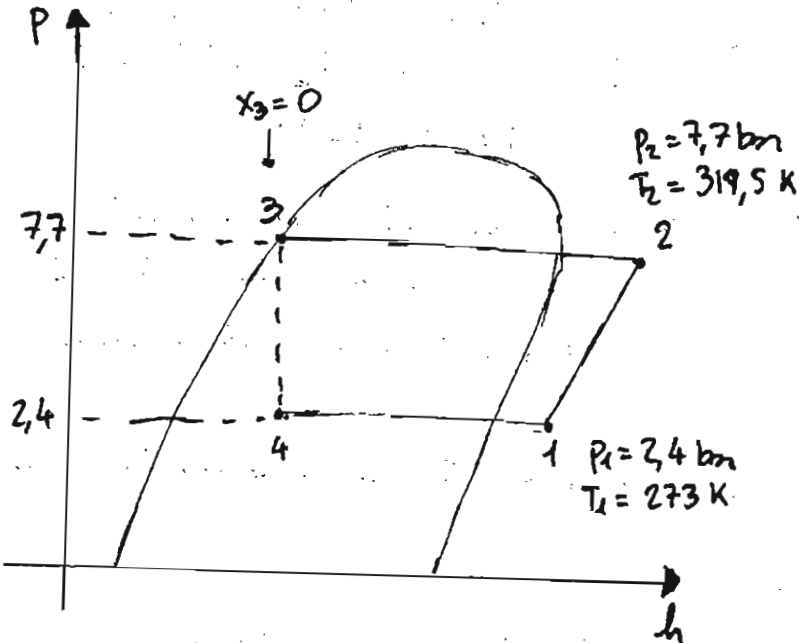
$$COP_p = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = 5,10$$

$$\dot{m} = \frac{96}{0,077} \cdot \frac{1}{60} = 0,13 \text{ kg/s}$$

$$\dot{L}_c = \dot{m} (h_2 - h_1) = 5,07 \text{ kW}$$

$$\eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,69$$

ESERCIZIO 3.14



Calcolare: cop_p , \dot{u}_i , \dot{L}_c , $\eta_{s,c}$

① Evidenziamo i risultati espliciti trovati:

• $cop_p = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{L}_c}$ • $\dot{L}_c = (\text{da bilancio I legge}) = \dot{u}_i (h_2 - h_1) \leftarrow \text{Sup. controllo: } SC_2$

• Applicando bilancio I legge x CO, identifichiamo \dot{u}_i :

$\dot{u}_i h_2 = \dot{u}_i h_3 + \dot{Q}_A \rightarrow \dot{u}_i = \frac{\dot{Q}_A}{h_2 - h_3} \leftarrow \text{Sup. controllo: } SC_1$

• Esplicitiamo muovamente \dot{L}_c conoscendo ora \dot{u}_i :

$$\dot{L}_c = \dot{Q}_A \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_3}$$

• Esplicitiamo muovamente cop_p , conoscendo \dot{L}_c :

$$cop_p = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

• Il rendimento isentropico del compressore sarà pari a:

$$\eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Conoscendo tutte i parametri necessari x la determinazione dei risultati, applichiamo la termodinamica degli stati x calcolarli:

(Troviamo dati per 5 stati: 1-2-2s-3-4)

↓
x il calcolo di $\eta_{s,c}$

	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	x
1	2,4	273	400	1,72	sum
2	7,7	319,5	432	1,76	sum
2s	7,7	306	418	1,72	sum
3	7,7	302,9	239,8	1,13	0
4	2,4	267,6	239,8	1,15	0,23

Ⓐ La traccia ci fornisce solo le p di 1 e 2; naturalmente, poiché ragioniamo con perdite di carico nulla e transf. isobara durante gli scambi termici
 $P_1 = P_4 \quad P_2 = P_{2s} = P_3$

Ⓑ Osservando la tabella di saturazione, vengo che la fase è vap. surriscaldato
 Lo dal diagramma leggiamo i dati

Lo stesso avviene x lo stato 2: vap. surr.

Ⓒ Conoscendo p e x, in tabella ricaviamo $h = h_e$

↳ E' necessario effettuare l'interpolazione tra i valori di 7,0 e 8,0 bar.

Ⓓ Supponiamo che $s_2 = s_{2s}$.
 Conoscendo di 2s p e s,
 determiniamo la fase: vap. surriscaldato → leggiamo dal diagramma il valore di h e T

$$\frac{7,7 - 7,0}{8,0 - 7,0} = \frac{h_e - h_e(7,0)}{h_e(8,0) - h_e(7,0)} \rightarrow h_e = 239,8 \text{ kJ/kg} \rightarrow \begin{matrix} \text{lo stesso} \\ \text{anche} \\ \text{per } T_{sat} \\ \text{e } s_e \end{matrix}$$

Ⓔ La tabella di saturazione fa in modo che $h_3 = h_4$. Conoscendo p e h, determi. fase: vap. saturo

$$T = T_{sat}(2,4) \leftarrow \text{Titolo} = \frac{h - h_e}{h_s - h_e} = 0,23$$

$$s = s_e + x(s_s - s_e) = 1,15 \text{ kJ/kg K}$$

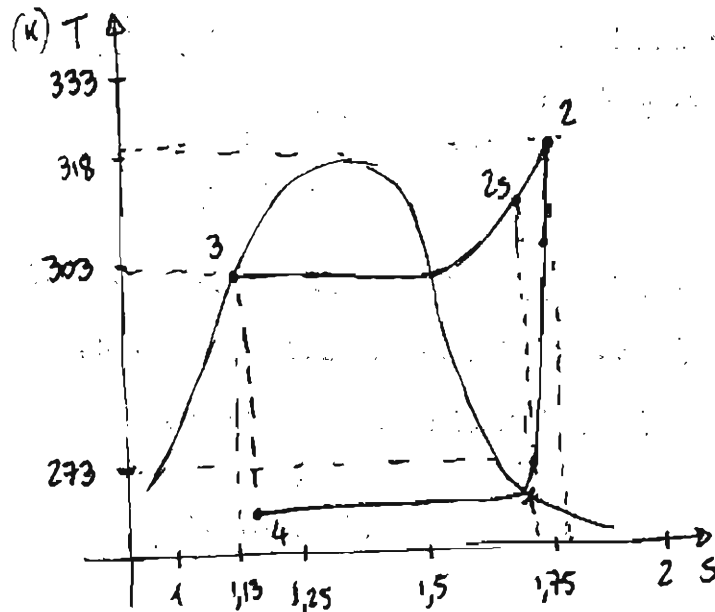
Conoscendo tutti i parametri determiniamo tutti i risultati e tracciamo il diagramma Ts

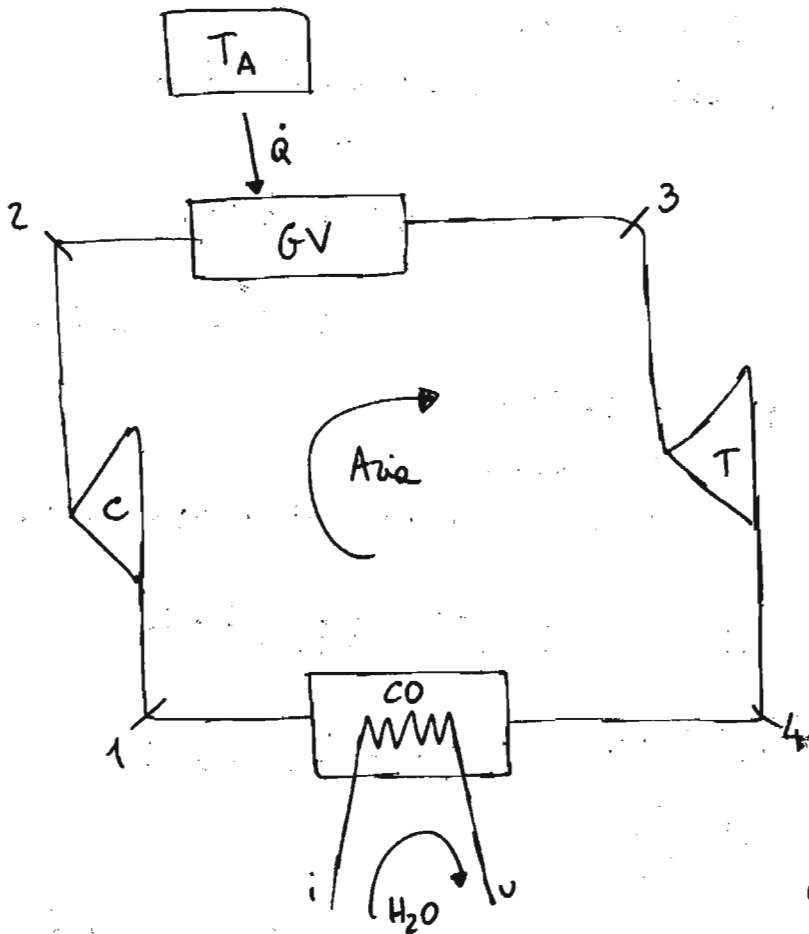
$\text{COP} = 6,01$

$\dot{m}_i = 0,05 \text{ kg/s}$

$\eta_{s,c} = 0,56$

$\dot{L}_c = 1,6 \text{ kW}$





Aria

$p_1 = 1 \text{ bar}$
 $p_2 = 8 \text{ bar}$
 $v_1 = 0,880 \text{ m}^3/\text{kg}$
 $\eta_{s,T} = 0,90$
 $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$
 $T_A = 1200 \text{ K}$
 $\eta_{s,C} = 0,80$

H₂O

$T_i = 15^\circ\text{C}$ $T_U = 50^\circ\text{C}$
 $p_i = p_U = 1 \text{ bar}$ $\dot{m}_H = 11 \text{ kg/s}$

$\dot{Q} = ?$ $\dot{S}_{gen,GLOB} = ?$

Esplichiamo i dati da calcolare:

$\dot{Q} \rightarrow$ bilancio di I legge attorno a GV: $\dot{m} h_2 + \dot{Q} = \dot{m} h_3$
 $\dot{Q} = \dot{m} (h_3 - h_2)$

$\dot{S}_{gen,GLOB} \rightarrow$ bilancio di II legge su una
 sup. di controllo che lambisce i
 SET e include il sistema

$\frac{\dot{Q}}{T_A} + \dot{m}_H s_i + \dot{S}_{gen,G} = \dot{m}_H s_U$
 $\dot{S}_{gen,G} = \dot{m}_H (s_U - s_i) - \frac{\dot{Q}}{T_A}$

Calcoliamo i dati necessari:

• LIQUIDO REFRIGERANTE

$T_i < T_U < T_{sat} (p=1 \text{ bar}) \Rightarrow \text{H}_2\text{O} \text{ è allo stato liquido.}$

Possiamo subito valutare $\Delta s_{i,U} = s_U - s_i = c \log \frac{T_U}{T_i} = 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Possiamo valutare $\Delta h_{i,U} = h_U - h_i = c(T_U - T_i) + v(p_U - p_i) = 147 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

• FLUIDO DI LAVORO

Essendo un gas, sono necessari x i calcoli solo p e T.

Il nostro scopo è trovare h_3 e h_2 , ma sappiamo che $\Delta h = c_p \Delta T \times i_{gas}$

⇓

$$h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

↓
vogliamo le 2 temperature

	(bar)	(K)
	P	T
1	1	307 ^B
2s	8	556 ^C
2	8	618 ^D
3	8	1063 ^F
4s	1	584 ^F
4	1	627 ^E

Ⓐ $P_2 = P_{2s} \quad P_{4s} = P_4$

Inoltre gli scambi di

calore avvengono lungo isobore: $P_2 = P_3 \quad P = P_4$

Ⓑ Sappiamo che $v_1 = 0,880 \text{ m}^3/\text{kg}$, quindi:

$$P_1 v_1 = R T_1 \rightarrow T_1 = \frac{P_1 v_1}{R} = 307 \text{ K}$$

$R = 0,287$
x aria

Ⓒ Nella trasformazione isentropica 1-2s abbiamo $\Delta S = 0$, quindi possiamo scrivere:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_{2s}}{P_1} \right)^E = 1,81$$

$$E = \frac{k-1}{k}$$

$k = 1,4$ x aria

→ $E = 0,29$

$$T_{2s} = T_1 \cdot 1,81 = 556 \text{ K}$$

Ⓔ Effettuiamo un bilancio di I legge attorno al CO

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_H h_i = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_H h_u$$

$$\dot{m} \Delta h_{41} = \dot{m}_H \Delta h_{i0} = 1617$$

↓ x i gas

calcolo già fatto

$$\dot{m} c_p (T_4 - T_1) = 1617 \quad T_4 = \frac{1617}{\dot{m} c_p} + T_1 = 627 \text{ K}$$

Ⓓ Sfruttiamo $\eta_{s,c}$:

$$\eta_{s,c} = (x i_{gas}) = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{s,c}} = 618 \text{ K}$$

Ⓕ Per il calcolo di T_3 e T_{4s} è necessario sfruttare due condizioni:

Trasf. 3-4s isentropica ⇒ $\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_{4s}}{P_3} \right)^E$

$$\eta_{s,T} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

Continua a pag. succ.

$$\textcircled{F} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{45}}{T_3} = 0,55 \rightarrow T_{45} = T_3 \cdot 0,55 \\ \eta_{s,T} = \frac{T_3 - 627}{T_3 - T_3 \cdot 0,55} = 0,9 \rightarrow T_3 - 627 = T_3 \cdot 0,41 \end{array} \right.$$

$$T_3 = 627 / 0,59 \text{ K} = 1063 \text{ K}$$

$$\downarrow \\ T_{45} = 584 \text{ K}$$

Calcoliamo i risultati:

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_3 - h_2) = \dot{m} c_p (T_3 - T_2) = 2247 \text{ kW}$$

$$\dot{S}_{gen, glob} = \dot{m}_H \Delta S_{io} - \frac{\dot{Q}}{T_A} = 3,4 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

⑪ Crescendo p e h , determiniamo fase: liquido.

$$\Delta h = c \Delta T + v \Delta p$$

$$\Delta T = \frac{\Delta h - v \Delta p}{c} = 0,3 \text{ K}$$

$$T_2 = 309,3 \text{ K}$$

Scelto sempre stato 1 come
stato di riferimento

$$\Delta s = c \log T_2/T_1$$

$$\hookrightarrow s_2 \approx s_1$$

Definiti tutti i
parametri, possiamo
cedere i risultati:

$$\text{Calcoliamo } \dot{m} = 98,2 \text{ kg/s}$$

$$\hookrightarrow \eta = 0,31$$

$$\dot{S}_{genGV} = 331 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$\dot{S}_{genp} = 0,39 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$\dot{S}_{genT} = 40 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

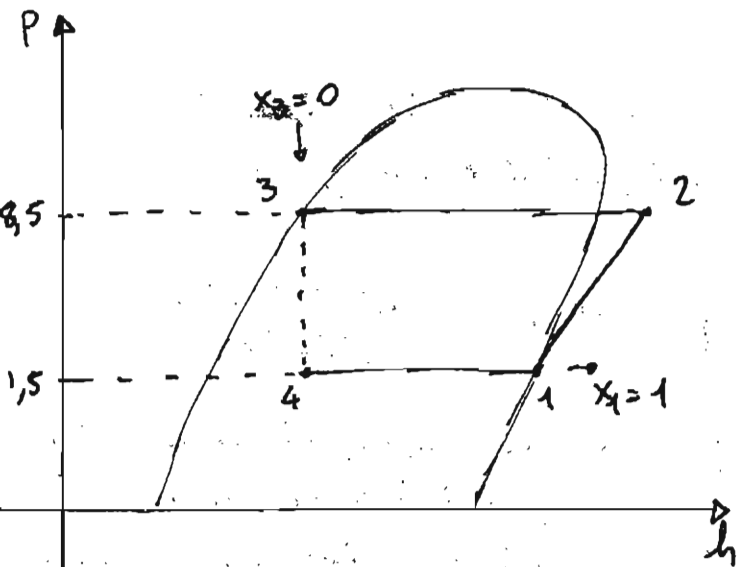
$$\text{Calcoliamo } \dot{m}_{H_2O} = 6071 \text{ kg/s}$$

$$\hookrightarrow \dot{S}_{genCO} = \dot{m} (s_2 - s_1) + \dot{m}_{H_2O} \Delta s_{H_2O} = 92 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

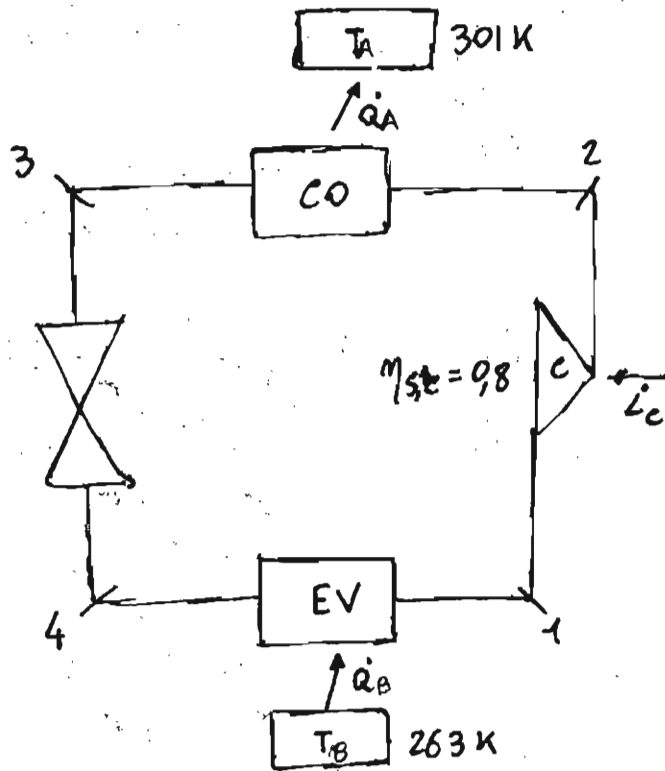
$$\dot{S}_{genGlob} = 463 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

P. 177 u° 3.1

Ciclo frigorifero - R134a



Dobbiamo calcolare: COP , \dot{S}_{gen} totale e x componenti

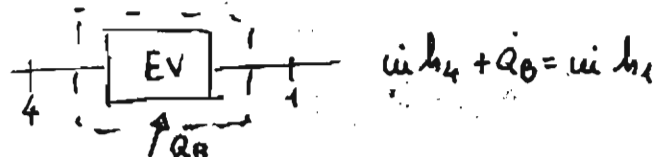


• Poiché è una macchina frigorifera:

$$\text{COP}_F = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{L}_c} = \frac{i_c (h_1 - h_4)}{i_c (h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

• \dot{S}_{gen} globale applicando bilancio II legge a SE che ingloba ciclo e bombasse SET

applichiamo I legge x EV

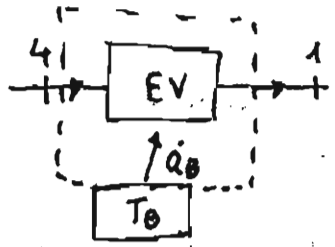


$$\frac{\dot{Q}_B}{T_B} + \dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}_A}{T_A}$$

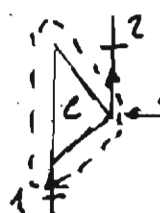
$$\dot{S}_{gen} = \frac{i_c (h_2 - h_3)}{T_A} - \frac{i_c (h_1 - h_4)}{T_B}$$

$$S_{gen} \text{ glob} = \frac{h_2 - h_3}{T_A} - \frac{h_1 - h_4}{T_B}$$

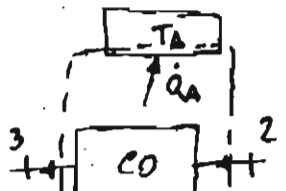
• Calcoliamo \dot{S}_{gen} EV, \dot{S}_{gen} C, \dot{S}_{gen} CO, \dot{S}_{gen} v con bilanci di II legge attorno ai singoli componenti.



$$i_c s_4 + \frac{\dot{Q}_B}{T_B} + \dot{S}_{gen} \text{ EV} = i_c s_1 \rightarrow \dot{S}_{gen} \text{ EV} = (s_1 - s_4) - \frac{h_1 - h_4}{T_B}$$



$$i_c s_1 + \dot{S}_{gen} \text{ C} = i_c s_2 \rightarrow \dot{S}_{gen} \text{ C} = s_2 - s_1$$



$$i_c s_2 + \dot{S}_{gen} \text{ CO} = i_c s_3 + \frac{\dot{Q}_A}{T_A} \rightarrow \dot{S}_{gen} \text{ CO} = s_3 - s_2 + \frac{h_2 - h_3}{T_A}$$



$$u_3 + s_{gen,v} = u_4 \rightarrow s_{gen,v} = s_4 - s_3$$

Identificati i parametri necessari x determinare i risultati applichiamo la termodinamica degli stati (4 stati + 2s x $\eta_{s,c}$):

	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	x
1	1,5	256 ^B	388 ^B	1,74 ^B	1
2	8,5	316 ^G	436,8 ^F	1,78 ^G	sur. ^G
2s	8,5 ^A		427 ^E	1,74 ^E	sur. ^E
3	8,5	306 ^B	244,6 ^B	1,15 ^B	0
4	1,5	256 ^D	244,6 ^C	1,17 ^D	0,31 ^D

(A) $P_2 = P_{2s}$ poiché si trovano sulla stessa isobara

(B) Poiché $x_1 = 1$, entrando a $p = 1,5$ bar identifichiamo h_3 e s_3 a $p = 1,5$ facciamo lo stesso con 3, ma con vapore saturo secco
(x $p = 8,5$ bar effettuiamo la media aritmetica dei valori per $p = 8$ e $p = 9$)

(C) la titolo di umidità x in modo che $h_3 = h_4$

(D) Conoscendo p e h , identifichiamo la fase: vapore saturo

Conoscendo il titolo \rightarrow Titolo = $x = \frac{h - h_e}{h_s - h_e} = 0,31$

(E) Sappiamo che $s_1 = s_{2s}$.

Conoscendo p ed s calcoliamo fase: vapore surriscaldato

\rightarrow Utilizziamo diagramma x calcolo h

calcoliamo $s = s_2 + x(s_3 - s_e) \rightarrow 1,17$ kJ/kgK

(F) Utilizzando $\eta_{s,c} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,8$

$\rightarrow h_2 = 436,8$ kJ/kg

(G) Conoscendo p e h , determiniamo fase: vapore surriscaldato

\rightarrow calcoliamo $s_2 = 1,78$ kJ/kgK e T

Determinati i parametri di vostro interesse, calcoliamo i risultati:

$COP_F = 2,9$

$S_{gen, EV} = 25$ J/kgK

$S_{gen, CO} = 8,5$ J/kgK

$S_{gen, GLOB} = 90$ J/kgK

$S_{gen, C} = 40$ J/kgK

$S_{gen, v} = 20$ J/kgK

DIAG. TS

