

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

**Ing. Navale, Ing. Civile e Ambientale**  
 Prova scritta di Fisica Tecnica – Termodinamica – 24.4.2026

**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  $\eta_{ie} = 0.8$  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 netta prodotta dal ciclo è  $\dot{L} = 5$  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  $\eta$  del ciclo
6. il rendimento massimo teorico  $\eta_{max}$  di un ciclo termodinamico che opera tra la stessa temperatura minima e massima del ciclo Rankine considerato

Tema	$p_1$ [MPa]
<b>A</b>	5
<b>B</b>	7

$p$ MPa	$t$ °C	$v_l$ m <sup>3</sup> /kg	$v_v$ m <sup>3</sup> /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 saturo (liquido  $l$ , vapore  $v$ )

**Teoria**

Ciclo Otto, analisi ad aria standard fredda:

- rappresentazione del ciclo nei piani  $p - v$  e  $T - s$
- determinazione del rendimento in funzione del rapporto (volumetrico) di compressione  $r$ .

## Soluzione

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

Tema	$p_1$ [MPa]	$t_1$ [°C]	$h_1$ $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	$s_1$ $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$
<b>A</b>	5	264.0	2794	5.974
<b>B</b>	7	285.9	2772	5.813

- 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]	$x_{2s}$	$h_{2s}$ $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	$h_2$ $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	$x_2$
<b>A</b>	5	0.751	2071	2216	0.814
<b>B</b>	7	0.726	2014	2165	0.792

- 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 m<sup>3</sup>/kg:

Tema	$p_1$ [MPa]	$h_4$ $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
<b>A</b>	5	345.6
<b>B</b>	7	347.7

- portata e rendimenti:

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

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

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

Tema	$p_1$ [MPa]	$\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	$\eta$	$\eta_{max}$
<b>A</b>	5	8.73	0.234	0.340
<b>B</b>	7	8.34	0.247	0.366