



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



**dipartimento
di ingegneria
e architettura**

Corso di Macchine

EES – ESERCIZI SU IMPIANTI A VAPORE

Rodolfo Taccani

Ronelly De Souza

A.A. 2024-2025

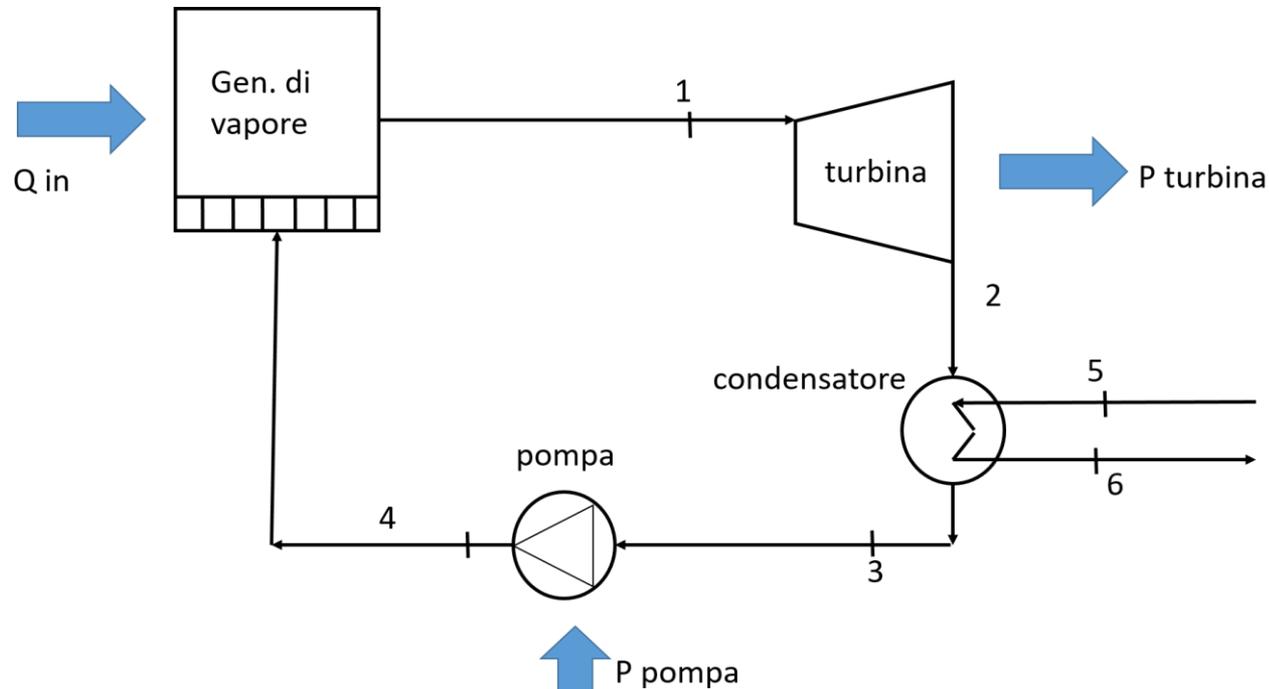


Software Engineering Equation Solver (EES)



Dubbi?

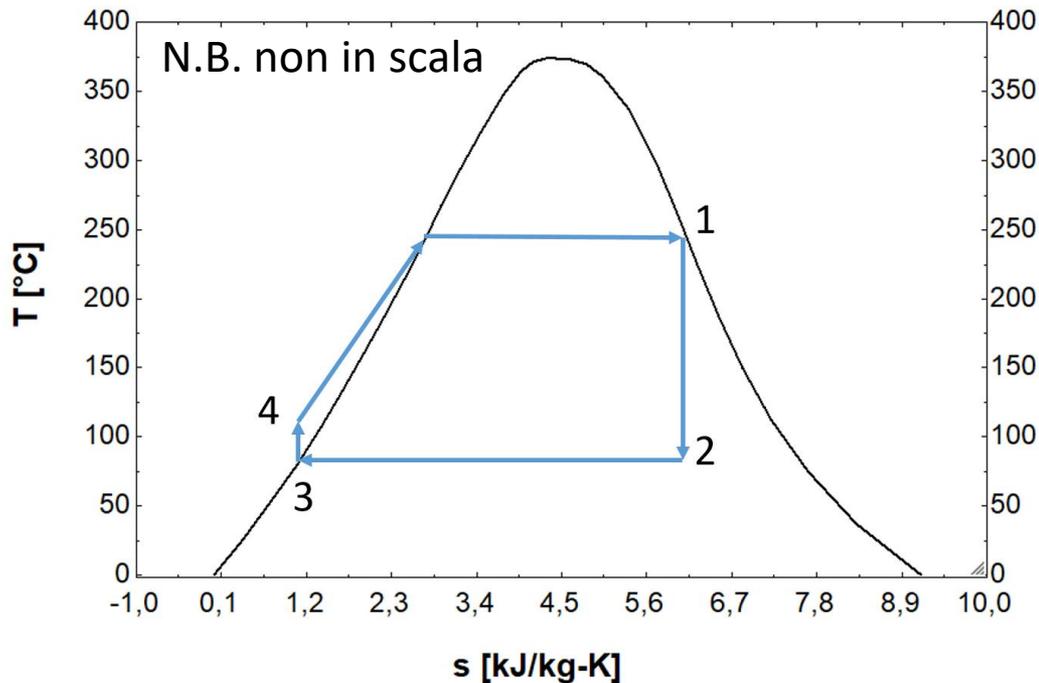
Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale



- Pressione al condensatore 0.08 bar
- Pressione all'ingresso in turbina 80 bar
- Lavoro netto richiesto 100 MW
- Rendimenti isoentropici pompa e turbina 85%
- Vapore saturo all'ingresso in turbina
- Liquido saturo all'uscita del condensatore
- Si trascurano le perdite di carico
- Temperature dell'acqua al condensatore ingresso e uscita: 15°C e 35°C



Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale



Bisogna definire ogni punto sul diagramma di stato.

Ogni punto risulta definito da:

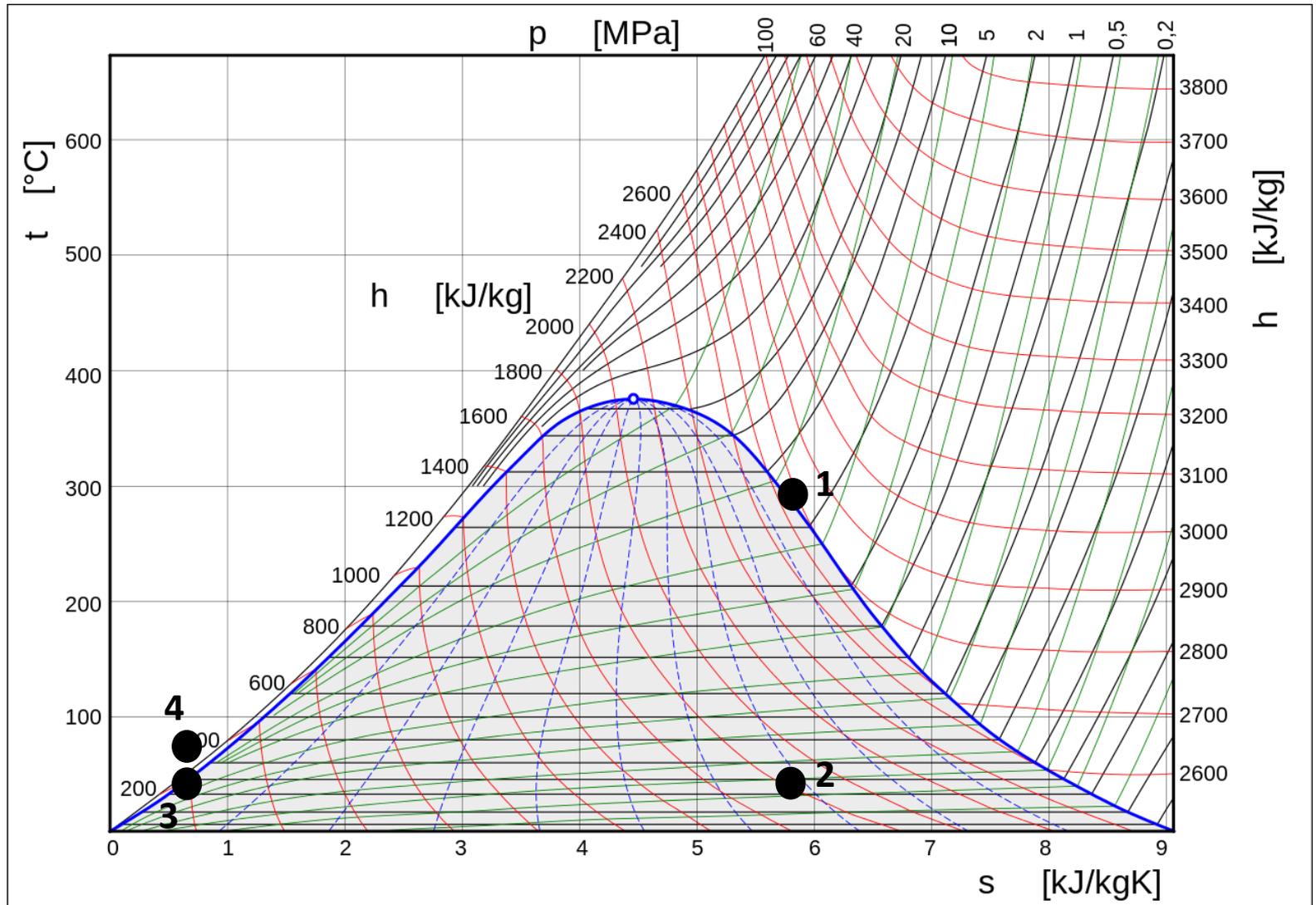
- Pressione
- Temperatura
- Entalpia
- Entropia
- Titolo di vapore

$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{turbina} - P_{pompa}}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$

$$P_{NET} = 100 \text{ MW}$$

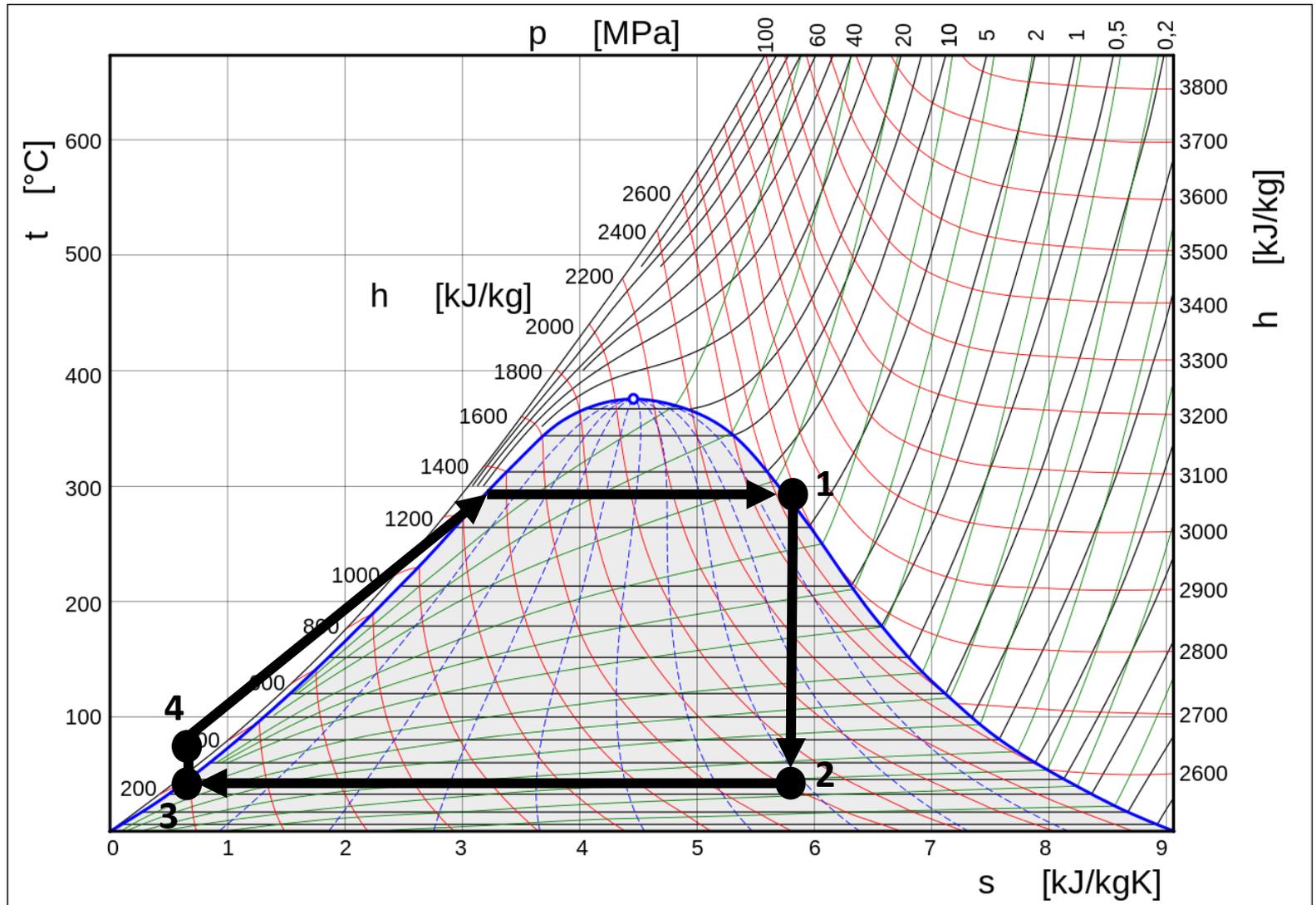


Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale





Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale





Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

In EES creo array con le proprietà in ogni punto (es. per le entalpie sarà $h[1]$, $h[2]$, $h[3]$, $h[4]$).

Punto 1

$$p[1] = 80 \text{ bar}$$

Vapore saturo all'ingresso in turbina $\rightarrow x[1] = 1$

Calcolo $T[1]$, $s[1]$ e $h[1]$ tramite le funzioni termodinamiche di EES a partire dai valori noti di $p[1]$ e $x[1]$

Punto 2

Nell'ipotesi di **ciclo ideale** ed **assenza di perdite** di carico al condensatore si ha:

$$s[2] = s[1]$$

$$p[2] = p[3] \quad (p[3] \text{ è la pressione al condensatore, dato noto: } p[3] = 0.08 \text{ bar})$$

Calcolo $T[2]$, $h[2]$ e $x[2]$ tramite le funzioni di EES a partire dai valori di $s[2]$ e $p[2]$



Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

Punto 3

$$p[3] = 0.08 \text{ bar}$$

Liquido saturo a valle del condensatore $\rightarrow x[3] = 0$

Calcolo $T[3]$, $h[3]$ e $s[3]$ tramite le funzioni termodinamiche di EES

Punto 4

Nell'ipotesi di **ciclo ideale** ed **assenza di perdite di carico** nel generatore di vapore si ha:

$$p[4] = p[1] \text{ (dopo il gen. di vapore ho la stessa pressione che ho in uscita dalla pompa)}$$

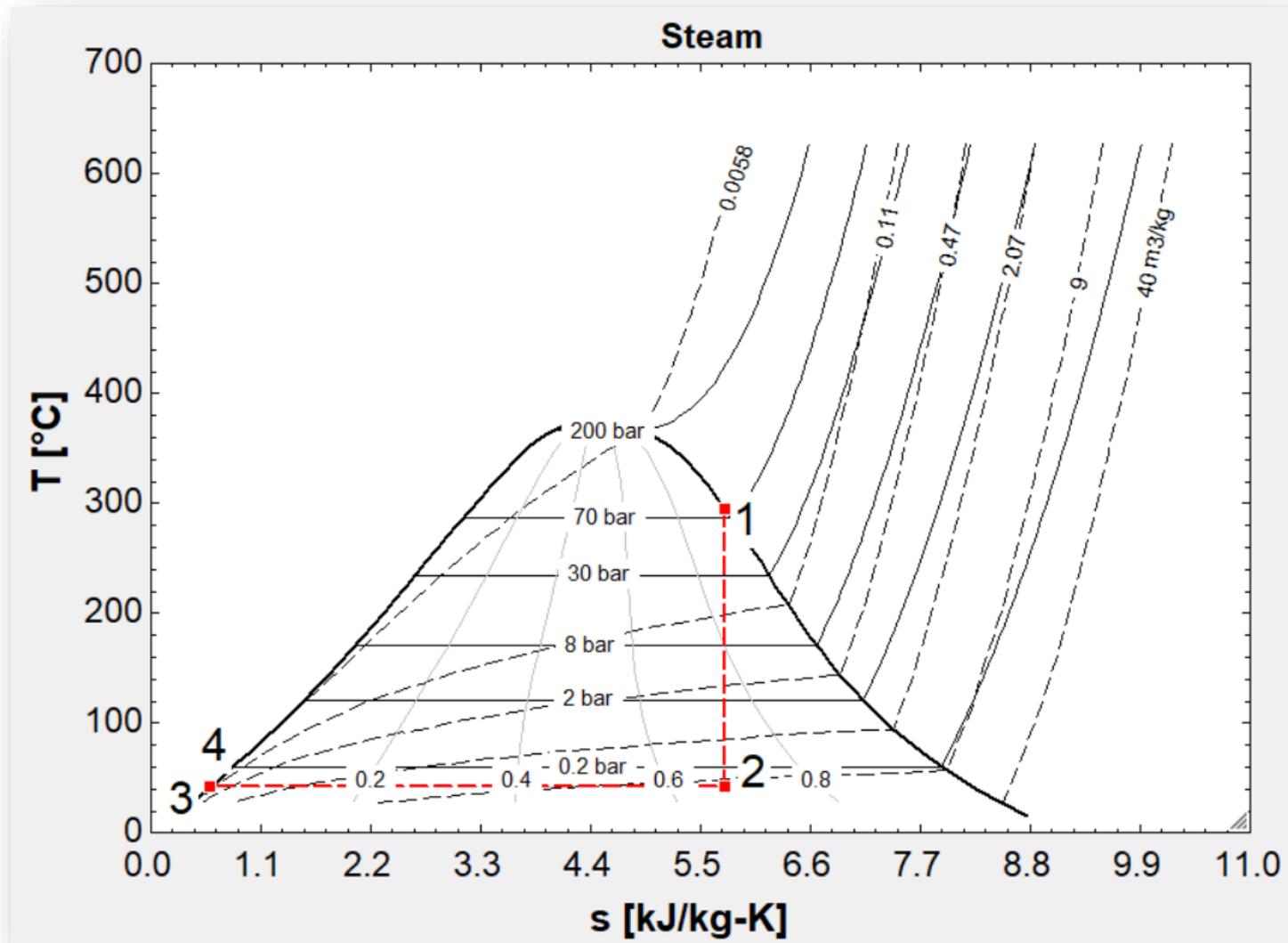
$$s[4] = s[3]$$

Calcolo $T[4]$ e $h[4]$ tramite le funzioni termodinamiche di EES



Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

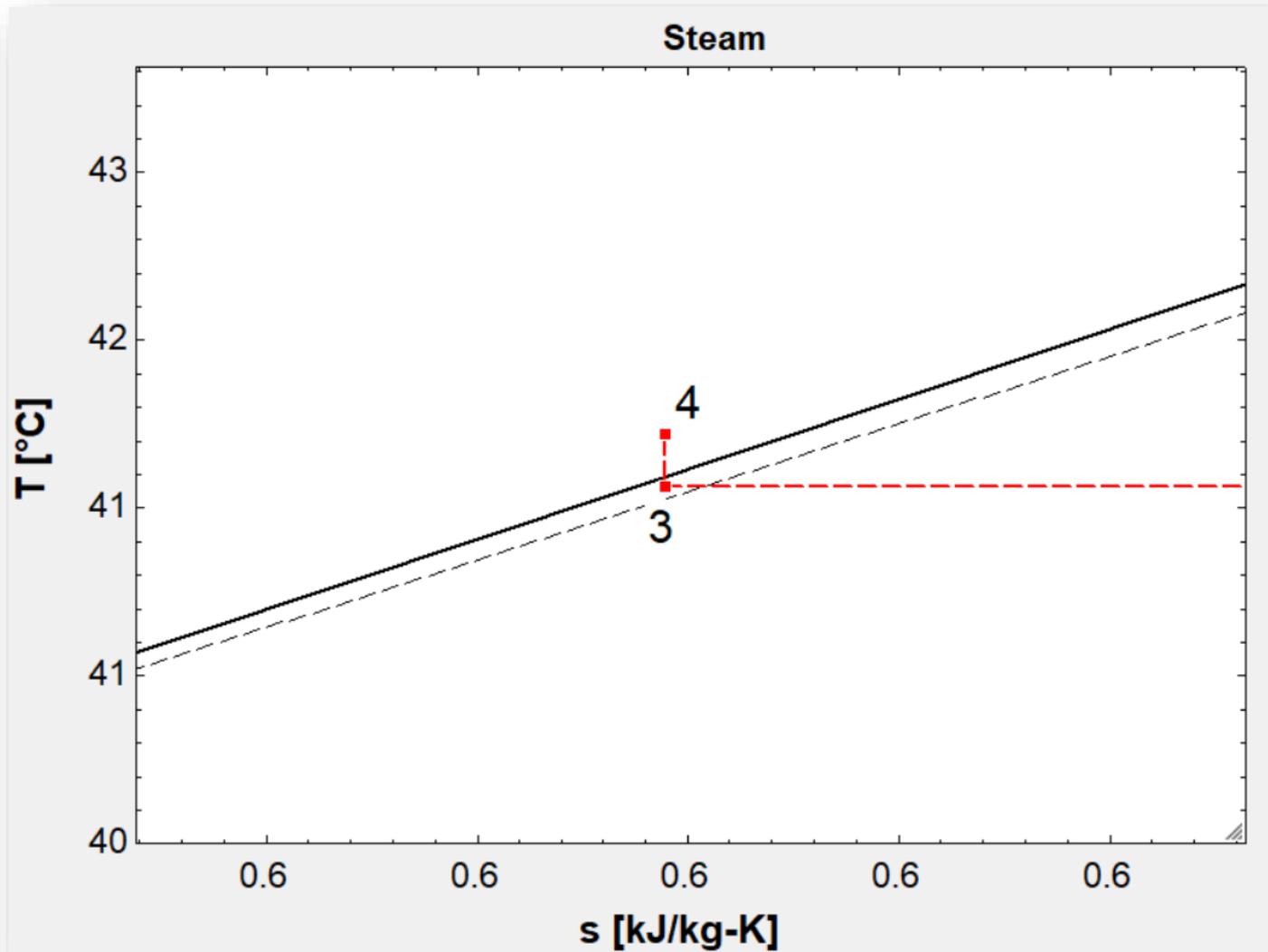
Riporto tutti i punti sui diagrammi T-s e h-s del vapore:





Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

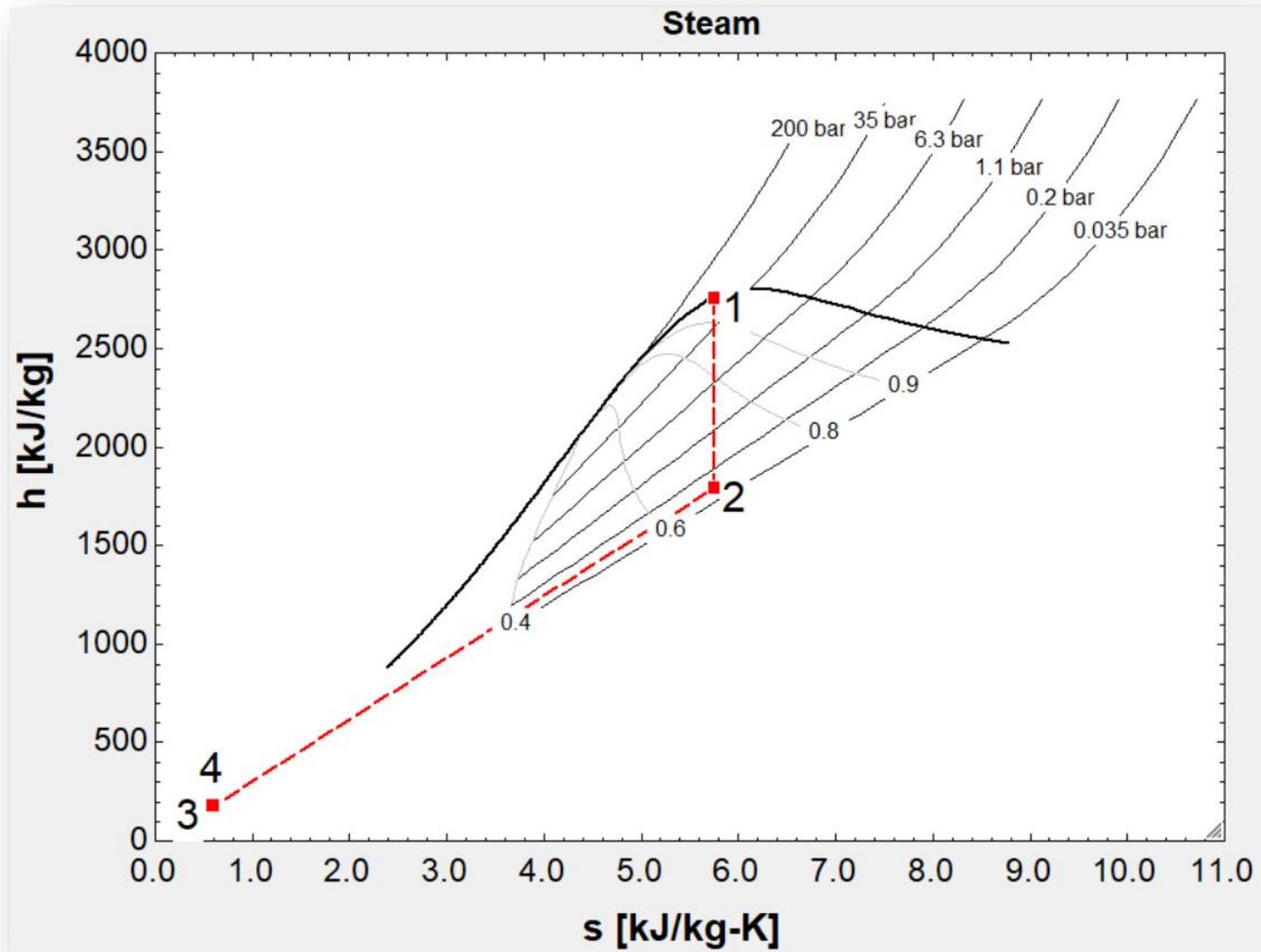
Riporto tutti i punti sui diagrammi T-s e h-s del vapore:





Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

Riporto tutti i punti sui diagrammi T-s e h-s del vapore:





Esercizio 6 – Ciclo Rankine ideale

Potenza della pompa

La potenza che la pompa deve fornire al ciclo è pari al salto entalpico tra i punti 3 e 4 moltiplicato per la portata di vapore.

Potenza della turbina

La potenza ottenuta dall'espansione del vapore in turbina è il salto entalpico tra i punti 2 e 3 moltiplicato per la portata di vapore.

Potenza netta

$$P_{NET} = P_{turbina} - P_{pompa}$$

Calore fornito dal generatore di vapore

Il calore che il gen. di vapore deve fornire alla portata di vapore è pari al salto entalpico tra i punti 4 e 1 moltiplicato per la portata di vapore.

Posso a questo punto calcolare il rendimento termico dell'impianto (o di primo principio)



Esercizio 6 – risultati

I risultati che si ottengono su EES sono:

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$$\eta_{th} = 0.3708$$

$$\dot{m}_{vap} = 104.7$$

$$\dot{P}_{net} = 100000$$

$$\dot{P}_{pompa} = 842.1$$

$$\dot{P}_{turb} = 100842$$

$$\dot{Q}_{cond} = 169676$$

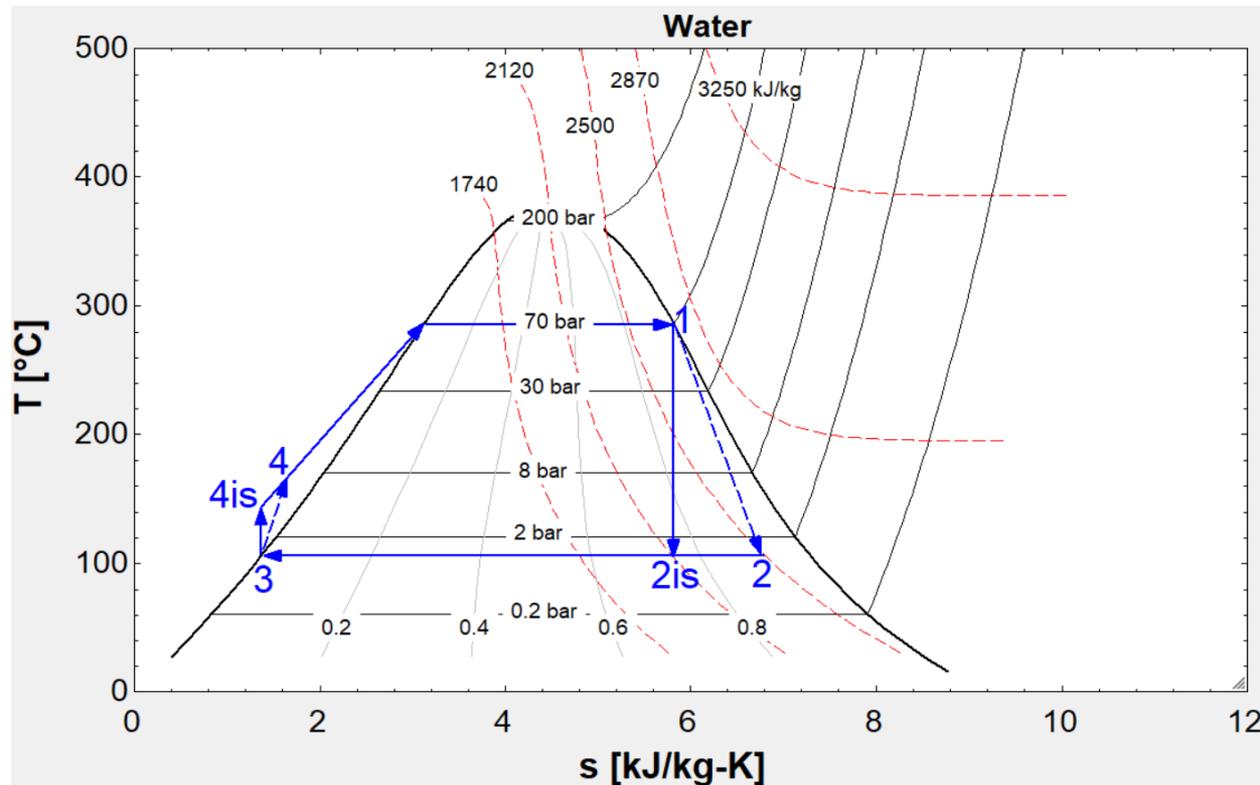
$$\dot{Q}_{in} = 269676$$

Sort	1 x_i	2 T_i	3 P_i	4 h_i	5 s_i
[1]	1	295	80	2759	5.745
[2]	0.6749	41.51	0.08	1795	5.745
[3]	0	41.51	0.08	173.8	0.5925
[4]		41.75	80	181.9	0.5925



Esercizio 7 – Ciclo Rankine con irreversibilità

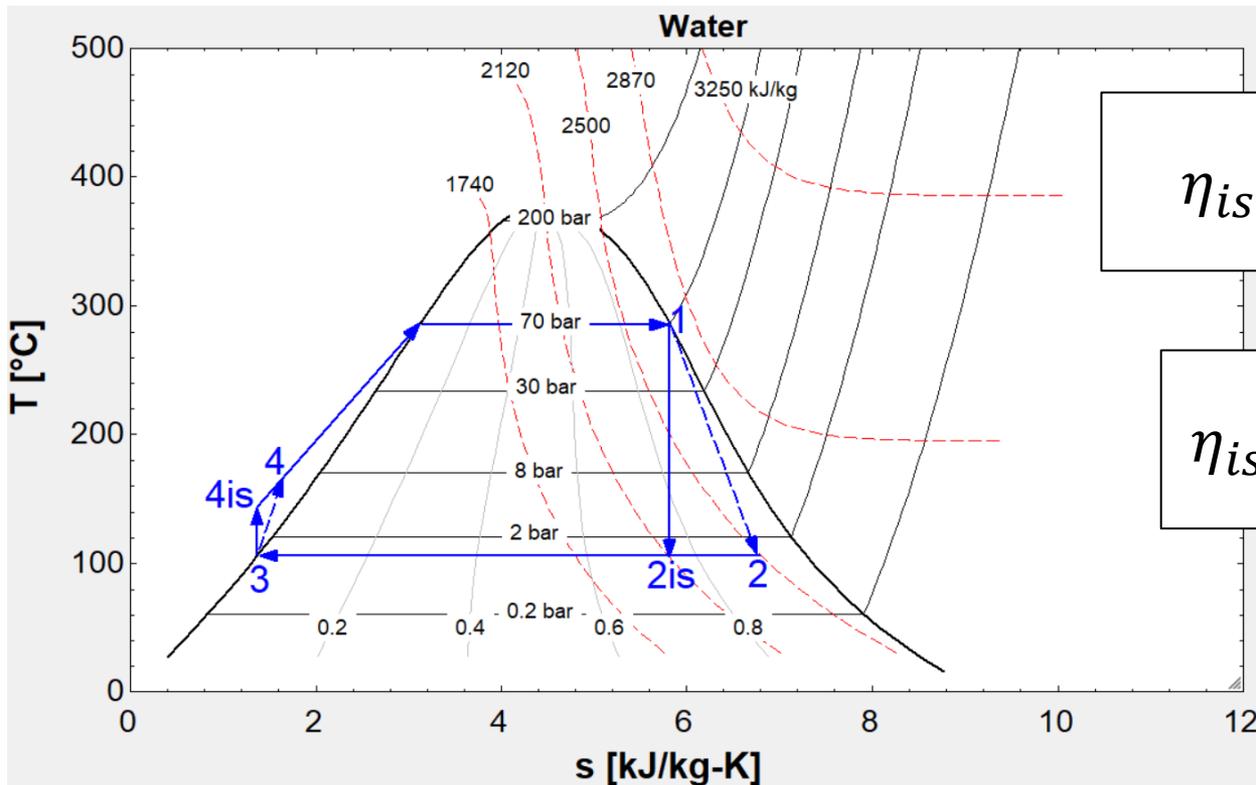
La struttura dell'impianto e le assunzioni sono le stesse dell'esercizio 6, ma si considerano le irreversibilità nella pompa e nella turbina:



$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{turbina} - P_{pompa}}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$

Esercizio 7 – Ciclo Rankine con irreversibilità

La struttura dell'impianto e le assunzioni sono le stesse dell'esercizio 6, ma si considerano le irreversibilità nella pompa e nella turbina:



$$\eta_{isturbina} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2is}}$$

$$\eta_{ispompa} = \frac{h_{4is} - h_3}{h_4 - h_3}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{turbina} - P_{pompa}}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$



Esercizio 7 – Ciclo Rankine con irreversibilità

Procedo, come fatto nell'Esercizio 6, a determinare i da 1 a 4 in termini di T , p , h , s .

Ciò che cambia rispetto all'esercizio 6 sono i punti 2 e 4, rispettivamente a valle della turbina e della pompa.

Punto 2

Nell'ipotesi di **assenza di perdite** di carico al condensatore si ha:

$$p[2] = p[3] \quad (p[3] \text{ è la pressione al condensatore, dato noto: } p[3] = 0.08 \text{ bar})$$

Per il punto 2_{is} di fine espansione isoentropica, che si trova alla stessa pressione $p[2]$ del punto 2 reale, vale:

$$s_{is}[2] = s[1]$$

Da cui posso ricavare $h_{is}[2]$ tramite le funzioni di EES.

Dall'espressione del rendimento isoentropico della turbina si può poi ricavare l'entalpia $h[2]$ del punto 2 reale.

Calcolo $T[2]$, $s[2]$ e $x[2]$ tramite le funzioni di EES a partire dai valori di $h[2]$ e $p[2]$.



Esercizio 7 – Ciclo Rankine con irreversibilità

Punto 4

Nell'ipotesi di **assenza di perdite** di carico al gen. di vapore si ha:

$p[4] = p[1]$ ($p[1]$ è la pressione all'ingresso in turbina, dato noto: $p[1] = 80$ bar)

Per il punto 4_is di fine pompaggio isoentropico, alla stessa pressione $p[4]$ del punto 4 reale, vale:

$$s_{is}[4] = s[3]$$

Da cui posso ricavare $h_{is}[4]$ tramite le funzioni di EES.

Dall'espressione del rendimento isoentropico della pompa si può poi ricavare l'entalpia $h[4]$ del punto 4 reale.

Calcolo $T[4]$, $s[4]$ e $x[2]$ tramite le funzioni di EES a partire dai valori di $h[4]$ e $p[4]$.



Esercizio 7 – Ciclo Rankine con irreversibilità

Portata d'acqua di raffreddamento al condensatore

Bilancio di energia al condensatore:

$$Q_{cond} = \dot{m}_{raff} * c_{p_{water}} * (T_{w,out} - T_{w,in}) = m_{vapore} * (h_2 - h_3)$$

Dove $c_{p_{water}}$ è il calore specifico dell'acqua.

Per comodità, indico i punti di ingresso e uscita dell'acqua dal condensatore come 5 e 6 rispettivamente per poterli avere nella tabella *arrays* di EES:

$$T[5] = Tw_in = 15^{\circ}\text{C}$$

$$T[6] = TW_out = 35^{\circ}\text{C}$$



Esercizio 7 – risultati

I risultati che si ottengono su EES sono:

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$$\eta_p = 0.85$$

$$\eta_t = 0.85$$

$$\eta_{th} = 0.3143$$

$$\dot{m}_{vap} = 123.5$$

$$\dot{P}_{net} = 100000$$

$$\dot{P}_{pompa} = 1169$$

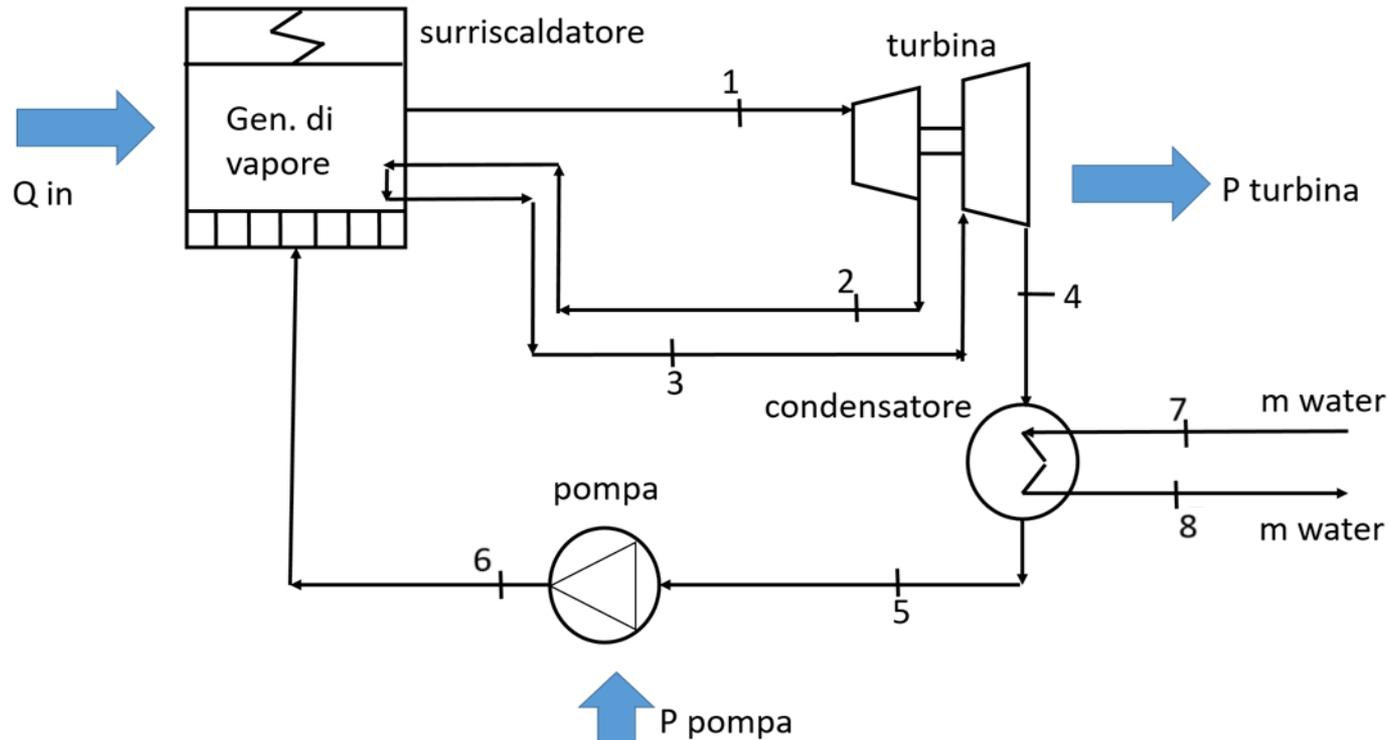
$$\dot{P}_{turb} = 101169$$

$$\dot{Q}_{cond} = 218120$$

$$\dot{Q}_{in} = 318120$$

	1	2	3	4	5	6	7	8
Sort	x_i	T_i	P_i	h_i	s_i	$h_{is,i}$	$x_{is,i}$	$s_{is,i}$
[1]	1	295	80	2759	5.745			
[2]	0.735	41.51	0.08	1940	6.204	1795	0.6749	5.745
[3]	0	41.51	0.08	173.8	0.5925			
[4]		42.09	80	183.3	0.597	181.9		0.5925

Esercizio 8 – Ciclo di Hirn con riscaldamento

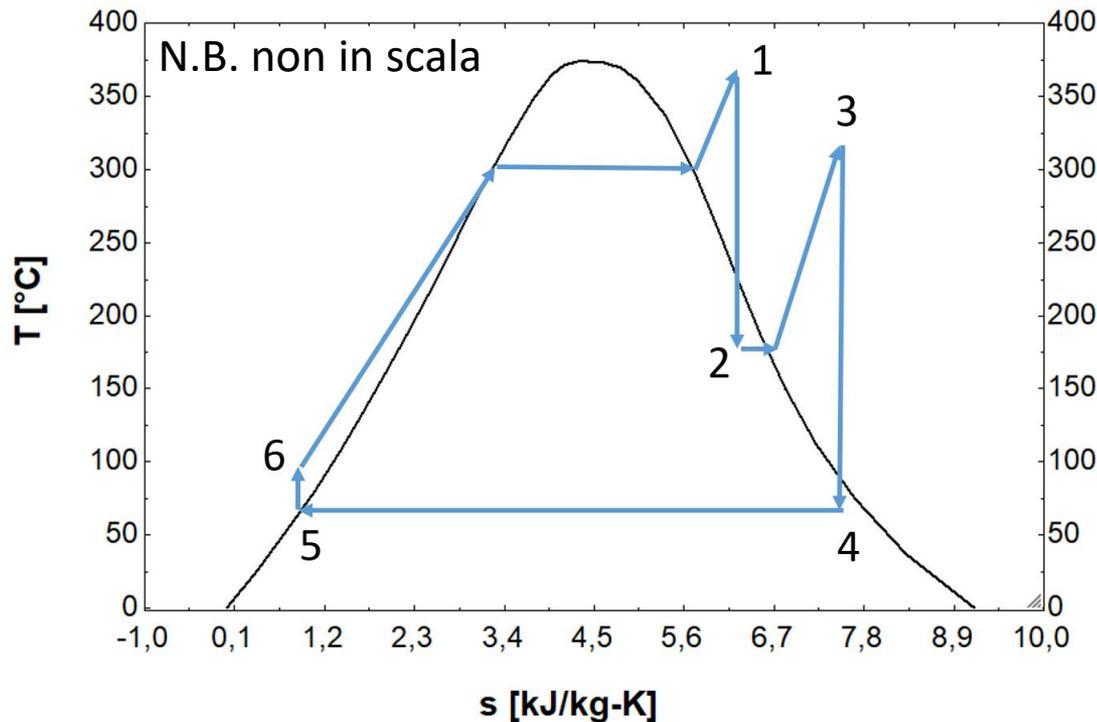


- $P[1] = 80 \text{ bar}$
- $T[1] = 480^\circ\text{C}$
- $P[2] = 7 \text{ bar}$

- $T[3] = 440^\circ\text{C}$
- $P[4] = 0.08 \text{ bar}$
- Potenza netta richiesta 100 MW

Si considera il caso di trasformazioni isoentropiche in turbina e pompa, con condensazione completa del vapore al condensatore.

Esercizio 8 – Ciclo di Hirn ideale con riscaldamento



$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{turbina,1\ stadio} + P_{turbina,2\ stadio} - P_{pompa}}{\dot{m}(h_1 - h_6) + \dot{m}(h_3 - h_2)}$$



Esercizio 8 – Ciclo di Hirn ideale con riscaldamento

Procedo a determinare i punti da 1 a 5 in termini di T , p , h , s .

Punto 1

Essendo in presenza di surriscaldamento, il punto 1 non sarà più sulla curva di saturazione; è quindi necessario avere a disposizione il valore della temperatura, che insieme alla pressione costituisce il set di variabili indipendenti a partire dalle quali è possibile calcolare le altre variabili termodinamiche.

$$P[1] = 80 \text{ bar (noto)}$$

$$T[1] = 480 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calcolo $s[1]$ e $h[1]$ tramite le funzioni di EES.

Punto 2

Per determinare il punto 2 si procede come fatto nell'esercizio 6, conoscendo la pressione $p[2]$ e considerando l'espansione ideale isoentropica.



Esercizio 8 – Ciclo di Hirn ideale con riscaldamento

Punto 3

$$T[3] = 440 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nell'ipotesi in cui **non vi siano perdite di carico** negli scambi di calore:

$$p[3]=p[2]$$

Calcolo le altre proprietà termodinamiche a partire dalle funzioni EES.

Punto 4

Conoscendo la pressione al condensatore, nell'ipotesi in cui vengano **trascurate le perdite di carico negli scambiatori** e si consideri l'espansione nel secondo stadio della turbina **ideale isoentropica**, procedo al calcolo delle proprietà nel punto 4 analogamente a come effettuato per il punto 2.

Punto 5 e punto 6

Le proprietà termodinamiche a valle del condensatore e dopo la pompa vengono calcolate in modo analogo a quanto fatto nell'es. 6, trascurando le perdite di carico e considerando una pompa isoentropica.



Esercizio 8 – risultati

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$$\eta_{th} = 0.4033$$

$$\dot{m}_{vap} = 65.62$$

$$\dot{P}_{net} = 100000$$

$$\dot{P}_{pompa} = 527.97$$

$$\dot{P}_{turbina.st1} = 39828$$

$$\dot{P}_{turbina.st2} = 60700$$

$$\dot{Q}_{cond} = 147969$$

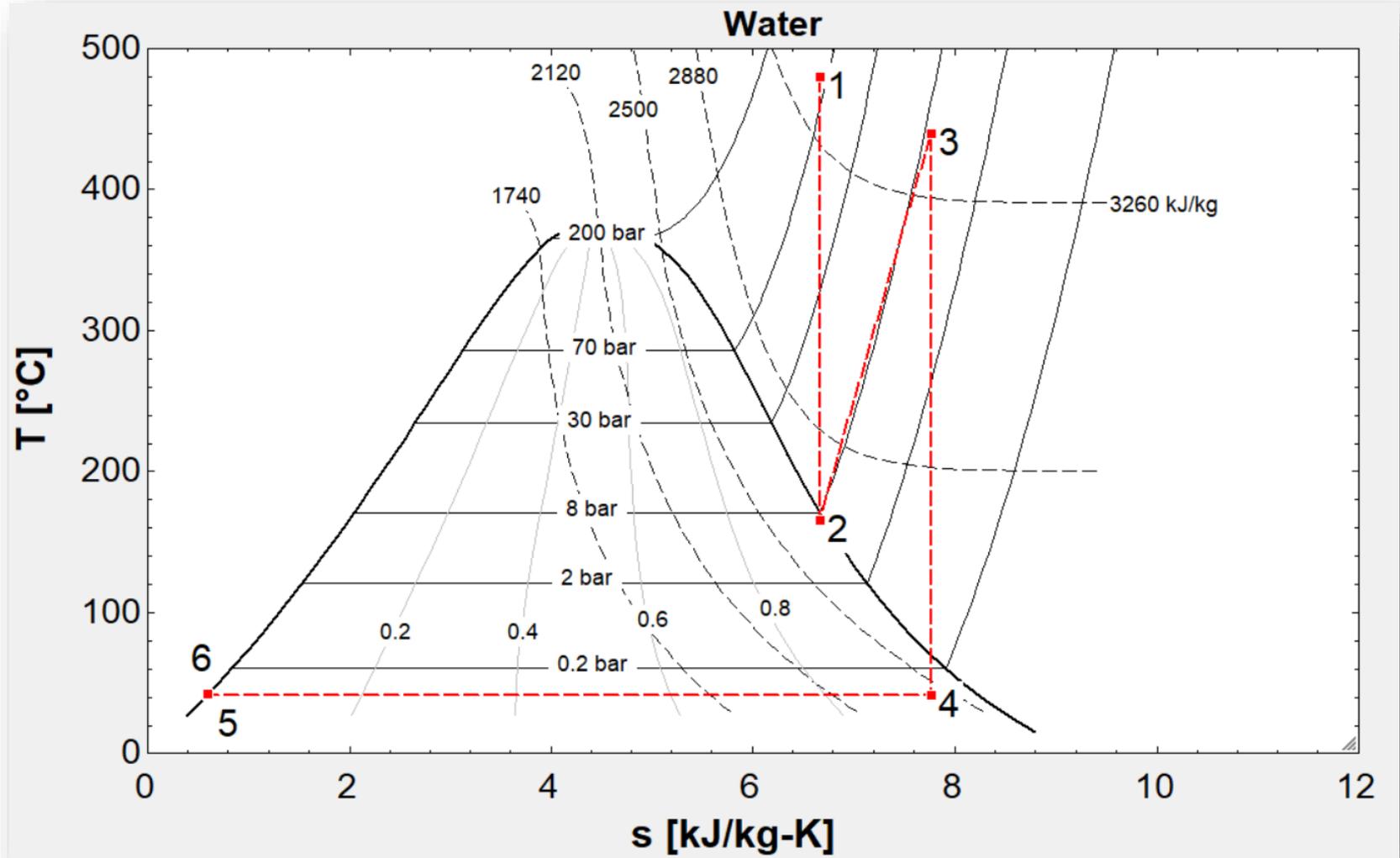
$$\dot{Q}_{in} = 247969$$

$$\dot{Q}_{in.st1} = 207863$$

$$\dot{Q}_{in.st2} = 40106$$

Sort	1 h_i [kJ/kg]	2 P_i [bar]	3 s_i [kJ/kg-K]	4 T_i [°C]	5 x_i [-]
[1]	3350	80	6.661	480	
[2]	2743	7	6.661	164.9	0.9903
[3]	3354	7	7.759	440	
[4]	2429	0.08	7.759	41.51	0.9387
[5]	173.8	0.08	0.5925	41.51	0
[6]	181.9	80	0.5925	41.75	

Esercizio 8 – risultati





Esercizio 9 – Ciclo di Hirn reale con riscaldamento

Per la prossima lezione: si consideri lo stesso impianto descritto nell'esercizio 8, ma si imposti un rendimento isoentropico per la turbina (entrambi gli stadi) e la pompa pari a 85%.

Si determini:

1. Rendimento termico (di primo principio dell'impianto)
2. Il calore fornito dal generatore di vapore per portare il vapore dal punto 6 al punto 1 e per portare il vapore dal punto 2 al punto 3
3. il calore che deve essere asportato al condensatore Q_{cond} .
4. Nell'ipotesi in cui l'acqua di raffreddamento al condensatore entri ad una temperatura $T[7]$ di 15°C ed esca alla temperatura $T[8]$ di 35°C , calcolare la portata di acqua di raffreddamento necessaria al condensatore.



Esercizio 9 – risultati

1. $\eta_{th} = 0,3507$
2. $Q_{in_61} = 245 \text{ MW}$; $Q_{in_23} = 40,2 \text{ MW}$;
3. $Q_{cond} = 185 \text{ MW}$
4. $m_{water} = 2211 \text{ kg/s}$