

Cognome	Nome	Matricola
---------------	------------	-----------------

Ing. Navale, Ing. Civile e Ambientale
Prova scritta di Fisica Tecnica – Termodinamica – 23.1.2026

Esercizio

In un ciclo Rankine a vapore saturo una portata di vapore saturo secco entra in turbina alla pressione p_1 e si espande adiabaticamente con rendimento isoentropico di espansione $\eta_{ie} = 0.75$ fino alla pressione $p_2 = 50$ kPa. La pompa all'uscita del condensatore aspira il liquido saturo alla pressione $p_3 = p_2$ e lo comprime sino alla pressione $p_4 = p_1$. La potenza termica fornita in caldaia è $\dot{Q}_i^+ = 20$ MW. Dopo aver rappresentato il ciclo in un diagramma $T - s$, determinare nell'ordine:

1. il titolo x_{2s} e l'entalpia h_{2s} del vapore all'uscita della turbina nel caso di espansione ideale
2. l'entalpia h_2 ed il titolo x_2 e del vapore all'uscita della turbina nel caso reale (attraverso il rendimento isoentropico di espansione)
3. l'entalpia degli altri punti del ciclo
4. la portata di massa $\dot{m}$ del vapore
5. il rendimento η del ciclo e la potenza netta generata $\dot{L}$
6. il rendimento massimo teorico η_{max} di un ciclo termodinamico che opera tra la stessa temperatura minima e massima del ciclo Rankine considerato

Tema	p_1 [MPa]
A	4.5
B	6.5

p MPa	t °C	v_l m ³ /kg	v_v m ³ /kg	h_l kJ/kg	h_v kJ/kg	s_l kJ/(kg · K)	s_v kJ/(kg · K)
0.04	75.9	0.001026	3.993	317.6	2637	1.026	7.670
0.05	81.3	0.001030	3.240	340.5	2645	1.091	7.594
0.06	85.9	0.001033	2.732	359.9	2653	1.145	7.532
...							
4.00	250.4	0.001252	0.0498	1087	2801	2.796	6.070
5.00	264.0	0.001286	0.0394	1154	2794	2.921	5.974
6.00	275.6	0.001319	0.0324	1213	2784	3.027	5.889
7.00	285.9	0.001351	0.0274	1267	2772	3.121	5.813

Proprietà dell'acqua satura (liquido l , vapore v)

Teoria

Raffreddamento evaporativo:

- rappresentazione della trasformazione in un diagramma psicrometrico
- bilancio entalpico
- giustificazione grafica (su diagramma psicrometrico) oppure analitica (mediante formula dell'entalpia di miscela) del raffreddamento della corrente a fronte di immissione di liquido

Soluzione

- proprietà del punto 1 da tabella, $p = p_1$:

Tema	p_1 [MPa]	t_1 [°C]	h_1 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	s_1 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$
A	4.5	257.2	2798	6.022
B	6.5	280.8	2778	5.851

- proprietà liquido e vapore saturo a $p = p_2 = 50$ kPa ($t = t_2 = 81.3$ °C):

	$l(\equiv 3)$	v
h [kJ/kg]	340.5	2645
s [kJ/(kg · K)]	1.091	7.594

- titolo ideale x_{2s} per $s_{2s} = s_1$ ed entalpia ideale h_{2s} :

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s_l}{s_v - s_l} \Rightarrow h_{2s} = h_l + x_{2s}(h_v - h_l)$$

- entalpia reale h_2 e titolo reale x_2 :

$$\eta_{ie} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \Rightarrow h_2 = h_1 - \eta_{ie}(h_1 - h_{2s})$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_l}{h_v - h_l}$$

Tema	p_1 [MPa]	x_{2s}	h_{2s} $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	h_2 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	x_2
A	4.5	0.758	2088	2265	0.835
B	6.5	0.732	2027	2215	0.813

- entalpie $h_3 = h_l = 340.5$ kJ/kg (liquido saturo), punto 4 (uscita pompa):

$$h_4 = h_3 + v_3(p_4 - p_3) = h_3 + v_3(p_1 - p_2)$$

con $v_3 = v_l(p = p_3 = p_2 = 50$ kPa) = 0.00103 m³/kg:

Tema	p_1 [MPa]	h_4 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
A	4.5	345.1
B	6.5	347.1

- portata e rendimenti:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_i^+}{h_1 - h_4}$$

$$\eta = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}} = \frac{\dot{L}}{\dot{m}(h_1 - h_4)} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

$$\dot{L} = \eta \dot{Q}$$

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Tema	p_1 [MPa]	$\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	η	$\dot{L}$ [MW]	η_{max}
A	4.5	8.15	0.215	4.30	0.332
B	6.5	8.23	0.229	4.58	0.360