



POLITECNICO
MILANO 1863

TUTORATO 4

Cicli termodinamici a vapore

[\(link registrazione\)](#)

Corso di Fisica Tecnica 2019-2020

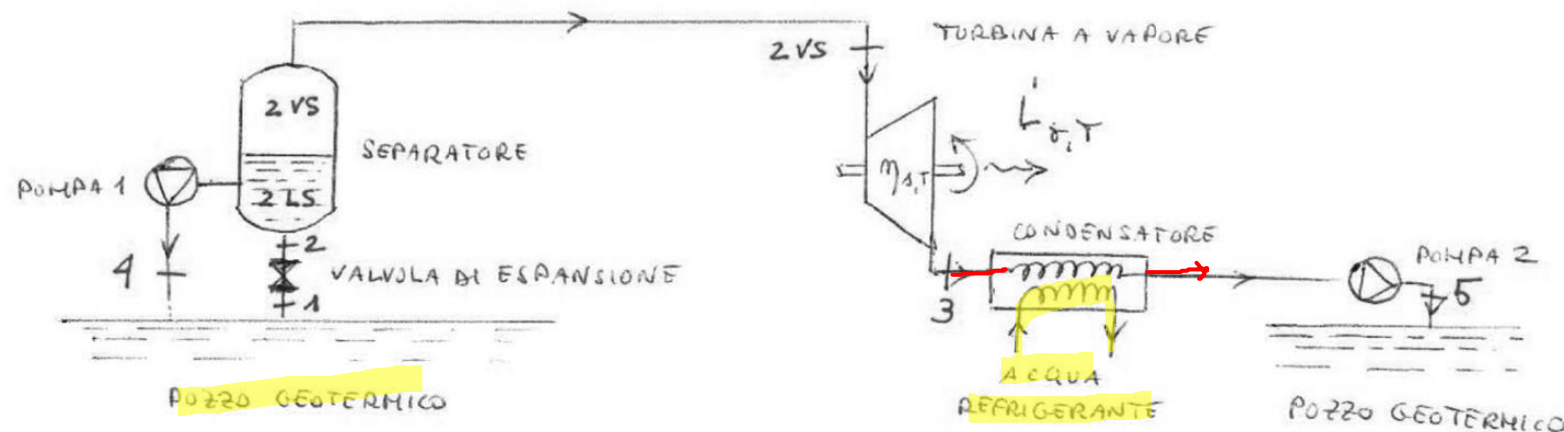
Francesco Lombardi
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

7.5. [avanzato] Una sorgente termale di acqua calda nelle condizioni $P = 1 \text{ bar}$ e $T = 90^\circ\text{C}$ viene sfruttata per la generazione di potenza meccanica mediante l'impianto illustrato in figura, che consta dei seguenti componenti:

- Una valvola di laminazione.
- Un separatore, munito di pompa per la re-immissione della fase liquida nel pozzo geotermico.
- Una turbina a vapore di rendimento isoentropico $\eta_T = 0.65$.
- Un condensatore.
- Una pompa per la re-immissione del condensato nel pozzo geotermico.



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

Determinare:

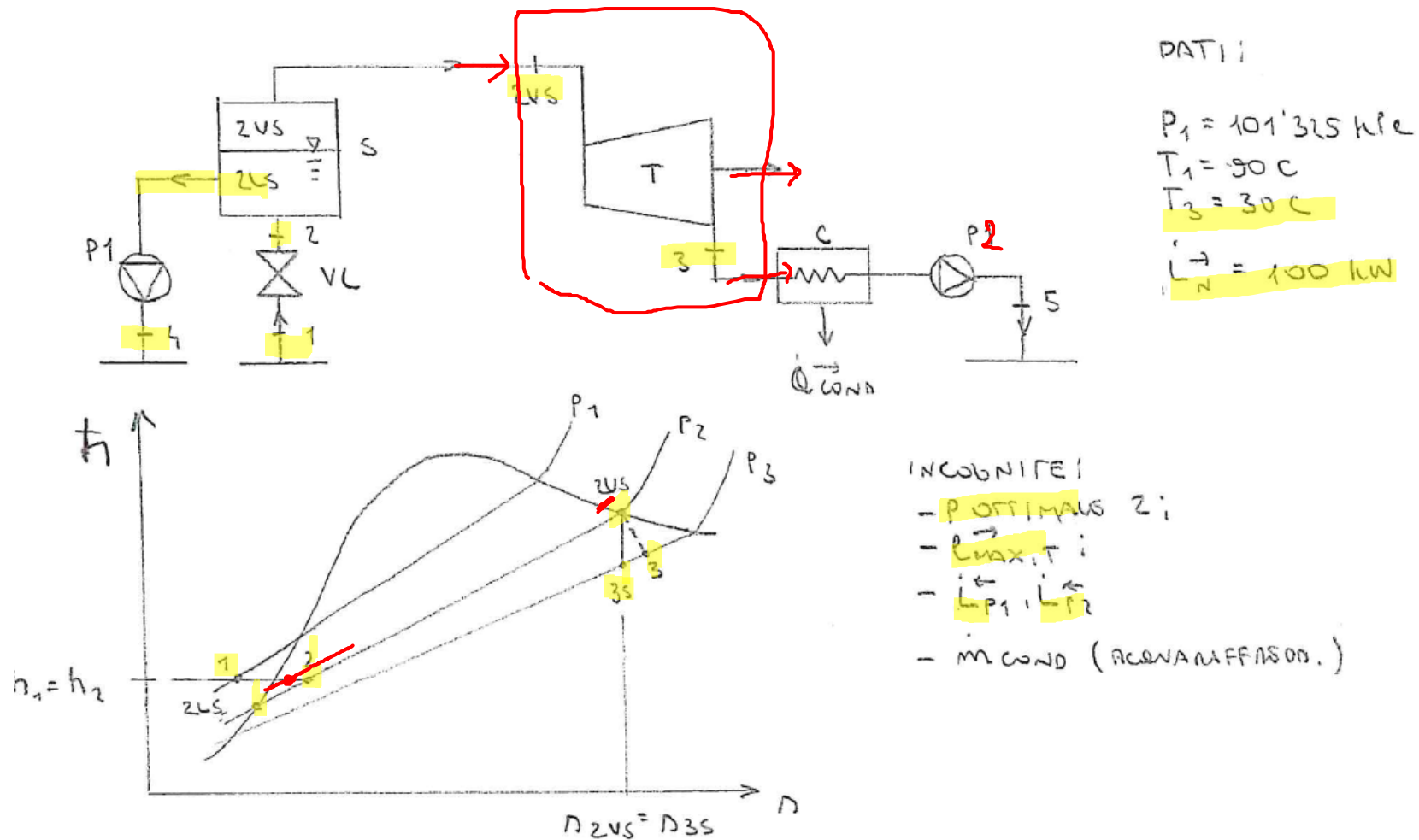
- La pressione ottimale di aspirazione dell'acqua dal pozzo.
- Il massimo lavoro prodotto dalla turbina per unità di massa di acqua aspirata, nel caso in cui l'impianto eroghi una potenza di 100 kW.
- La potenza delle pompe ausiliarie.
- La portata in massa d'acqua richiesta per la condensazione, assunta pari a $T_C = 30^\circ\text{C}$.

Per risolvere l'esercizio, è necessario procedere “per tentativi” (i.e. secondo un approccio “discreto”).



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

IL SEPARATORE RICEVE ACQUA ALCORRENTE 2 CHE, ALLA PRESSIONE 2, DIVENTA IN CONDIZIONI DI EQUILIBRIO BIFASE LIQUIDO-VAPORE.

LA TURBINA RICEVE VAPORE SOTTO 2VS, MENTRE IL LIQUIDO SOTTO 2LS VIENE REINNESO NEL BOLLITO;

IL BILANCIO ENERGETICO ALLA TURBINA SI SCRIVE COME:

$$\dot{L}_T + \dot{m}_v (h_{2VS} - h_3) = 0 \quad (\text{TURBINA ADIABATICA OPERANTE IN REG. STAT.})$$

$\dot{m}_v = \dot{m} \cdot x_2$ FRAZIONE DEL VAPORE IN TURBINA È UNA FRAZIONE DELL'ACQUA NEL SEPARATORE;

QUINDI:

$$\dot{L}_T = \dot{m} x_2 \eta_T (h_{2VS} - h_{3S}) \rightarrow \ell_T = x_2 \eta_{ST} (h_{2VS} - h_{3S}) \quad \text{LAVORO SPECIFICO TURBINA}$$

NOTA: x_2 E h_{2VS} SONO FUNZIONI DI T_2 (QUINDI DI P_2):

SE $T_2(P_2) \uparrow$: $x_2(\dot{m}_T) \downarrow$ E $h_{2VS} \uparrow$

ESISTE QUINDI UNA PRESSIONE OTTIMALE DI IMMISSIONE DELL'ACQUA NEL SEPARATORE!



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

NUOVE CONDIZIONI DEI PNTI DELLE TRASFORMAZIONI:

$h_1 \approx h_2$ TRASFORMAZIONE ISENTROPICA

$$h_1 \approx h_{LS}(T_1) + v_{LS}(T_1)(P_1 - P_{SAT})$$

$$= 376,94 \text{ kJ/kg} + 0,0010361 \text{ m}^3/\text{kg} (101'325 - 70'110) \cdot 10^3 = 376,97 \text{ kJ/kg}$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{LS}}{h_{VS} - h_{LS}} \bigg|_{P_2 = P_1}$$

NOTA T_2 , E' QUINDI POSSIBILE RICAVARE x_2



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

$$x_{3s} = \frac{p_{3s} - p_{cs}}{p_{vs} - p_{cs}} = \frac{p_{3s} - 0,4365}{8,4546 - 0,4365} = \frac{S_{2vs}}{S_{2vs}}$$

$$h_{3s} = h_{cs} + x_{3s} (h_{vs} - h_{cs}) = 125,66 + x_{3s} (2556,1 - 125,66)$$

$$h_{3s} = 125,66 + 2430,44 \cdot x_{3s}$$

Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

FACENDO QUINDI UNA ANALISI DISCRETA, IMPOSTANDO VALORI DIVERSI DI T_2 E DEDUCENDO TUTTE LE INCOSUENZE

$T_2 [^{\circ}\text{C}]$	$h_{1s2} [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$	$h_{vs2} [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$	x_2	$\overset{S_{2vs}}{\underline{h_{3s}}} [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$	x_{3s}	$h_{3s} [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$	$\overset{\rightarrow}{\underline{c_T}} [\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}]$
<u>80</u>	334,92	2643,8	0,018	7,6132	0,395	2301,2	4,0084
<u>70</u>	292,97	2626,9	0,036	7,7565	0,313	2344,9	6,5988
<u>60</u>	251,03	2609,7	0,053	7,9108	0,332	2351,1	<u>7,5308</u>
50	209,26	2591,7	0,070	8,0441	0,353	2342,2	6,8250

LA TEMPERATURA T_2 OTTIMALE SI HA IN UN INTERVALLO DI $T_2 = 60^{\circ}\text{C}$.

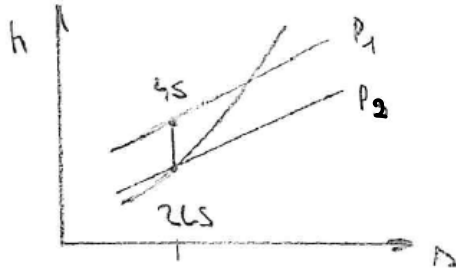
ASSUMENDO $T_{\text{out}} = T_2$, CALCOLIAMO POTENZA NETTA PRODOTTA E QUANTITÀ DI REFRIGERANTE:



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

POMPA 1: SI ASSUME PROCESSO ISENTROPICO:



$$\dot{L}_{P1,S}^{\leftarrow} = \dot{m}_{P1} (h_{4S} - h_{2LS})$$

$$\dot{m}_{P1} = \dot{m} (1 - x_2)$$

$$\dot{L}_{P1,S}^{\leftarrow} = (1 - x_2) (h_{4S} - h_{2LS})$$

$$dh = T ds + v dp \rightarrow h_{4S} - h_{2LS} = v_{2LS} (P_1 - P_2)$$

$$h_{4S} - h_{2LS} = v_{2LS} (P_1 - P_2) = 0,001017 (101325 - 17920) = 82,8 \text{ J/kg}$$

$$\dot{L}_{P1,S}^{\leftarrow} = (1 - 0,053) 82,8 = 78,4 \text{ J/kg}$$

POMPA 2: SI ASSUME PROCESSO ISENTROPICO:

$$\dot{L}_{12S}^{\leftarrow} = x_2 (h_{5S} - h_{3LS}) = x_2 v_{3LS} (P_7 - P_3)$$

$$= 0,053 \cdot 0,0010043 (141325 - 4241) = 5,1645 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

LAVORO NETTO IMPIANTO

$$l_N^{\rightarrow} = l_T^{\rightarrow} - l_{p1}^{\leftarrow} - l_{12}^{\leftarrow} = 7,5308 - 0,0328 - 0,0051675 = 7,4928 \text{ kJ/kg}$$

CALCOLO PORTATA DI VAPORE CIRCOLANTE NELL'IMPIANTO:

$$\dot{m} = \frac{l_T^{\rightarrow}}{l_T^{\rightarrow}} = \frac{100 \text{ kW}}{7,5308 \text{ kJ/kg}} = 13,279 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{T/\checkmark} = x_{250} \cdot \dot{m} = 0,053 \cdot 13,279 = 0,704 \text{ kg/s} \quad (= \dot{m}_{p2})$$



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

CONDENSATORI:

HP: DISPONIBILITÀ DI ACQUA A 15°C CON ΔT MASSIMA DI 5°C

$$\dot{m}_T h_3 + \dot{m}_R h_{Ri} - \dot{m}_T h_{LS3} - \dot{m}_R h_{Ru} = 0$$

$$\dot{m}_T (h_3 - h_{LS3}) + \dot{m}_R (h_{Ri} - h_{Ru}) = 0$$

$$\dot{m}_R = \dot{m}_T \frac{h_3 - h_{LS3}}{h_{Ru} - h_{Ri}} \approx \dot{m}_T \frac{h_3 - h_{LS3}}{c_{p,H_2O} (T_{Ru} - T_{Ri})}$$



Cicli termodinamici a vapore

7.5 – Avanzato

h_3 SI OTTIE NE DAL RENDIMENTO ISENTROPICO DI TURBINA : $\eta_{ST} = 0,65$

$$\eta_{TS} = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{TS}} = \frac{h_{vs2} - h_3}{h_{vs2} - h_{3s}} \rightarrow h_3 = h_{vs2} - \eta_{ST}(h_{vs2} - h_{3s})$$

$$h_3 = 2609,7 - 0,65 (2609,7 - 2351,1) = 2467,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

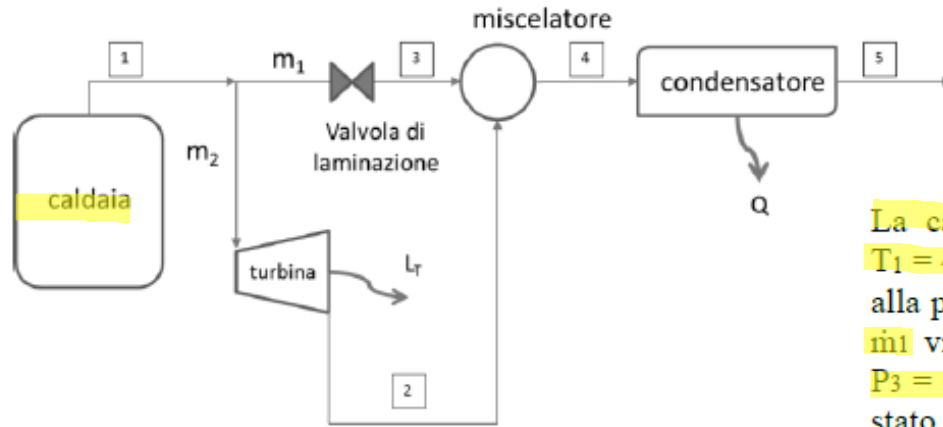
$$\dot{m}_R = \dot{m}_T \frac{h_3 - h_{2s3}}{c_{pw}(T_{Ru} - T_{Ri})} = 0,707 \cdot \frac{2467,6 - 125,66}{1,136 \cdot 5} = 79,1 \text{ kg/s}$$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

7.8. [avanzato] Un impianto di cogenerazione è realizzato secondo lo schema riportato in figura.

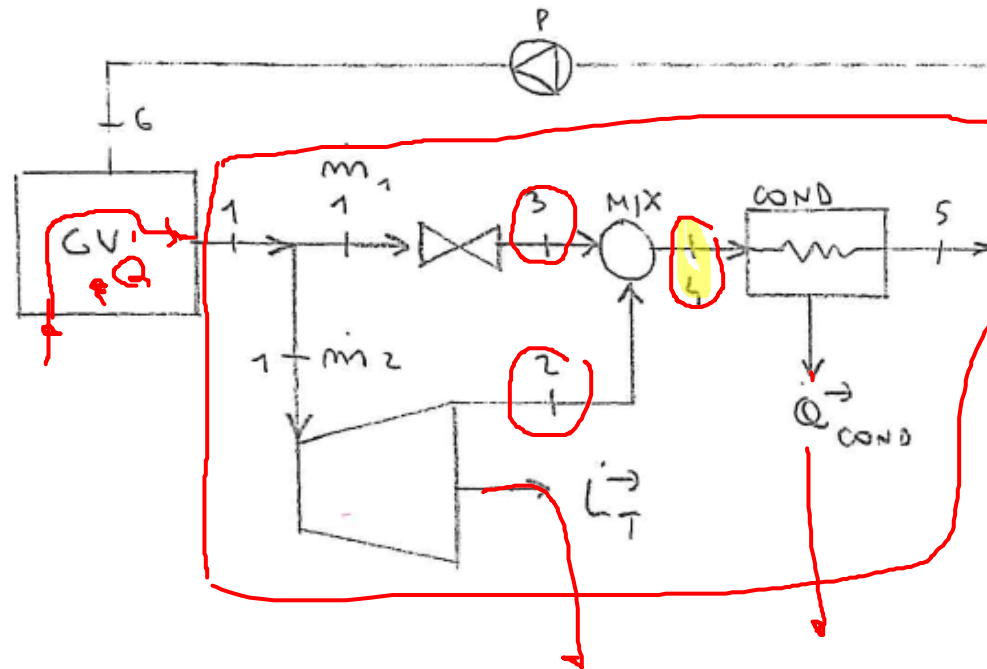


La caldaia genera una portata di vapore d'acqua, a pressione $P_1 = 30$ bar e temperatura $T_1 = 400$ °C, di cui una parte \dot{m}_2 viene fatta espandere in turbina (che opera reversibilmente) fino alla pressione $P_2 = 1$ bar, producendo una potenza meccanica $L_T = 1$ MW. La rimanente portata \dot{m}_1 viene prima inviata ad una valvola di laminazione dove viene ridotta la pressione fino a $P_3 = 1$ bar, poi miscelata adiabaticamente con la portata uscente dalla turbina. Il risultato, nello stato 4, viene inviato al condensatore all'uscita del quale si ha liquido saturo ($x_5 = 0$). È nota la potenza termica prelevata dal condensatore $Q_C = 3.5$ MW. Si chiede di:

- Rappresentare gli stati termodinamici e i processi nel diagramma (T,s).
- Determinare la portata in massa di vapore d'acqua alla turbina (\dot{m}_2).
- Scrivere le equazioni di bilancio per valvola, miscelatore e condensatore e determinare la portata in massa di vapore d'acqua alla valvola di laminazione (\dot{m}_1).
- Determinare le condizioni del vapore nello stato 4 (temperatura, entalpia, eventuale titolo, ...).
- Determinare la potenza di pompaggio necessaria nel caso in cui si volesse reimmettere il condensato in caldaia (alla pressione $P_6 = P_1 = 30$ bar) con un processo reversibile.

Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato



DATI:

$$P_1 = 30 \text{ bar}$$

$$T_1 = 400 \text{ C}$$

$$P_2 = 1 \text{ bar}$$

$$\eta_{IT} = 1$$

$$\dot{L}_T = 1 \text{ MW}$$

$$P_3 = 1 \text{ bar}$$

$$x_5 = 0$$

$$\dot{Q}_{\text{COND}} = 3,5 \text{ MW}$$

$$P_6 = P_1 = 30 \text{ bar}$$

INCONGNITE: - STATI TERMODINAMICI N DIAGRAMMA T-S

$$- \dot{m}_2$$

$$- \dot{m}_1$$

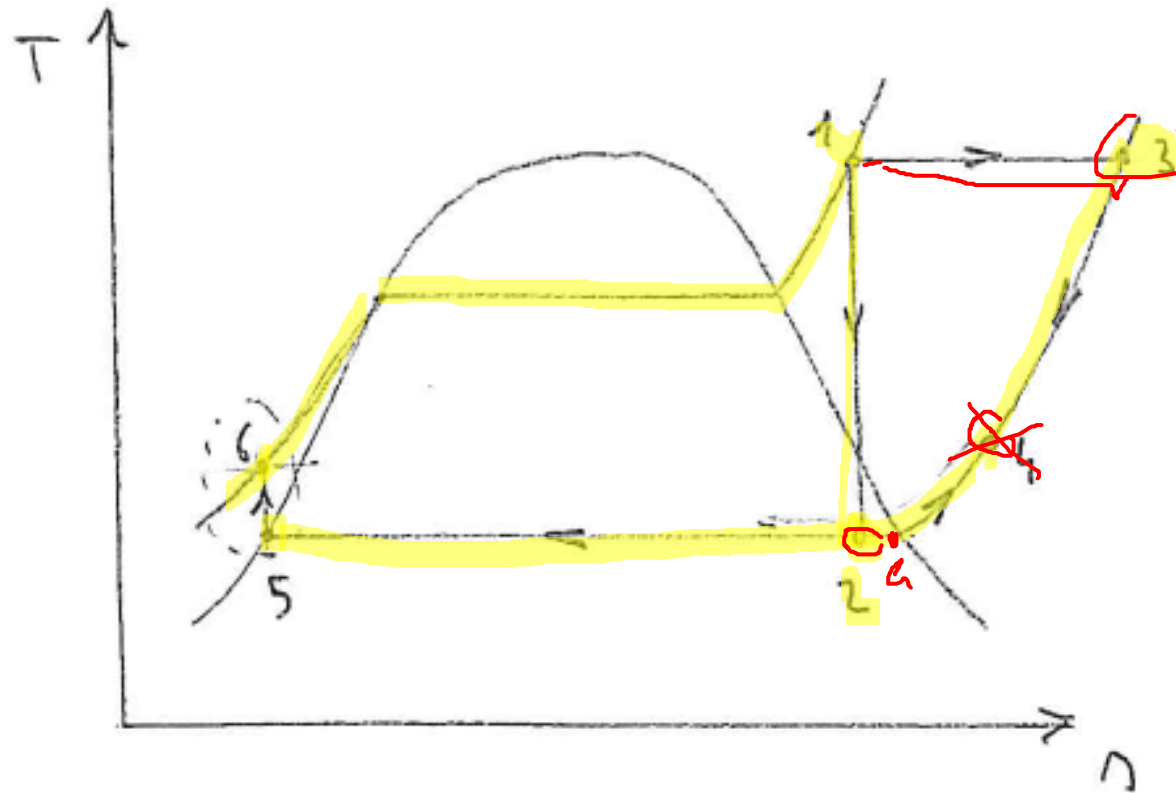
- CONDIZIONI STATO 4

$$- \dot{L}_P$$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

SCRITTURA DEL BILANCIO DI ENERGIA PER TUTTI I COMPONENTI:

GENERATORS DI VAPORS: $\dot{m}_v (h_6 - h_1) + \dot{Q}_{GV}^{\leftarrow} = 0$

SPURTER: $\dot{m}_v h_1 - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_1 = 0$

TURBINA: $\dot{m}_2 (h_1 - h_2) - \dot{L}_T^{\rightarrow} = 0$

VALVE UNINATIONE: $\dot{m}_1 (h_1 - h_3) = 0 \rightarrow h_1 = h_3$

MIXER: $\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_v h_4 = 0$

CONDENSATORE: $\dot{m}_v (h_4 - h_5) - \dot{Q}_{COND}^{\rightarrow} = 0$

POMPA: $\dot{m}_v (h_5 - h_6) + \dot{L}_P^{\leftarrow} = 0$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

NUOVO CICLO STATI TERMODINAMICI DELLE TRASFORMAZIONI:

1) OUT GENERATORS DI VAPORS (OUT SPUTTER)

$$P_1 = 30 \text{ bar} ; T_1 = 400^\circ\text{C} ; h_1 = 3232,5 \text{ kJ/kg} ; D_1 = 6,9246 \text{ kg/kg h}$$

2) OUT TURBINA IDEALE ADIABATICA:

$$P_2 = 1 \text{ bar} ; D_2 = D_1 = 6,9246 \text{ kg/kg h} (< D_{vs}(P_2) = 7,3598 \text{ kg/kg h} \rightarrow \text{BIFASE!})$$

$$x_2 = \frac{D_2 - D_{ls}}{D_{vs} - D_{ls}} \bigg|_{P_3 = P_1} = \frac{6,9246 - 1,3027}{7,3598 - 1,3027} = 0,9282$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_{ls}}{h_{vs} - h_{ls}} \rightarrow h_2 = h_{ls} + x_2 (h_{vs} - h_{ls})$$

$$h_2 = 417,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,9282 (2675,4 - 417,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2513,2 \text{ kJ/kg}$$



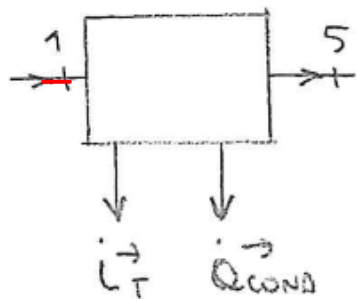
Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

3) OUT UMINATONE ;

$$h_3 = h_4 = 3232,5 \text{ kJ/kg} ; \text{ UMINATONE ISENTROPICA}$$

PER PROCEDERE A RICAVARE L'ENTALPIA DELL'INFILO 4 OCCORRE RICAVARE LE MASSE RICOMPTI m_1 E m_2 . SI SONO INCONTRENTI IN MORE DIVERSI GRATE AL BILANCIO DI ENERGIA DI TURBINA, MIXERE CONDENSATORS, RICAVANDO UN SISTEMA DI 3 EQUAZIONI IN 3 INCONITE (m_1, m_2, h_4).
IN ALTERNATIVA, NON SEMPLICEMENTE, SI PUO' SOLVERE IL BILANCIO DI ENERGIA PER IL SISTEMA COMPLESSIVO!



$$-\dot{Q}_{\text{COND}} - \dot{L}_T + \dot{m}_v (h_1 - h_5) = 0$$

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_{\text{COND}} + \dot{L}_T}{h_1 - h_5}$$

$$\text{CON } h_5 = h_{\text{SAT}}(P_2) = 919,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_v = \frac{(3,5 + 1) \cdot 10^3 \text{ kW}}{(3232,5 - 919,5) \text{ kJ/kg}} = 1,6 \text{ kg/s}$$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

DAL BILANCIO DI ENERGIA ALLA TURBINA:

$$-\dot{L}_T^{\rightarrow} + \dot{m}_2(h_1 - h_2) = 0 \rightarrow \dot{m}_2 = \frac{\dot{L}_T^{\rightarrow}}{h_1 - h_2} = \frac{10^3 \text{ kW}}{(3232,5 - 2513,2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1,35 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_v = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_v - \dot{m}_2 = (1,6 - 1,35) \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,208 \text{ kg/s}$$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

4) OUT MIXER, IN CONDENSATORE:

$$P_4 = P_3 = P_2 = 1 \text{ bar};$$

$$\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_2 h_2 - (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_4 = 0 \rightarrow h_4 = \frac{\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$

$$h_4 = \frac{0,208 \text{ kg/s} \cdot 3223,5 \text{ kJ/kg} + 1,39 \text{ kg/s} \cdot 2513,2 \text{ kJ/kg}}{1,6 \text{ kg/s}} = 2606,9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 < h_{\text{SAT}}(P_1) = 2675,4 \text{ kJ/kg} \rightarrow \text{VAPORS BIFASE!}$$

$$T_4 = T_{\text{SAT}}(P_1) = 99,63 \text{ C}$$

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{\text{LS}}}{h_{\text{VS}} - h_{\text{LS}}} = \frac{2606,9 - 417,5}{2675,4 - 417,5} = 0,9695$$



Cicli termodinamici a vapore

7.8 – Avanzato

$$5) \quad p_5 = p_2 = 1 \text{ bar}; \quad h_5 = h_{5s}(p_5) = 417,5 \text{ kJ/kg}; \quad n_5 = n_{5s}(p_5) = 1,3027 \text{ kJ/kg K}$$

6) our RMTA:

$$\dot{m}_v (h_5 - h_6) + \dot{L}_P^{\leftarrow} = 0 \quad \text{PROCESSO REVERSIBILE: } n_5 = n_6 \quad (\text{isothermo!})$$

$$n_5 - n_6 = 0 \rightarrow c \ln \frac{T_5}{T_6} = 0 \rightarrow T_5 = T_6$$

$$\dot{L}_P^{\leftarrow} = \dot{m}_v (h_6 - h_5) = \dot{m}_v (c(T_6 - T_5) + n_{5s}(p_6 - p_5))$$

$$\dot{L}_P^{\leftarrow} = 1,6 \text{ kg/s} \cdot 0,001043 \text{ m}^3/\text{kg} (30-1) \cdot 10^2 \text{ kPa} = 4,8 \text{ kW}$$

$$h_6 = h_5 + \frac{\dot{L}_P^{\leftarrow}}{\dot{m}_v} = 417,5 \text{ kJ/kg} + \frac{4,8 \text{ kW}}{1,6 \text{ kg/s}} = 420,5 \text{ kJ/kg}$$

