

## Esercitazione 7

### Oggetto: Macchine termodinamiche operatrici

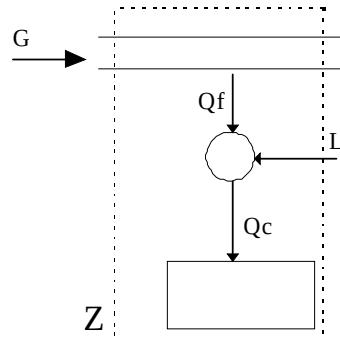
1. Una macchina frigorifera opera in regime stazionario con due serbatoi di calore rispettivamente a temperatura  $T_i = 10^\circ\text{C}$  e  $T_s = 50^\circ\text{C}$ . Si chiede di determinare l'efficienza frigorifera nell'ipotesi che la macchina sia reversibile. [7]

2. Determinare l'efficienza di una pompa di calore che opera reversibilmente tra due serbatoi di calore rispettivamente a temperatura  $T_s = 40^\circ\text{C}$  e  $T_i = -10^\circ\text{C}$ . [6.26]

3. Una macchina operatrice (frigorifero) opera in modo irreversibile tra due sorgenti a temperatura costante  $T_s = 300\text{K}$  e  $T_i = 250\text{K}$ . La potenza termica da estrarre dal serbatoio freddo è pari a 25 kW, mentre il rendimento di secondo principio della macchina è 0.55. Calcolare la potenza meccanica necessaria alla macchina. [9.09 kW]

4. In una macchina frigorifera di un impianto di condizionamento ambientale si tratta un flusso  $G = 30 \text{ kg/min}$  di aria che viene raffreddata a pressione costante  $P_a = 1 \text{ atm}$  dalla temperatura di  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  alla temperatura  $T_2 = 25^\circ\text{C}$ . Come sorgente superiore si utilizza un ambiente alla temperatura costante  $T_s = 38^\circ\text{C}$ . Si chiede, con l'ipotesi di considerare l'aria un gas perfetto di massa molare  $M_m = 29 \text{ kg/kmole}$ :

- l'equazione di bilancio energetico per il sistema Z illustrato in figura;
- la potenza minima necessaria per eseguire il processo descritto.



[-1566 W]

5. In un capannone industriale con un volume  $V_0 = 4000 \text{ m}^3$  l'aria ha una temperatura  $T_0 = 14^\circ\text{C}$  ed una pressione  $P_0 = 1 \text{ atm}$ . Il capannone, supposto termicamente isolato verso l'esterno ed a volume costante, viene riscaldato sino alla temperatura finale  $T_f = 25^\circ\text{C}$  con l'impiego di una pompa di calore con  $\text{COP}_{pdC} = 10$  che opera utilizzando una sorgente fredda alla temperatura costante  $T_i = 10^\circ\text{C}$ . Determinare:

- il lavoro necessario per eseguire il riscaldamento;
- se il processo è reversibile, irreversibile o impossibile;
- nel caso di processo irreversibile la produzione di entropia per irreversibilità.

[3881 kJ, irrev, 9271 J/K]

6. Una pompa di calore viene utilizzata per riscaldare (a  $V=cost$ ) una massa  $M=1000 \text{ kg}$  di un fluido ( $c= 3 \text{ kJ/kgK}$ ) dalla temperatura  $T_1= 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  alla temperatura  $T_2= 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . La pompa di calore utilizza come sorgente inferiore una sorgente di calore a temperatura  $T_0= 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Determinare il lavoro assorbito da una pompa di calore che opera reversibilmente, il COP della pompa di calore reversibile e il maggior lavoro (lavoro dissipato) che occorre fornire ad una pompa di calore reale con  $COP=2.5$ . **[4738 kJ, 6.33, 7262 kJ]**

$$1 \quad T_i = 10^\circ C \quad T_s = 50^\circ C \quad S_{irr} = 0 \quad \epsilon_F ?$$

$$\epsilon_F = \frac{T_i}{T_s - T_i + \frac{T_s T_i S_{irr}}{0}} = 7,08$$

$$2 \quad T_s = 40^\circ C \quad T_i = -10^\circ C \quad S_{irr} = 0 \quad \epsilon_{PDC} ?$$

$$\epsilon_{PDC} = \frac{T_s}{T_s - T_i + \frac{T_s T_i S_{irr}}{0}} = 6,26$$

$$3 \quad T_s = 300^\circ K \quad T_i = 250^\circ K \quad Q_i \rightarrow 25 \text{ kW} \quad \eta_{II} = 55\% \quad L ?$$

$$\eta_{II} = \frac{\epsilon_F}{\epsilon_{F_{II}}} \quad \epsilon_{F_{II}} = \frac{T_i}{T_s - T_i} = 5 \Rightarrow \epsilon_F = 2,75$$

$$\epsilon_F = \frac{Q_i}{L} \Rightarrow L = 9,09 \text{ kJ}$$

$$4 \quad G = 30 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad P_0 = 10 \text{ atm} \quad T_1 = 35^\circ C \quad T_2 = 25^\circ C \quad T_s = 38^\circ C \quad M_m = 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$$

EQUAZIONI BILANCIO?  $L^*$  MIN?

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE}{dT} = \dot{Q}_c = G(h_1 - h_2 + g(z_1 - z_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}) + \dot{Q}_z - \dot{L} \\ \frac{dS}{dT} = \frac{\dot{Q}_c}{T_c} = G(s_1 - s_2) + \dot{S}_q + \dot{S}_{irr} \end{array} \right. \quad \text{ADIABATICA POTENZA MINIMA}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G c_p (T_1 - T_2) - \dot{L} = \dot{Q}_c \quad Q_F = \dot{Q}_c + \dot{L} = G c_p (T_1 - T_2) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_c = T_c G \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \end{array} \right.$$

$$L^*_{MIN} = \dot{Q}_F - \dot{Q}_c = 133 \text{ J}$$

$$5 \quad V_0 = 4000 \text{ m}^3 \quad T_0 = 14^\circ C \quad P_0 = 10 \text{ atm} \quad T_f = 25^\circ C \quad \epsilon_{PDC} = 10 \quad T_s = 50^\circ C$$

$$L^* ? \quad \text{REVERSIBILE/IRREVERSIBILE/IMPOSSIBILE?} \quad S_{irr} ? \quad R^* = \frac{R}{M_m}$$

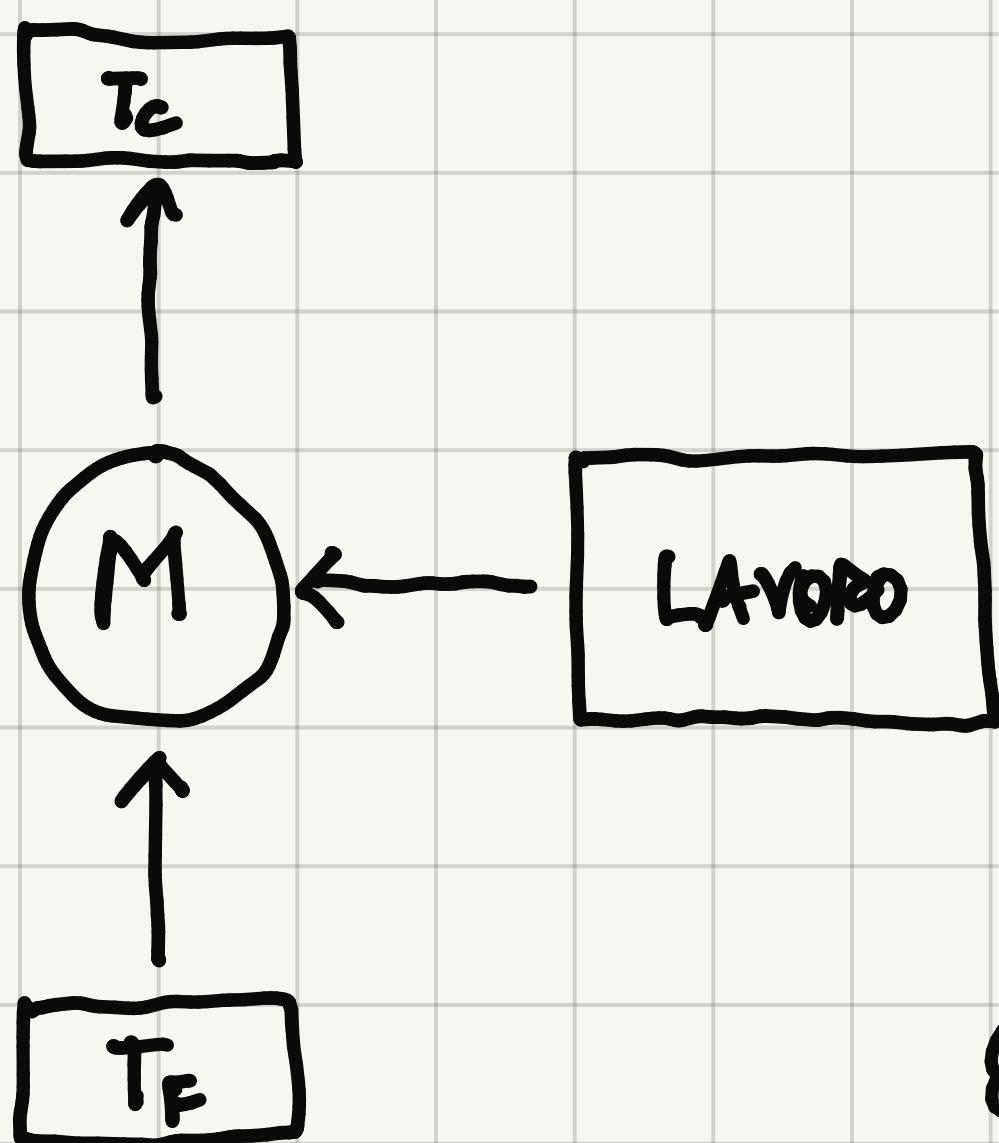
$$M_m = 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} \quad P_0 V_0 = m R^* T_0 \rightarrow m = 4923 \text{ kg} \quad C_V = \frac{5}{2} R^*$$

$$V \text{ COSTANTE} \rightarrow Q = \Delta U = MC_V(T_f - T_i) = 52,926 \text{ MJ}$$

$$\epsilon_{PDC} = \frac{Q}{L} \rightarrow L = 5,2926 \text{ MJ}$$

$$\Delta S_M = MC_V \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) = 132,64 \frac{\text{kJ}}{\text{OK}}$$

$$\Delta S_F = -\frac{Q_f}{T_i} = -\frac{Q-L}{T_i} = -168,23 \frac{\text{kJ}}{\text{OK}}$$



$$\Delta S_C = \Delta S_M + \Delta S_F = 35,59 \text{ kJ}$$

$\Delta S_C > 0 \Rightarrow \text{IRREVERSIBILE}$

$$\epsilon_{PDC} = \frac{T_f}{T_f - T_i + \frac{T_i T_f S_{IRR}}{Q}} \Rightarrow S_{IRR} = 47,6 \frac{\text{J}}{\text{OK}}$$

6 ISOCORA  $M=1000 \text{ kg}$   $C=3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg OK}}$   $T_1=70^\circ\text{C}$   $T_2=80^\circ\text{C}$   $T_0=20^\circ\text{C}$   $S_{IRR}=0$

$L?$   $\epsilon_{PDC}?$   $L_{MAX}$  SE  $\epsilon=25$

$$\epsilon_{PDC} = \frac{Q_{ISOCORA}}{L} \quad Q_{ISOCORA} = \Delta U = MC\Delta T = 30 \text{ MJ}$$

$$\cancel{\Delta S_C + \Delta S_M + \Delta S_F} = S_{IRR} \rightarrow MC \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \rightarrow Q_f = 25,262 \text{ MJ}$$

$$L = Q_{ISOCORA} - Q_f = 4,738 \text{ MJ} \quad \epsilon_{PDC} = 6,33$$

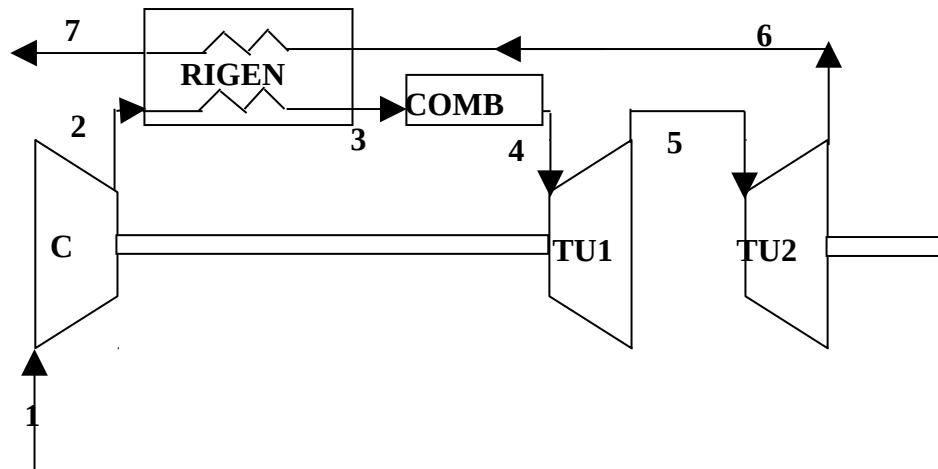
$$L_{MAX} = L_{IRR} - L = \frac{Q_{ISOCORA}}{\epsilon} - L = 7,262 \text{ MJ}$$

## Esercitazione 8

### Oggetto: Cicli a gas

1. Una macchina termodinamica ciclica realizza un ciclo a gas costituito da 3 trasformazioni quasi-statiche: trasformazione AB isoentropica tra  $P_A = 1$  bar e  $T_A = 27^\circ\text{C}$  e  $P_B = 3$  bar; trasformazione BC isoterma sino a  $P_C = 1$  bar; trasformazione isobara CA. Determinare il rendimento termodinamico del ciclo sapendo che viene utilizzato un gas biatomico di massa molare  $M_m = 29$  kg/kmole. **[0.14]**
2. Un ciclo Joule-Brayton chiuso e internamente reversibile opera tra le temperature  $T_1 = 27^\circ\text{C}$  e  $T_3 = 827^\circ\text{C}$ . Il fluido di lavoro è aria (gas biatomico  $M_m = 28.9$  kg/kmol). La temperatura di fine compressione è  $T_2 = 300^\circ\text{C}$ . Si richiede di:
  - calcolare il rendimento del ciclo;
  - verificare se è possibile operare una rigenerazione;
  - calcolare il rendimento del ciclo nel caso in cui la turbina abbia un rendimento di espansione isoentropica  $\eta_T = 0.8$ .**[0.48; si; 0.28]**
3. Un ciclo Joule-Brayton chiuso e internamente reversibile opera tra le temperature di  $T_1 = 300$  K e  $T_3 = 1200$  K. Il fluido di lavoro è aria (gas biatomico  $M_m = 28.9$  kg/kmol). La pressione  $p_1$  all'ingresso del compressore è  $P_1 = 100$  kPa. Il calore fornito al ciclo è di  $q_c = 670$  kJ/kg. Si determinino:
  - Il lavoro specifico netto
  - Il rendimento del ciclo**[294.5 kJ/kg; 0.44]**
4. Si consideri una turbina a gas, funzionante secondo un ciclo Joule-Brayton ideale, con rapporto di compressione  $r = 6$ . Il fluido di lavoro è aria. La temperatura all'ingresso del compressore è  $T_1 = 280$  K, mentre quella all'ingresso della turbina è di  $T_3 = 1250$  K. Determinare:
  - La temperatura del gas all'uscita del compressore e all'uscita della turbina
  - Il rapporto tra lavoro di compressione e lavoro fornito dalla turbina
  - Il rendimento termodinamico.**[ $T_2 = 467.2$  K;  $T_4 = 749.2$  K; 0.374; 0.4]**
5. Si consideri un ciclo a gas costituito da tre trasformazioni quasi-statiche: AB isobara a  $p = 5$  bar fino a  $T_B = 800$  K, BC isoentropica fino a  $T_C = 200$  K, CA isoterma. Considerando  $\text{H}_2$  come fluido di lavoro, determinare il rendimento del ciclo. **[0.54]**
6. La pressione e la temperatura all'inizio della compressione di un ciclo Otto ad aria sono  $P_1 = 1$  atm e  $T_1 = 27^\circ\text{C}$ . Il rapporto di compressione volumetrico è  $r = 8$ . Durante la combustione viene ceduto al fluido una quantità di calore  $q_c = 2000$  kJ/kg. Determinare il rendimento termodinamico del ciclo e la massima temperatura raggiunta. **[0.565, 3480 K]**
7. La pressione e la temperatura all'inizio della compressione di un ciclo Diesel ad aria sono  $P_1 = 1$  atm e  $T_1 = 27^\circ\text{C}$ . Il rapporto di compressione volumetrico è  $r = 15$ . Durante la combustione viene ceduto al fluido una quantità di calore  $q_c = 2000$  kJ/kg. Determinare il rendimento termodinamico del ciclo e la massima temperatura raggiunta. **[0.548, 2878 K]**
8. Si consideri il sistema di turbina a gas in figura, funzionante secondo un ciclo Joule-Brayton chiuso e internamente reversibile ad aria ( $M_m = 28.9$  kg/kmol). Siano  $P_1 = 100$  kPa,  $T_1 = 300$  K, il rapporto di compressione  $r = 6$  e  $T_4 = 1600$  K. Il compressore assorbe tutta e sola la potenza prodotta dalla turbina TU1 mentre la turbina TU2 produce potenza utile (netta) pari a 150 kW.

Tutti i componenti sono assunti essere ideali.



Si determinino:

- La pressione all'uscita della turbina TU1 ( $P_5$ )
- Il lavoro specifico netto
- La portata di aria
- La temperatura  $T_3$  all'ingresso del combustore
- Il rendimento termico del ciclo

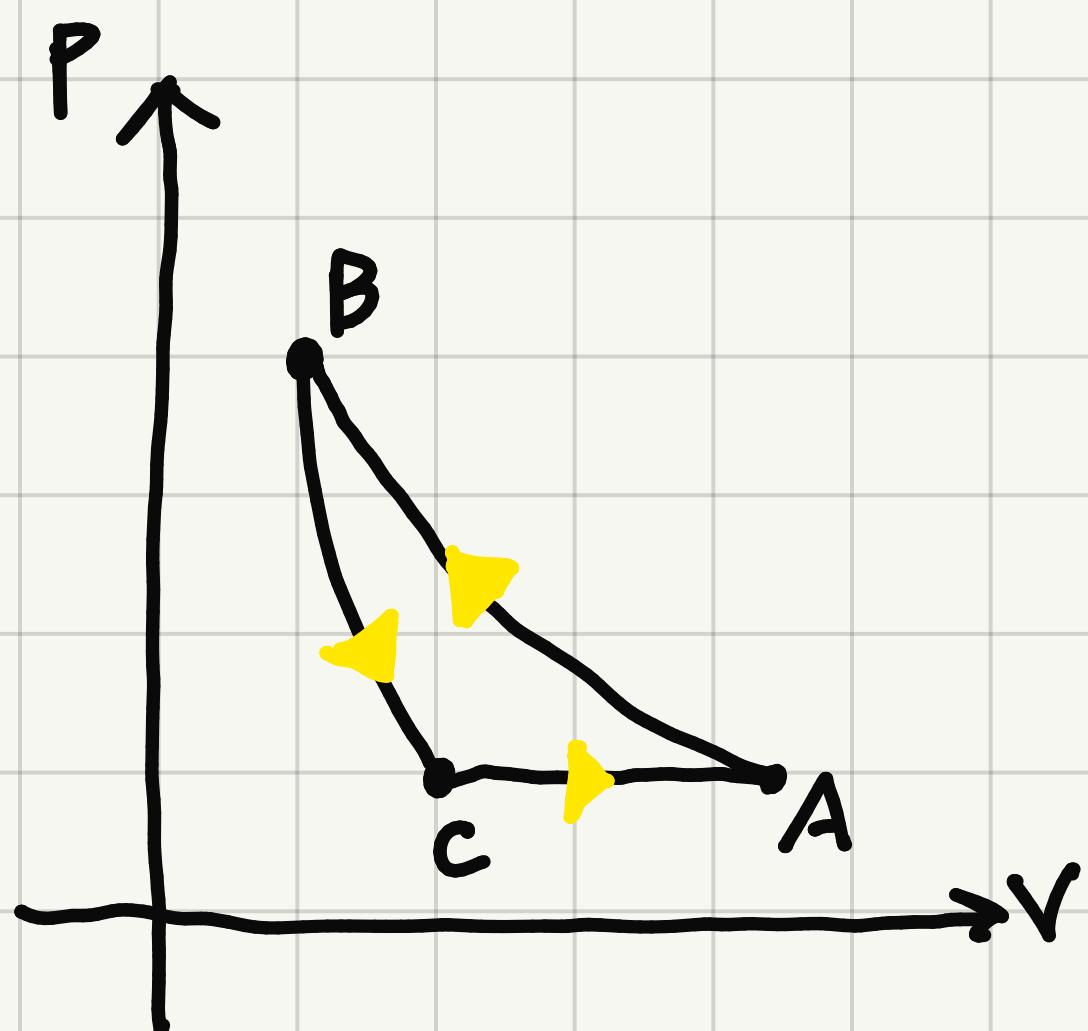
[376 kPa; 444 kJ/kg; 0.34 kg/s; 959 K; 0.69]

$$1 \quad P_A = 1 \text{ Bar} \quad T_A = 27^\circ\text{C} \quad P_B = 3 \text{ Bar} \quad P_C = 1 \text{ Bar}$$

GAS BIATOMICO  $M_m = 29 \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}}$  ??

$$\eta_2 = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_C|}$$

SI MA  $Q_F$  QUANDO  $Q < 0$ ;  $Q_C$  QUANDO  $Q > 0$



- AB ISOENTROPICA  $\Rightarrow Q = 0$
- BC ISOTERMA  $\Rightarrow Q = m \Gamma \Delta h$
- CA ISOBARA  $\Rightarrow Q = m c_p \Delta T$

$$\Delta h = R^* \ln\left(\frac{P_B}{P_C}\right) \quad P_A T_A^{\frac{n}{1-n}} = P_B T_B^{\frac{n}{1-n}}$$

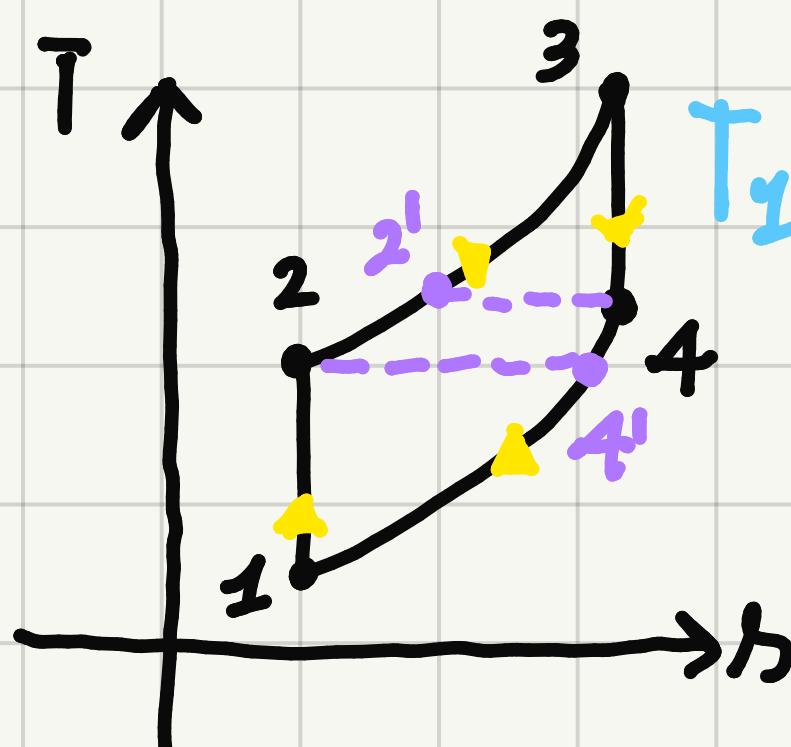
$$n = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5} \Rightarrow T_B = 410,82^\circ\text{K} \Rightarrow Q_{BC} = m \cdot 129,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{CA} = m \cdot \frac{7}{5} \cdot \frac{R}{M_m} \cdot \Delta T = m \cdot 111,064 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \eta_2 = 1 - \frac{m \cdot 111,064}{m \cdot 129,4} = 14,2\%$$

2 JOULE-BRAYTON  $T_1 = 27^\circ\text{C}$   $T_3 = 827^\circ\text{C}$  BIATOMICO  $M_m = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$

$T_2 > 300^\circ\text{C}$   $\eta_{ID}$ ? RIGENERAZIONE?  $\eta_{LT} = 0,8 \rightarrow \eta_{ID}$ ?



$$T_1 = 300,15^\circ\text{K} \quad T_2 = 573,15^\circ\text{K} \quad T_3 = 1100,15^\circ\text{K}$$

$$\eta_{ID} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 47,6\%$$

DEMANDA

$\downarrow \times K \text{ MOM}_3$

RIGENERAZIONE  $\Leftrightarrow T_4 > T_2$

(T FINE ESPANSIONE > T FINE COMPRESSIONE)

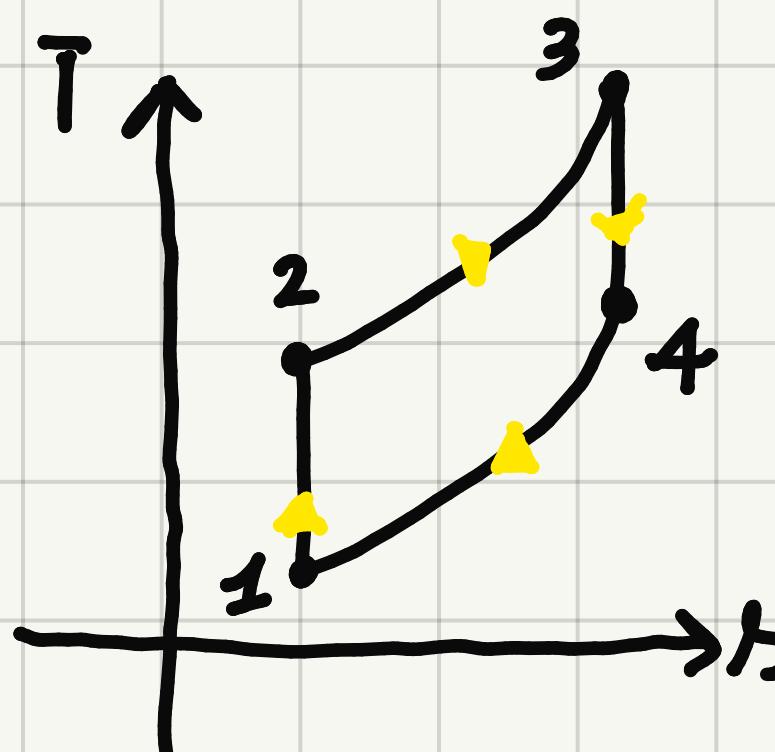
CICLO SIMMETRICO  $\Rightarrow T_1 T_3 = T_2 T_4 \rightarrow T_4 > 576^\circ\text{K} > T_2$  ✓

$$\eta_{LT} = \frac{\text{L'ERALE}}{\text{L'IDEALE}} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_2 - h_3} = \frac{C_P(T_3 - T_{4'})}{C_P(T_3 - T_4)} \Rightarrow T_{4'} = 680,95^\circ\text{K}$$

$$\eta_{ID} = 1 - \frac{T_{4'} - T_1}{T_3 - T_2} = 27,7\%$$

3 JOULE-BRAYTON  $T_1 = 300^\circ\text{K}$   $T_3 = 1200^\circ\text{K}$  BIATOMICO  $M_m = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmole}}$

$P_1 = 100\text{kPa}$   $q_c = 670 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  l?  $\eta_{ID}$ ?



$$q_c = C_P(T_3 - T_2)$$

$$C_P = \frac{7}{2} \cdot \frac{R}{M_m}$$

$$\rightarrow T_2 = 535^\circ\text{K}$$

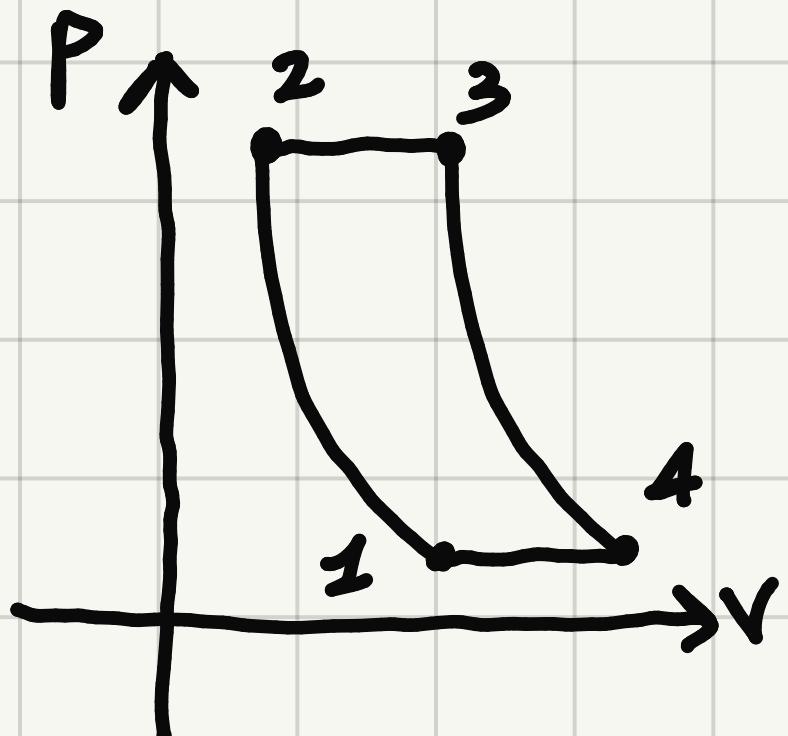
CICLO SIMMETRICO  $\Rightarrow T_1 T_3 = T_2 T_4$

$$\rightarrow T_4 = 672,9^\circ\text{K} \rightarrow \eta_{ID} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 43,9\%$$

$$l = \eta_{ID} q_c = 294,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4 JOULE-BRAYTON  $r=6$  BIATOMICO  $M_m=28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

$T_1=280^\circ\text{K}$   $T_3=1250^\circ\text{K}$   $T_2?$   $T_4?$   $\frac{l_{e_e}}{l_e}?$   $\eta_2?$



$$r = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow P_2 = 6 P_1$$

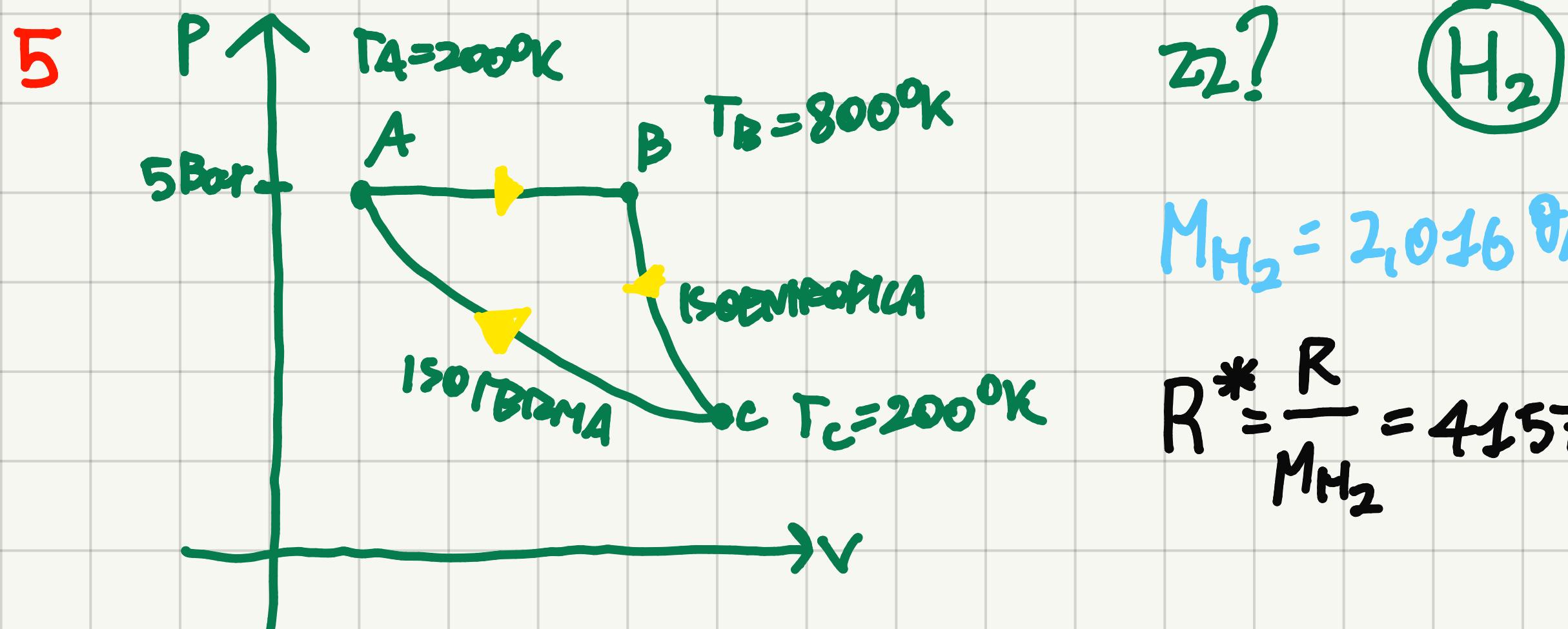
$$1-2 \text{ ADIABATICA} \Rightarrow P_1 T_1^{\frac{n}{2-n}} = P_2 T_2^{\frac{n}{2-n}}$$

$$n = \frac{C_P}{C_V} = \frac{7}{5} \Rightarrow T_2 = 467,18^\circ\text{K}$$

$$\text{CICLO SIMETRICO} \Rightarrow T_1 T_3 = T_2 T_4 \rightarrow T_4 = 749,18^\circ\text{K}$$

$$\begin{aligned} l_c &= C_P (T_2 - T_1) \\ l_e &= C_P (T_4 - T_3) \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \left| \frac{l_c}{l_e} \right| &= \frac{|T_2 - T_1|}{|T_4 - T_3|} = 37,4\% \end{aligned} \right.$$

$$\eta_{ID} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 40\%$$



$$\eta_2 = 1 - \frac{|Q_{FI}|}{|Q_{CI}|}$$

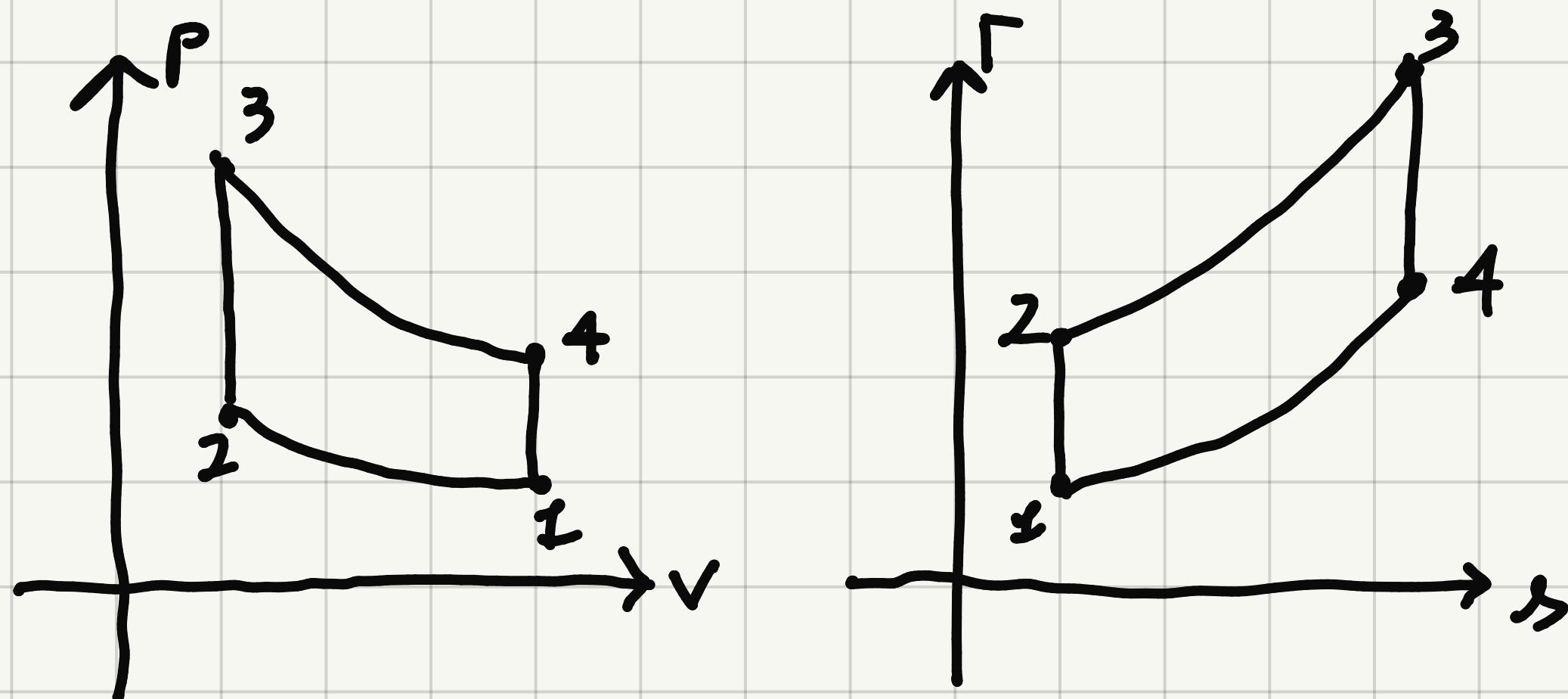
$$q_{AB} = C_P \Delta T_{AB} = \frac{7}{2} R^* \cdot 600^\circ\text{K} = 8730,12 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$q_{BC} = T \Delta s_{BC} \quad \Delta s_{BC} = C_P \ln \left( \frac{T_4}{T_B} \right) - R^* \ln \left( \frac{P_A}{P_B} \right)$$

$$P_B T_B^{\frac{n}{2-n}} = P_C T_C^{\frac{n}{2-n}} \text{ con } n = \frac{7}{5} \rightarrow P_C = 0,039 \text{ Bar}$$

$$\Rightarrow q_{BC} = -4023 \frac{KJ}{kg} \Rightarrow \eta_2 = 1 - \frac{4023}{8730,12} = 53,9\%$$

6 ARIA  $P_1 = 1000m$   $T_1 = 27^\circ C$   $r_v = 8$   $q_c^e = 2000 \frac{KJ}{kg}$   $\eta_2?$   $T_{MAX}?$



$$\eta_2 = 1 - r^{1-k} \quad k = \frac{C_p}{C_v} = 1,4 \quad \eta_2 = 56,5\% \quad R^* = \frac{R}{M_{ARIA}}$$

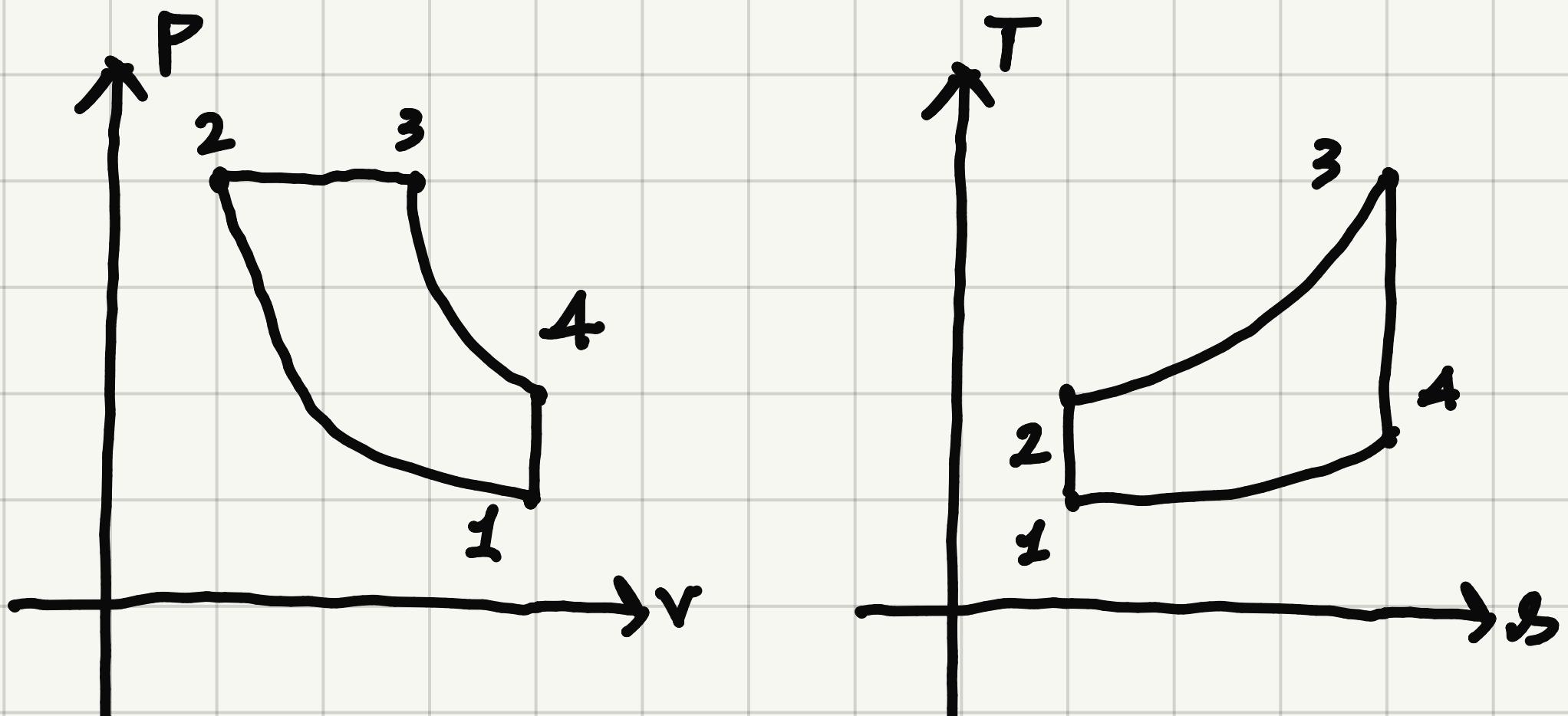
$$q_c = C_v(T_3 - T_2) \rightarrow T_3 = T_{MAX} = \frac{q_c}{C_v} + T_2 \quad C_v = \frac{5}{2} R^*$$

$$1-2 \text{ ADIABAT}(CA) \quad T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1} \quad n = K$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1 \cdot (r_v^{k-1}) = 689,56 \text{ K}$$

$$\Rightarrow T_3 = 3478,96 \text{ K}$$

7 ARIA  $P_1 = 1000m$   $T_1 = 27^\circ C$   $r_v = 15$   $q_c^e = 2000 \frac{KJ}{kg}$   $\eta_2?$   $T_{MAX}?$



	P [Pa]	T [°K]
1	10 <sup>5</sup>	264,15
2		886,70
3		2880,72
4		1362,26

$$T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1} \quad n = K = \frac{C_P}{C_V} = 1,4$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = T_1 \cdot (r_v)^{k-1} = 886,70 \text{ °K}$$

$$q_c = C_V (T_3 - T_2) \rightarrow T_3 = T_{MAX} = \frac{q_c}{C_V} + T_2 \quad C_V = \frac{5}{2} R^*$$

$$\Rightarrow T_3 = 2880,72 \text{ °K}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_4}{T_4} = \frac{P_1}{T_1} \\ P_3 = P_2 = \frac{P_1 \cdot r T_2}{T_1} \\ T_4 = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot T_3 \end{array} \right. \Rightarrow T_4 = 1362,26 \text{ °K}$$

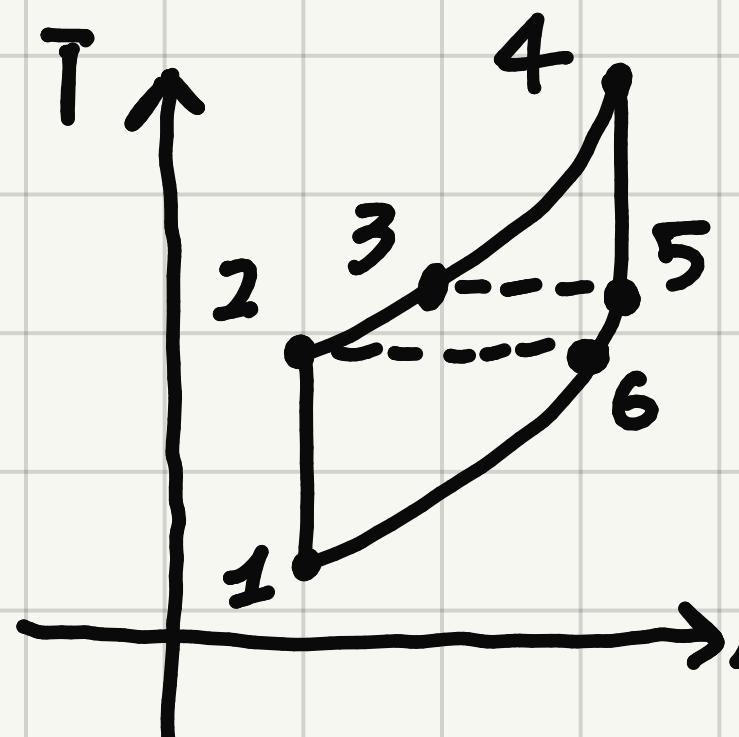
$$\eta = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_2)}{C_P(T_3 - T_2)} = 54,8\%$$

8

BIATOMICO  $M_m = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$   $P_1 = 100 \text{kPa}$   $T_1 = 300^\circ\text{K}$   $r_p = 6$

$T_4 = 1600^\circ\text{K}$  TU<sub>2</sub> ASSORBE, TU<sub>2</sub> PRODUCE  $W_{TU_2} = 150 \text{ kW}$

$P_5$ ?  $L'$ ?  $\dot{m}$ ?  $T_3$ ?  $T_6$ ?



CICLO JOULE-BRAUN

CON RIGENERAZIONE

$$1-2 \text{ ADIABATICA) } P_1 T_1^{\frac{n}{n-1}} = P_2 T_2^{\frac{n}{n-1}}$$

$$n = K = \frac{C_P}{C_V} = \frac{7/2 R^*}{5/2 R^*} = 7/5 \Rightarrow T_2 = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} T_1 = r_p^{\frac{n-1}{n}} T_1 = 500^\circ\text{K}$$

	P [kPa]	T [°K]
1	100	300
2	600	500
3	600	959
4	600	1600
5	376	1400
6	100	959

$$P_2 = P_3 = P_4 = r P_1 = 600 \text{kPa}$$

COMPRESSORE ASSORBE TU<sub>1</sub>  $L'_{TU_1}$

$$\rightarrow C_p(T_5 - T_4) + C_p(T_2 - T_1) = 0$$

$$\Rightarrow T_5 = 1400^\circ\text{K}$$

$$P_4 T_4^{\frac{n}{n-1}} = P_5 T_5^{\frac{n}{n-1}} \Rightarrow P_5 = 376 \text{kPa}$$

6-1 ISOBARA  $\rightarrow P_6 = 100 \text{kPa}$

$$P_3 T_5^{\frac{n}{n-1}} = P_6 T_6^{\frac{n}{n-1}} \rightarrow T_6 = 959^\circ\text{K}$$

$$L' = C_p(T_5 - T_6) = 441,66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{TU}_2) \quad W_{TU_2} = L' \cdot \dot{m} \rightarrow \dot{m} = 0,34 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{COMPONENTI IDEALI} \Rightarrow \epsilon_r = 1 \quad 1 = \frac{T_3 - T_2}{T_6 - T_2} \Rightarrow T_3 = T_6 = 959^\circ\text{K}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_4} = 68,7\%$$

## Esercitazione 9

### Oggetto: Cicli a vapore

1.Un impianto a ciclo Rankine con potenzialità di 600 MW impiega acqua come fluido di lavoro. I limiti di pressione tra cui opera sono  $P_{\min} = 0.05$  bar e  $P_{\max} = 150$  bar, mentre la temperatura massima del ciclo è  $T_{\max} = 600^\circ\text{C}$ . All'uscita della pompa l'entalpia dell'acqua è  $h=160 \text{ kJ/kg}$  mentre in turbina si ha una espansione isoentropica. Si chiede di calcolare il rendimento del ciclo e la portata di acqua dell'impianto. **[0.44; G=394.8 kg/s]**

2.In un impianto frigorifero a vapore viene usato come fluido di lavoro R134a. Questo fluido entra in una valvola di laminazione a monte dell'evaporatore come liquido saturo a temperatura  $T_1 = 40^\circ\text{C}$  ed esce dall'evaporatore come vapore saturo secco a temperatura  $T_3 = -8^\circ\text{C}$ , scambiando calore con una corrente d'acqua (liquido incomprimibile) che entra nel condensatore a temperatura  $T_i = 50^\circ\text{C}$  ed esce a temperatura  $T_u = 5^\circ\text{C}$ . Si chiede di determinare la pressione all'uscita della valvola di laminazione ed il rapporto tra le portate di acqua e di Freon nell'evaporatore. **[P = 0.217 MPa; 0.724]**

3.In un impianto a ciclo Rankine di una centrale termoelettrica l'acqua, all'uscita della pompa, ha una temperatura  $T_2 = 35^\circ\text{C}$  e pressione  $P_2 = 100$  bar; entra nella caldaia ove viene fornita potenza termica sino ad avere vapore surriscaldato con temperatura  $T_5 = 600^\circ\text{C}$ . All'uscita dalla caldaia il vapore viene fatto espandere in una turbina adiabatica ed isoentropica sino alla pressione  $P = 0.0234$  bar. Si chiede di determinare il calore ceduto all'acqua durante il riscaldamento in caldaia ed il lavoro prodotto dalla turbina ( per unità di massa fluente).

**[Q = 3531 kJ/kg; L = 1604 kJ/kg]**

4.Un pompa di calore ideale sfrutta un ciclo di Carnot che opera tra la una pressione minima  $P_{\min} = 0.01$  bar ed una pressione massima  $P_{\max} = 0.3$  bar. Il fluido di lavoro è acqua. All'ingresso del condensatore il fluido è nello stato di vapore saturo secco mentre all'uscita è liquido saturo. Calcolare:

- L'efficienza della pompa di calore reversibile
- Il rapporto tra il lavoro del compressore ed il lavoro della turbina **[5.51; 17.85]**

5.In un impianto frigorifero a vapore (R134a) si ha una temperatura di evaporazione  $T_2 = -28^\circ\text{C}$  ed una pressione massima  $P_1 = 8$  bar. Si chiede di determinare l'efficienza frigorifera del ciclo, la portata di fluido refrigerante, la potenza ceduta dal condensatore e l'entropia prodotta per irreversibilità nella valvola di laminazione sapendo che la potenza termica che deve essere asportata dalla sorgente inferiore è  $Q_F = 200$  kW. **[3.083, 264.86 kW; 0.053 kW/K]**

6. Una pompa di calore operante con R134a fornisce 15 kW, necessari per mantenere un edificio alla temperatura  $T_C = 20^\circ\text{C}$  mentre l'ambiente esterno è a  $T_F = 5^\circ\text{C}$ . La pressione di funzionamento nell'evaporatore è  $P_2 = 2.4$  bar mentre all'uscita del condensatore si ha liquido saturo a pressione  $P_1 = 8$  bar. Determinare la portata di fluido refrigerante, la potenza meccanica richiesta dal compressore, l'efficienza della pompa di calore, l'efficienza di una pompa di calore che operi reversibilmente, l'entropia prodotta per irreversibilità nel sistema.

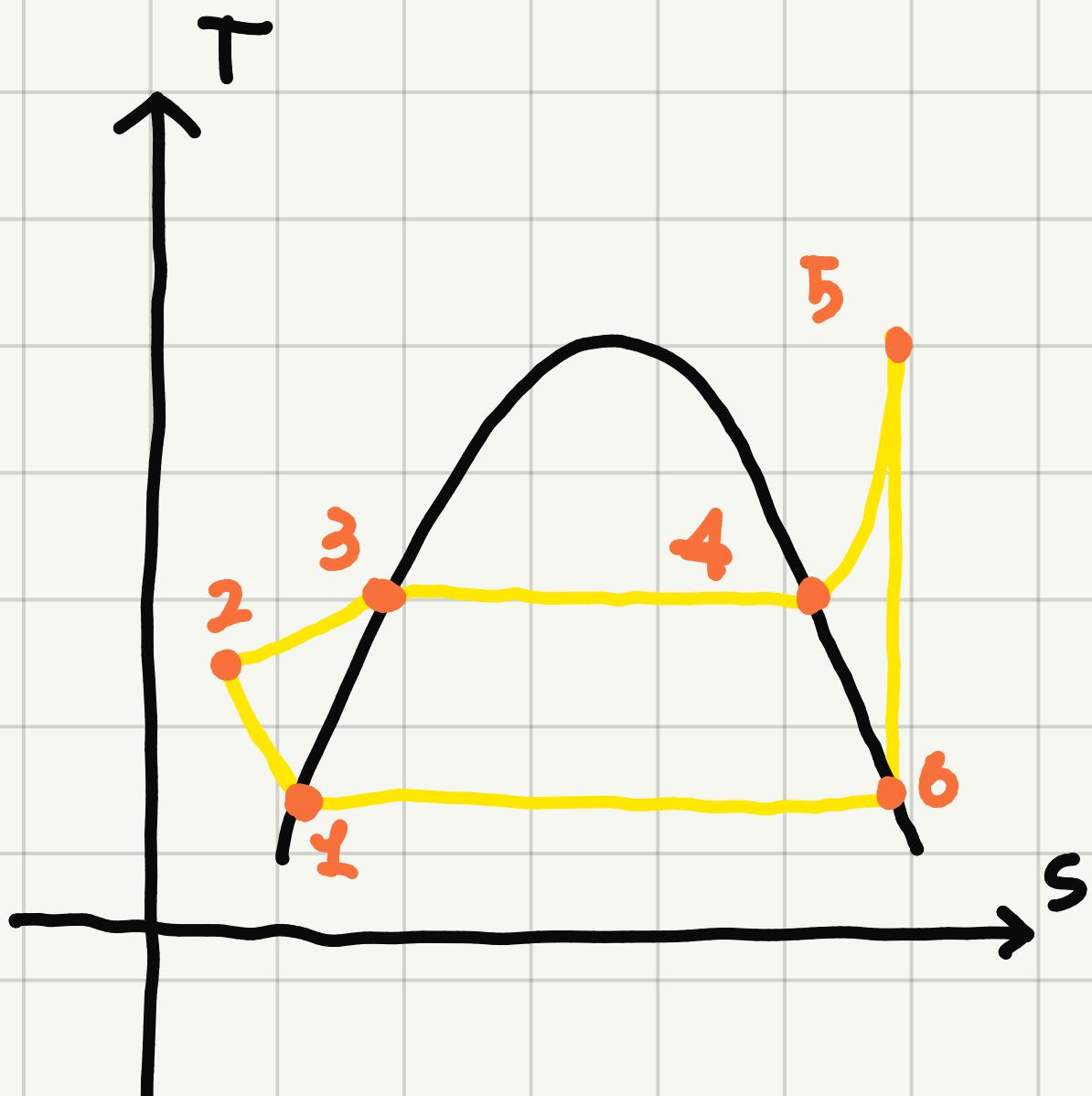
**[0.0852 kg/s, 2.13 kW, 7, 19.53, 5,1 W/K]**

1

$$L_{NETTO} = 600 \text{ MW} \quad P_{MIN} = 0,05 \text{ Bar} \quad P_{MAX} = 150 \text{ Bar}$$

$$T_{MAX} = 600^\circ\text{C} \quad h_2 = 160 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{ESPANSIONE ISENTROPICA } \eta_2? \quad \dot{m}?$$

CICLO RANKINE CON SURRISCALDAMENTO



$$\eta_L = \frac{L_{NETTO}}{q_c}$$

$$L_{NETTO} = L_{TURBINA} - L_{COMPRESSORE}$$

$$L_{TURBINA} = h_5 - h_6$$

$$L_{COMPRESSORE} = h_2 - h_1$$

$T_5 > T_{SAT}(15 \text{ MPa}) = 342,24^\circ\text{C} \Rightarrow \text{VAPORE SURRISCALDATO}$

$$h_5 = 6,6676 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{OK}} \quad h_5 = 3582,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_c = h_5 - h_2 = 3422,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_6 = h_2 \Rightarrow x = \frac{h_3 - h_2(5 \text{ kPa})}{h_{20}(5 \text{ kPa})} = \frac{6,6676 - 0,4764}{7,8187} = 78,2\%$$

$$h_6 = h_2(5 \text{ kPa}) + x \cdot h_{20}(5 \text{ kPa}) = 137,82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,782 \cdot 2423,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \\ = 2033,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$L_{TURBINA} = h_5 - h_6 = 1549,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = h_2(5 \text{ kPa})$$

$$L_{COMPRESSORE} = h_2 - h_1 = 2218 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

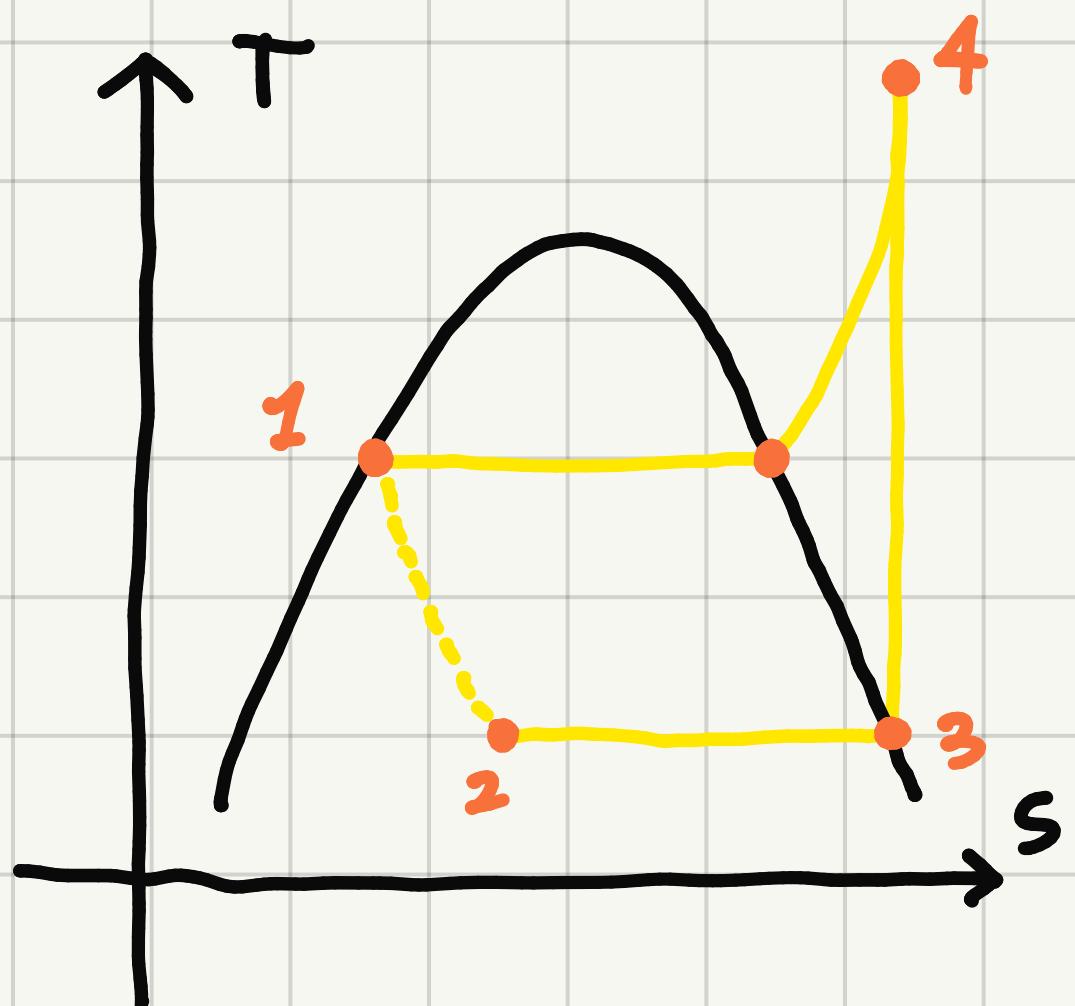
$$L_{NETTO} = L_{TURBINA} - L_{COMPRESSORE} = 1526,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_L = \frac{L_{NETTO}}{q_c} = 44,6\%$$

$$\dot{m} = \frac{L_{NETTO}}{e_{NETTO}} = 392,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$2 \quad T_1 = 40^\circ C \quad T_3 = -8^\circ C \quad T_{iH_2O} = 50^\circ C \quad T_{uH_2O} = 5^\circ C \quad P_2? \quad \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{R134a}}?$$

### CICLO FRIGORIFICO A VAPORE



$$h_1 = h_2 = h_v(40^\circ C) = 106,19 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_3 = h_v(-8^\circ C) = 242,54 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta h_{23} = 136,35 \frac{kJ}{kg}$$

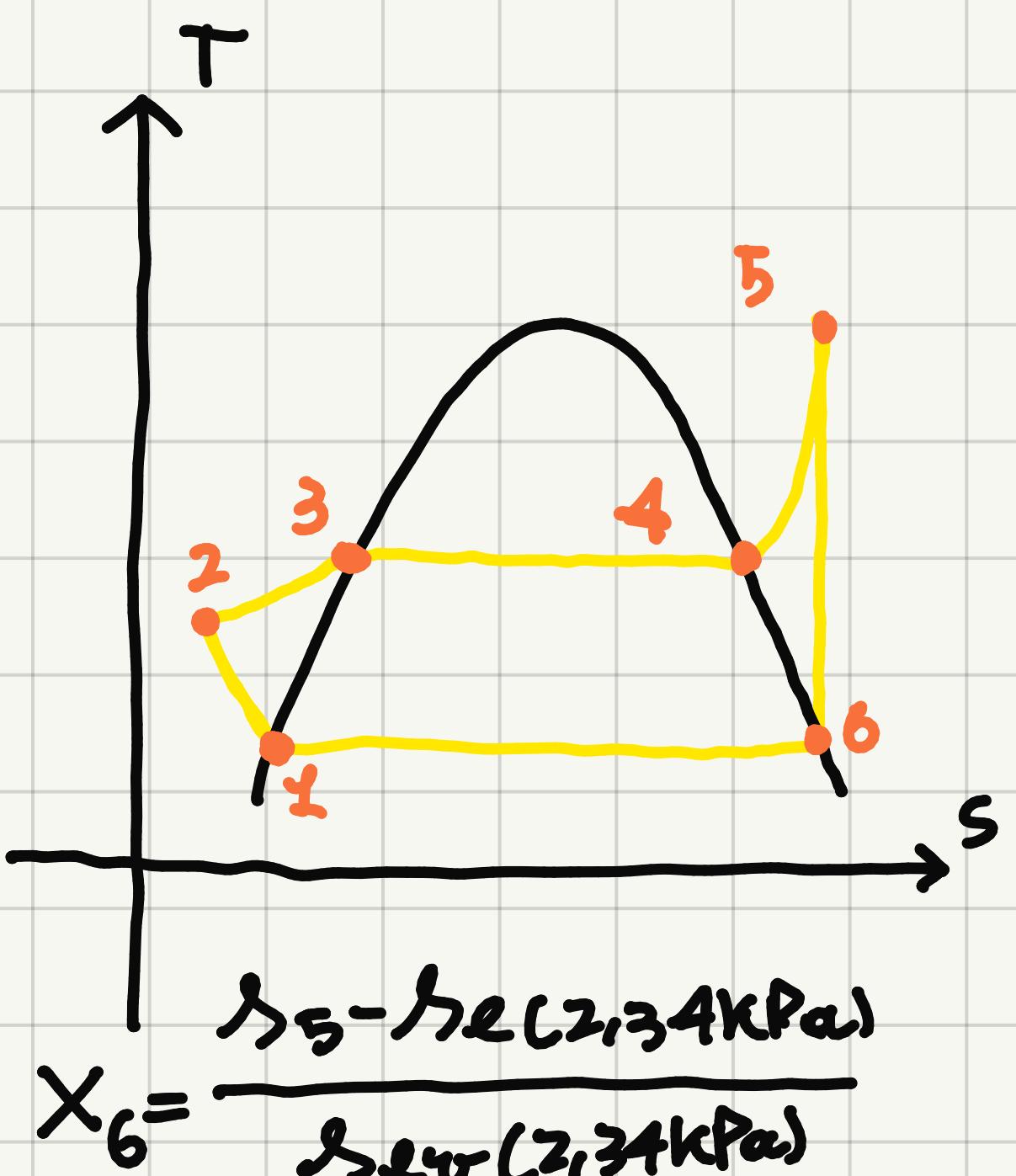
A

$$Q_{H_2O}^{\leftarrow} = \dot{m}_{H_2O} C_{H_2O} \Delta T_{H_2O} = \dot{m}_{R134a} \Delta h_{23} R_{134a}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{R134a}} = 72,4 \quad P_2 = P_3 = P_{R134a}(-8^\circ C) = 217,04 \text{ kPa}$$

$$3 \quad T_2 = 35^\circ C \quad P_2 = 100 \text{ Bar} \quad T_5 = 600^\circ C \quad P = 0,0234 \text{ Bar} \quad q? \quad l?$$

### CICLO RANKINE CON SUPERSCALDAMENTO



$$l = h_5 - h_6 \quad q = h_5 - h_2$$

$$T_5 > T_{SAT} = 341,06^\circ C$$

$$h_5 = h_v(600^\circ C, 10 \text{ MPa}) = 3625,3 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_5 = h_v(600^\circ C, 0,0234 \text{ Bar}) = 6,9029 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$X_6 = \frac{h_5 - h_2(2,34 \text{ kPa})}{h_{2v}(2,34 \text{ kPa})}$$

$$PESO = \frac{P-2}{2,5-2} = 0,68$$

$$\vartheta_e(2,34 \text{ kPa}) = (1-PESO) \cdot \vartheta_e(2 \text{ kPa}) + PESO \cdot \vartheta_e(2,5 \text{ kPa}) = 0,29558 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{OK}}$$

$$\vartheta_{eo}(2,34 \text{ kPa}) = (1-PESO) \cdot \vartheta_{eo}(2 \text{ kPa}) + PESO \cdot \vartheta_{eo}(2,5 \text{ kPa}) = 8,373276 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{OK}}$$

$$X_6 = 78,9\%$$

$$h_6 = h_e(2,34 \text{ kPa}) = (1-PESO) \cdot h_e(2 \text{ kPa}) + PESO \cdot h_e(2,5 \text{ kPa}) = 80,2868 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

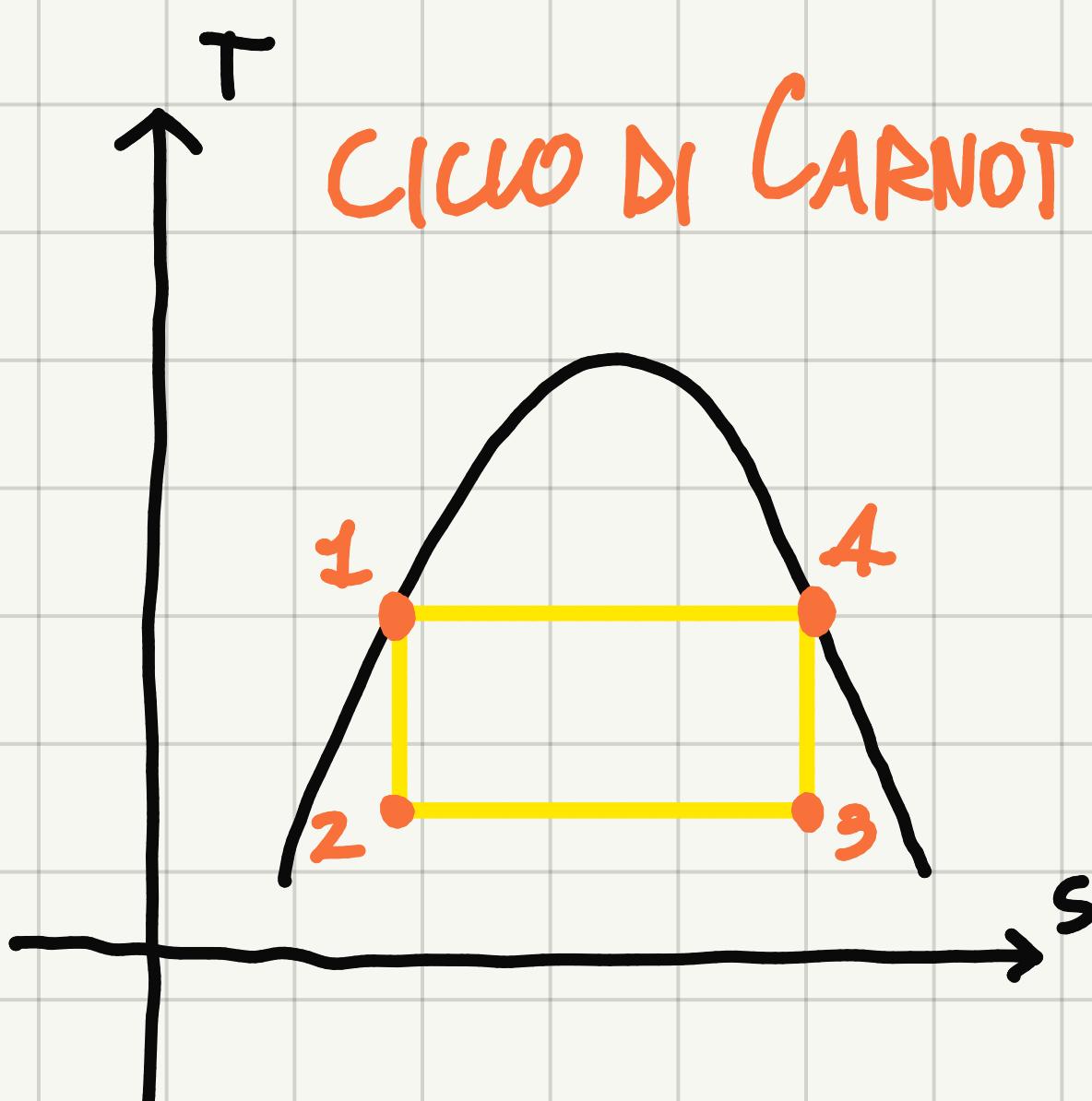
$$l = 160 + \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = h_e(35^\circ\text{C}) + \vartheta_e(35^\circ\text{C}) \cdot \Delta P =$$

$$= h_e(35^\circ\text{C}) + \vartheta_e(35^\circ\text{C}) \cdot (P_2 - P_{2,\text{SAT}}(35^\circ\text{C})) = 156,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q = 3468,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4  $P_{\text{MIN}} = 0,01 \text{ Bar}$   $P_{\text{MAX}} = 0,3 \text{ Bar}$   $\epsilon_{\text{PDC}}$ ?  $\frac{\epsilon_{\text{COMPRESSORE}}}{\epsilon_{\text{TURBINA}}}$ ?



1 LIQUIDO  
4 VAPORE

$$T_1 = T_4 = T_{\text{SAT}}(30 \text{ kPa}) = 69,10^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_1 = \vartheta_e(30 \text{ kPa}) = 0,9439 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{OK}}$$

$$h_1 = h_e(30 \text{ kPa}) = 289,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\vartheta_4 = \vartheta_v(30 \text{ kPa}) = 7,7686 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = h_v(30 \text{ kPa}) = 2625,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = T_3 = T_{\text{SAT}}(1 \text{ kPa}) = 6,98^\circ\text{C}$$

$$X_2 = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_e(1 \text{ kPa})}{\vartheta_{eo}(1 \text{ kPa})} = \frac{0,9439 - 0,1019}{8,8697} = 9\%$$

$$X_3 = \frac{h_4 - h_{2c}(1\text{ kPa})}{h_{2c}(1\text{ kPa})} = \frac{77626 - 0,1019}{8,8697} = 86,4\%$$

$$\epsilon_{PDC} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = 5,51$$

$$\vec{l}_{\text{TURBINA}} = h_1 - h_2$$

$$\vec{l}_{\text{COMPRESSEUR}}^{\leftarrow} = h_4 - h_3$$

$$h_2 = h_{2c}(1\text{ kPa}) + X_2 \cdot h_{cr}(1\text{ kPa}) = 252,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

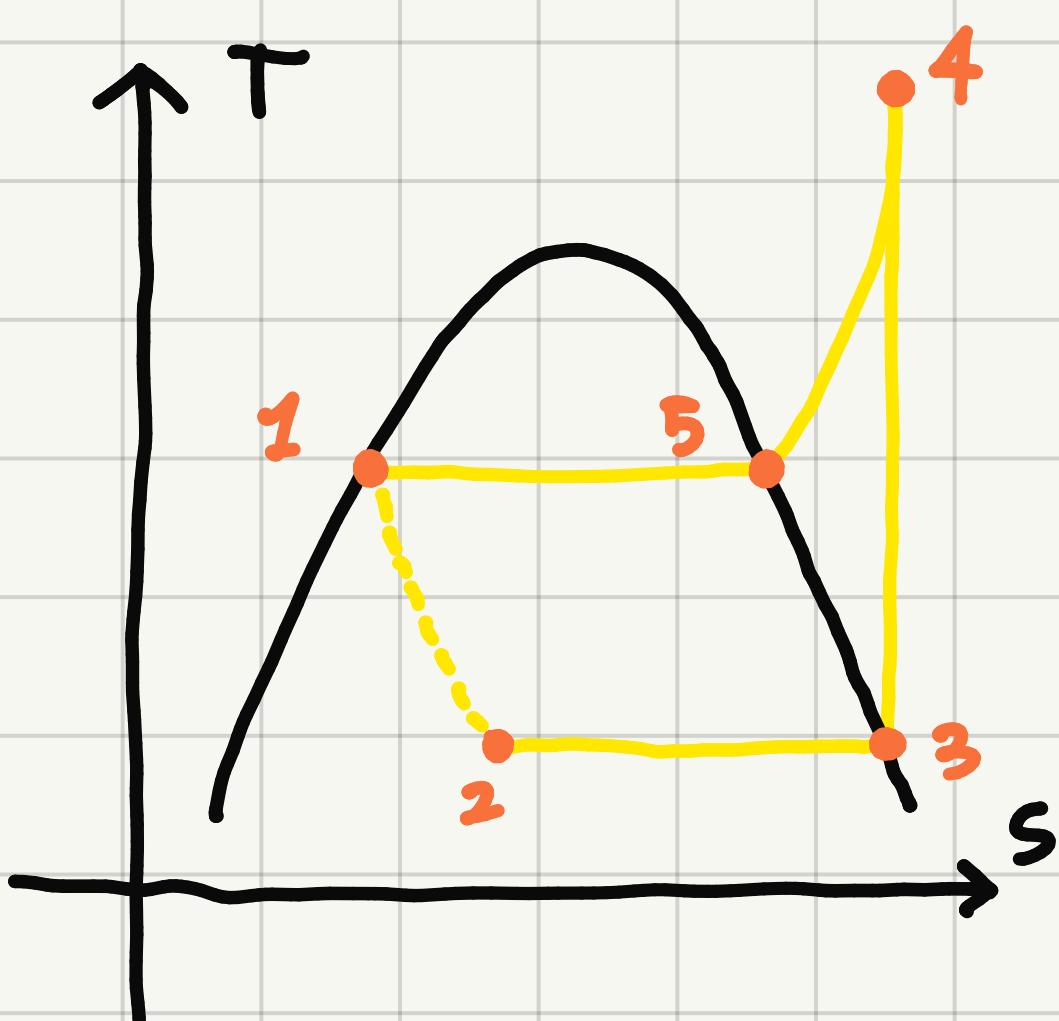
$$h_3 = h_{2c}(1\text{ kPa}) + X_3 \cdot h_{cr}(1\text{ kPa}) = 2176,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow \vec{l}_{\text{TURBINA}} = 36,29 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \vec{l}_{\text{COMPRESSEUR}} = 449,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{\vec{l}_{\text{COMPRESSEUR}}}{\vec{l}_{\text{TURBINA}}} = 12,37$$

5  $T_2 = -28^\circ\text{C}$   $P_2 = 8\text{ bar}$   $Q_F = 200\text{ kW}$   $\epsilon_F$ ?  $\dot{m}$ ?  $\vec{l}_{\text{CONDENSATORE}}$ ?  $\Delta S_{\text{min}}$ ?

CICLO FRIGORIFICO A VAPORE  $T_4 = 45^\circ\text{C}$



$$\epsilon_F = \frac{Q_F}{L} = \frac{Q_F}{\dot{m}(h_4 - h_2)}$$

$$Q_F = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$h_2 = h_1 = h_2(0,8\text{ MPa}) = 93,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = h_{2c}(-28^\circ\text{C}) = 230,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \dot{m} = 1,46 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$T_4 > T_{SAT}(0,8\text{ MPa}) \Rightarrow$  SUPERESCAUDATO  $h_4 = h(45^\circ\text{C}, 0,8\text{ MPa})$

$$\frac{T_4 - 40^\circ\text{C}}{50^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}} = \frac{h_4 - h(40^\circ\text{C})}{h(50^\circ\text{C}) - h(40^\circ\text{C})} \Rightarrow h_4 = 274,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \epsilon_F = 3,08$$

$$\Delta S_{VAPORI A} = \dot{m} \cdot \Delta s_{VAPORI A} = \dot{m} (s_2 - s_1)$$

$$h_2 = h_2(-28^\circ C) \cdot (1 - x_2) + x_2 \cdot h_{2,v}(-28^\circ C)$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_2(-28^\circ C)}{h_{2,v}(-28^\circ C)} = \frac{93,42 - 14,37}{216,01} = 0,366$$

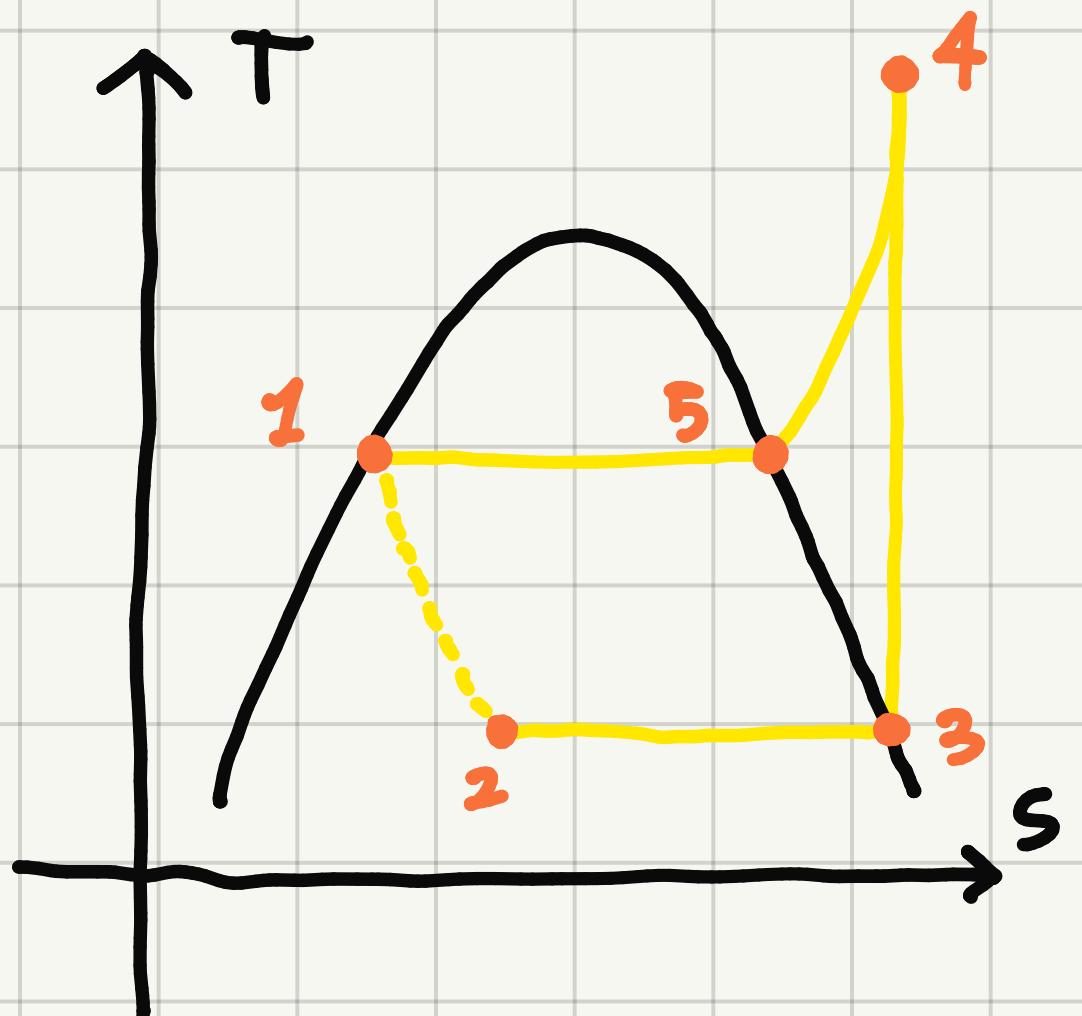
$$\Rightarrow h_2 = 0,382 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$s_1 = s_2 (0,8 \text{ MPa}) = 0,3459 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \Rightarrow \Delta S_{VAPORI A} = 0,0527 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

6  $\dot{Q}_c = 15 \text{ kW}$   $T_c = 20^\circ C$   $T_f = 5^\circ C$   $P_2 = 2,4 \text{ Bar}$   $P_1 = 1 \text{ Bar}$

$\dot{m}$ ?  $L_{\text{COMPRESSORE}}$ ?  $\epsilon_{\text{PDC}}$ ?  $\epsilon_{\text{PDCr}}$ ?  $S_{\text{IRR}}$ ?  $z \leq x \leq ?$

### CICLO FRIGORIFICO A VAPORE



$$\dot{Q}_c = \dot{m} (h_4 - h_1)$$

$$h_1 = h_1(0,8 \text{ MPa}) = 93,42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{35^\circ C - 31,33^\circ C}{40^\circ C - 31,33^\circ C} = \frac{h_4 - h_1(T_{SAT})}{h_4(T_{SAT}) - h_1(T_{SAT})}$$

$$\rightarrow h_4 = 269 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \Rightarrow \dot{m} = 0,085 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$L_{\text{COMPRESSORE}} = \dot{m} (h_4 - h_3) \quad h_3 = h_3(0,24 \text{ MPa}) = 244,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\Rightarrow L_{\text{COMPRESSORE}} = 2,12 \text{ kW} \quad \epsilon_{\text{PDC}} = \frac{\dot{Q}_c}{L} = 7,07$$

$$\epsilon_{\text{PDCr}} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = 19,54$$

$$\frac{ds}{dt} = 0 = -\frac{\dot{Q}_F}{T_f} + \frac{\dot{Q}_C}{T_c} + \dot{S}_{\text{IRR}}$$

$$Q_F = \dot{m} (h_3 - h_2) \quad h_2 = h_1 \Rightarrow S_{\text{IRR}} = 5,11 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

# A4 – Acqua satura [in temperatura] (1)

Es.3

TABELLA A.4

Acqua satura: tabella in temperatura

Temp. °C	Press. sat. kPa	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. $v_l$	Vapore sat. $v_u$	Liquido sat. $u_l$	Evap. $u_{l,u}$	Vapore sat. $u_u$	Liquido sat. $h_l$	Evap. $h_{l,u}$	Vapore sat. $h_u$	Liquido sat. $s_l$	Evap. $s_{l,u}$	Vapore sat. $s_u$
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
<b>Press. sat. MPa</b>												
100	0.10133	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698

# A4 – Acqua satura [in temperatura] (2)

TABELLA A.4  
Acqua satura: tabella in temperatura (*continua*)

Temp. <i>T</i> °C	Press. sat. <i>p<sub>in</sub></i> MPa	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia Interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Evap. <i>u<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>h<sub>l</sub></i>	Evap. <i>h<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>h<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>s<sub>l</sub></i>	Evap. <i>s<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>s<sub>v</sub></i>
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001251	0.05013	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001263	0.04598	1104.28	1596.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001276	0.04221	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001289	0.03877	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001302	0.03564	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001317	0.03279	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001332	0.03017	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001348	0.02777	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001366	0.02557	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001384	0.02354	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001404	0.02167	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001425	0.019948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001447	0.018350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001472	0.016867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001499	0.015488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001561	0.012996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001638	0.010797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001740	0.008813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001893	0.006945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.3	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002213	0.004925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Fonte per le tabelle da A.4 fino ad A.6: J.H. Keenan, F.G. Keyes, P.G. Hill e J.G. Moore, *Steam Tables, SI Units*, Wiley, New York 1978.

## A5 – Acqua satura [in pressione] (1)

TABELLA A.5

Acqua satura: tabella in pressione

Press. <i>p</i> kPa	Temp. sat. <i>T<sub>sat</sub></i> °C	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Evap. <i>u<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>h<sub>l</sub></i>	Evap. <i>h<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>h<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>s<sub>l</sub></i>	Evap. <i>s<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>s<sub>v</sub></i>
0.6113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564

Press. MPa												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

# A5 – Acqua satura [in pressione] (2)

TABELLA A.5  
Acqua satura: tabella in pressione (continua)

Press. <i>p</i> MPa	Temp. sat. <i>T<sub>s</sub></i> °C	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Evap. <i>u<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>h<sub>l</sub></i>	Evap. <i>h<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>h<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>s<sub>l</sub></i>	Evap. <i>s<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>s<sub>v</sub></i>
1.40	195.07	0.001149	0.14084	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001154	0.13177	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001166	0.11349	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001177	0.09963	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001187	0.08875	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001197	0.07998	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001217	0.06668	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001235	0.05707	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001252	0.04978	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001286	0.03944	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001319	0.03244	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001351	0.027437	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001384	0.02352	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001418	0.02048	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6722
10	311.06	0.001452	0.018026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001489	0.015987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001527	0.014263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.3	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001567	0.012780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001611	0.011485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001658	0.010337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001711	0.009306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001770	0.008364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001840	0.007489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001924	0.006657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002036	0.005834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002207	0.004952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	0.6938	4.8013
22	373.80	0.002742	0.003568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	0.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003155	0.003155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

# A6 – Acqua surriscaldata (1)

**TABELLA A.6**  
Acqua surriscaldata

T °C	u m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	u m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	u m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
<i>p</i> = 0.01 MPa (45.81°C)*					<i>p</i> = 0.05 MPa (81.33°C)					<i>p</i> = 0.10 MPa (99.63°C)		
Sat. <sup>†</sup>	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
<i>p</i> = 0.20 MPa (120.23°C)					<i>p</i> = 0.30 MPa (133.55°C)					<i>p</i> = 0.40 MPa (143.63°C)		
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
<i>p</i> = 0.50 MPa (151.86°C)					<i>p</i> = 0.60 MPa (158.85°C)					<i>p</i> = 0.80 MPa (170.43°C)		
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0873	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

\* La temperatura tra parentesi è la temperatura di saturazione a una data pressione.

† Proprietà del vapore saturo a una data pressione.

# A6 – Acqua surriscaldata (2)

TABELLA A.6  
Acqua surriscaldata (*continua*)

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
<i>p</i> = 1.00 MPa (179.91°C)					<i>p</i> = 1.20 MPa (187.99°C)					<i>p</i> = 1.40 MPa (195.07°C)		
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4478	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2984
<i>p</i> = 1.60 MPa (201.41°C)					<i>p</i> = 1.80 MPa (207.15°C)					<i>p</i> = 2.00 MPa (212.42°C)		
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4808	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7664
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8837	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
<i>p</i> = 2.50 MPa (223.99°C)					<i>p</i> = 3.00 MPa (233.90°C)					<i>p</i> = 3.50 MPa (242.60°C)		
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09196	3015.3	3337.2	7.0052
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.11619	3108.0	3456.5	7.2338	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.13243	3285.0	3682.3	7.5085	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.8	7.6837
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6762	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

# A6 – Acqua surriscaldata (3)

Es.3

TABELLA A.6  
Acqua surriscaldata (*continua*)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
<i>p</i> = 4.0 MPa (250.40°C)					<i>p</i> = 4.5 MPa (257.49°C)					<i>p</i> = 5.0 MPa (263.99°C)		
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.04406	2600.1	2798.3	6.0198	0.03944	2597.1	2794.3	5.9734
275	0.05457	2667.9	2886.2	6.2285	0.04730	2650.3	2863.2	6.1401	0.04141	2631.3	2838.3	6.0544
300	0.05884	2725.3	2960.7	6.3615	0.05135	2712.0	2943.1	6.2828	0.04532	2698.0	2924.5	6.2084
350	0.06645	2826.7	3092.5	6.5821	0.05840	2817.8	3080.6	6.5131	0.05194	2808.7	3068.4	6.4493
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.06475	2913.3	3204.7	6.7047	0.05781	2906.6	3195.7	6.6459
450	0.08002	3010.2	3330.3	6.9363	0.07074	3005.0	3323.3	6.8746	0.06330	2999.7	3316.2	6.8186
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.07651	3095.3	3439.6	7.0301	0.06857	3091.0	3433.8	6.9759
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.08765	3276.0	3670.5	7.3110	0.07869	3273.0	3666.5	7.2589
700	0.11095	3462.1	3905.9	7.6198	0.09847	3459.9	3903.0	7.5631	0.08849	3457.6	3900.1	7.5122
800	0.12287	3650.0	4141.5	7.8502	0.10911	3648.3	4139.3	7.7942	0.09811	3646.6	4137.1	7.7440
900	0.13469	3843.6	4382.3	8.0647	0.11965	3842.2	4380.6	8.0091	0.10762	3840.7	4378.8	7.9593
1000	0.14645	4042.9	4628.7	8.2662	0.13013	4041.6	4627.2	8.2108	0.11707	4040.4	4625.7	8.1612
1100	0.15817	4248.0	4880.6	8.4567	0.14056	4246.8	4879.3	8.4015	0.12648	4245.6	4878.0	8.3520
1200	0.16987	4458.6	5138.1	8.6376	0.15098	4457.5	5136.9	8.5825	0.13587	4456.3	5135.7	8.5331
1300	0.18156	4674.3	5400.5	8.8100	0.16139	4673.1	5399.4	8.7549	0.14526	4672.0	5398.2	8.7055
<i>p</i> = 6.0 MPa (275.64°C)					<i>p</i> = 7.0 MPa (285.88°C)					<i>p</i> = 8.0 MPa (295.06°C)		
Sat.	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892	0.02737	2580.5	2772.1	5.8133	0.02352	2569.8	2758.0	5.7432
300	0.03616	2667.2	2884.2	6.0674	0.02947	2632.2	2838.4	5.9305	0.02426	2590.9	2785.0	5.7906
350	0.04223	2789.6	3043.0	6.3335	0.03524	2769.4	3016.0	6.2283	0.02995	2747.7	2987.3	6.1301
400	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408	0.03993	2878.6	3158.1	6.4478	0.03432	2863.8	3138.3	6.3634
450	0.05214	2988.9	3301.8	6.7193	0.04416	2978.0	3287.1	6.6327	0.03817	2966.7	3272.0	6.5551
500	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803	0.04814	3073.4	3410.3	6.7975	0.04175	3064.3	3398.3	6.7240
550	0.06101	3174.6	3540.6	7.0288	0.05195	3167.2	3530.9	6.9486	0.04516	3159.8	3521.0	6.8778
600	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677	0.05565	3260.7	3650.3	7.0894	0.04845	3254.4	3642.0	7.0206
700	0.07352	3453.1	3894.2	7.4234	0.06283	3448.5	3888.3	7.3476	0.05481	3443.9	3882.4	7.2812
800	0.08160	3643.1	4132.7	7.6566	0.06981	3639.5	4128.2	7.5822	0.06097	3636.0	4123.8	7.5173
900	0.08958	3837.8	4375.3	7.8727	0.07669	3835.0	4371.8	7.7991	0.06702	3832.1	4368.3	7.7351
1000	0.09749	4037.8	4622.7	8.0751	0.08350	4035.3	4619.8	8.0020	0.07301	4032.8	4616.9	7.9384
1100	0.10536	4243.3	4875.4	8.2661	0.09027	4240.9	4872.8	8.1933	0.07896	4238.6	4870.3	8.1300
1200	0.11321	4454.0	5133.3	8.4474	0.09703	4451.7	5130.9	8.3747	0.08489	4449.5	5128.5	8.3115
1300	0.12106	4669.6	5396.0	8.6199	0.10377	4667.3	5393.7	8.5475	0.09080	4665.0	5391.5	8.4842
<i>p</i> = 9.0 MPa (303.40°C)					<i>p</i> = 10.0 MPa (311.06°C)					<i>p</i> = 12.5 MPa (327.89°C)		
Sat.	0.02048	2557.8	2742.1	5.6772	0.018026	2544.4	2724.7	5.6141	0.013495	2505.1	2673.8	5.4624
325	0.02327	2646.6	2856.0	5.8712	0.019861	2610.4	2809.1	5.7568	0.016126	2624.6	2826.2	5.7118
350	0.02580	2724.4	2956.6	6.0361	0.02242	2699.2	2923.4	5.9443	0.02000	2789.3	3039.3	6.0417
400	0.02993	2848.4	3117.8	6.2854	0.02641	2832.4	3096.5	6.2120	0.02299	2912.5	3199.8	6.2719
450	0.03350	2955.2	3256.6	6.4844	0.02975	2943.4	3240.9	6.4190	0.02560	3021.7	3341.8	6.4618
500	0.03677	3055.2	3386.1	6.6576	0.03279	3045.8	3373.7	6.5966	0.02801	3125.0	3475.2	6.6290
550	0.03987	3152.2	3511.0	6.8142	0.03564	3144.6	3500.9	6.7561	0.03029	3225.4	3604.0	6.7810
600	0.04285	3248.1	3633.7	6.9589	0.03837	3241.7	3625.3	6.9029	0.03248	3324.4	3730.4	6.9218
650	0.04574	3343.6	3755.3	7.0943	0.04101	3338.2	3748.2	7.0398	0.03460	3422.9	3855.3	7.0536
700	0.04857	3439.3	3876.5	7.2221	0.04358	3434.7	3870.5	7.1687	0.03869	3620.0	4103.6	7.2965
800	0.05409	3632.5	4119.3	7.4596	0.04859	3628.9	4114.8	7.4077	0.04267	3819.1	4352.5	7.5182
900	0.05950	3829.2	4364.8	7.6783	0.05349	3826.3	4361.2	7.6272	0.04658	4021.6	4603.8	7.7237
1000	0.06485	4030.3	4614.0	7.8821	0.05832	4027.8	4611.0	7.8315	0.05045	4228.2	4858.8	7.9165
1100	0.07016	4236.3	4867.7	8.0740	0.06312	4234.0	4865.1	8.0237	0.05430	4439.3	5118.0	8.0937
1200	0.07544	4447.2	5126.2	8.2556	0.06789	4444.9	5123.8	8.2055	0.05813	4654.8	5381.4	8.2717
1300	0.08072	4662.7	5389.2	8.4284	0.07265	4460.5	5387.0	8.3783				

# A6 – Acqua surriscaldata (4)

TABELLA A.6  
Acqua surriscaldata (*continua*)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
<i>p</i> = 15.0 MPa (342.24°C)					<i>p</i> = 17.5 MPa (354.75°C)					<i>p</i> = 20.0 MPa (365.81°C)		
Sat.	0.010337	2455.5	2610.5	5.3098	0.007920	2390.2	2528.8	5.1419	0.005834	2293.0	2409.7	4.9269
350	0.011470	2520.4	2692.4	5.4421								
400	0.015649	2740.7	2975.5	5.8811	0.012447	2685.0	2902.9	5.7213	0.009942	2619.3	2818.1	5.5540
450	0.018445	2879.5	3156.2	6.1404	0.015174	2844.2	3109.7	6.0184	0.012695	2806.2	3060.1	5.9017
500	0.02080	2996.6	3308.6	6.3443	0.017358	2970.3	3274.1	6.2383	0.014768	2942.9	3238.2	6.1401
550	0.02293	3104.7	3448.6	6.5199	0.019288	3083.9	3421.4	6.4230	0.016555	3062.4	3393.5	6.3348
600	0.02491	3208.6	3582.3	6.6776	0.02106	3191.5	3560.1	6.5866	0.018178	3174.0	3537.6	6.5048
650	0.02680	3310.3	3712.3	6.8224	0.02274	3296.0	3693.9	6.7357	0.019693	3281.4	3675.3	6.6582
700	0.02861	3410.9	3840.1	6.9572	0.02434	3398.7	3824.6	6.8736	0.02113	3386.4	3809.0	6.7993
800	0.03210	3610.9	4092.4	7.2040	0.02738	3601.8	4081.1	7.1244	0.02385	3592.7	4069.7	7.0544
900	0.03546	3811.9	4343.8	7.4279	0.03031	3804.7	4335.1	7.3507	0.02645	3797.5	4326.4	7.2830
1000	0.03875	4015.4	4596.6	7.6348	0.03316	4009.3	4589.5	7.5589	0.02897	4003.1	4582.5	7.4925
1100	0.04200	4222.6	4852.6	7.8283	0.03597	4216.9	4846.4	7.7531	0.03145	4211.3	4840.2	7.6874
1200	0.04523	4433.8	5112.3	8.0108	0.03876	4428.3	5106.6	7.9360	0.03391	4422.8	5101.0	7.8707
1300	0.04845	4649.1	5376.0	8.1840	0.04154	4643.5	5370.5	8.1093	0.03636	4638.0	5365.1	8.0442
<i>p</i> = 25.0 MPa					<i>p</i> = 30.0 MPa					<i>p</i> = 35.0 MPa		
375	0.0019731	1798.7	1848.0	4.0320	0.0017892	1737.8	1791.5	3.9305	0.0017003	1702.9	1762.4	3.8722
400	0.006004	2430.1	2580.2	5.1418	0.002790	2067.4	2151.1	4.4728	0.002100	1914.1	1987.6	4.2126
425	0.007881	2609.2	2805.3	5.4723	0.005303	2455.1	2614.2	5.1504	0.003428	2253.4	2373.4	4.7747
450	0.009162	2720.7	2949.7	5.6744	0.006735	2619.3	2821.4	5.4424	0.004961	2498.7	2672.4	5.1962
500	0.011123	2884.3	3162.4	5.9592	0.008678	2820.7	3081.1	5.7905	0.006927	2751.9	2994.4	5.6282
550	0.012724	3017.5	3335.6	6.1765	0.010168	2970.3	3275.4	6.0342	0.008345	2921.0	3213.0	5.9026
600	0.014137	3137.9	3491.4	6.3602	0.011446	3100.5	3443.9	6.2331	0.009527	3062.0	3395.5	6.1179
650	0.015433	3251.6	3637.4	6.5229	0.012596	3221.0	3598.9	6.4058	0.010575	3189.8	3559.9	6.3010
700	0.016646	3361.3	3777.5	6.6707	0.013661	3335.8	3745.6	6.5606	0.011533	3309.8	3713.5	6.4631
800	0.018912	3574.3	4047.1	6.9345	0.015623	3555.5	4024.2	6.8332	0.013278	3536.7	4001.5	6.7450
900	0.021045	3783.0	4309.1	7.1680	0.017448	3768.5	4291.9	7.0718	0.014883	3754.0	4274.9	6.9386
1000	0.02310	3990.9	4568.5	7.3802	0.019196	3978.8	4554.7	7.2867	0.016410	3966.7	4541.1	7.2064
1100	0.02512	4200.2	4828.2	7.5765	0.020903	4189.2	4816.3	7.4845	0.017895	4178.3	4804.6	7.4037
1200	0.02711	4412.0	5089.9	7.7605	0.022589	4401.3	5079.0	7.6692	0.019360	4390.7	5068.3	7.5910
1300	0.02910	4626.9	5354.4	7.9342	0.024266	4616.0	5344.0	7.8432	0.020815	4605.1	5333.6	7.7653
<i>p</i> = 40.0 MPa					<i>p</i> = 50.0 MPa					<i>p</i> = 60.0 MPa		
375	0.0016407	1677.1	1742.8	3.8290	0.0015594	1638.6	1716.6	3.7639	0.0015028	1609.4	1699.5	3.7141
400	0.0019077	1854.6	1930.9	4.1135	0.0017309	1788.1	1874.6	4.0031	0.0016335	1745.4	1843.4	3.9318
425	0.002532	2096.9	2198.1	4.5029	0.002007	1959.7	2060.0	4.2734	0.0018165	1892.7	2001.7	4.1626
450	0.003693	2365.1	2512.8	4.9459	0.002486	2159.6	2284.0	4.5884	0.002085	2053.9	2179.0	4.4121
500	0.005622	2678.4	2903.3	5.4700	0.003892	2525.5	2720.1	5.1726	0.002956	2390.6	2567.9	4.9321
550	0.006984	2869.7	3149.1	5.7785	0.005118	2763.6	3019.5	5.5485	0.003956	2658.8	2896.2	5.3441
600	0.008094	3022.6	3346.4	6.0144	0.006112	2942.0	3247.6	5.8178	0.004834	2861.1	3151.2	5.6452
650	0.009063	3158.0	3520.6	6.2054	0.006966	3093.5	3441.8	6.0342	0.005595	3028.8	3364.5	5.8829
700	0.009941	3283.6	3681.2	6.3750	0.007727	3230.5	3616.8	6.2189	0.006272	3177.2	3553.5	6.0824
800	0.011523	3517.8	3978.7	6.6662	0.009076	3479.8	3933.6	6.5290	0.007459	3441.5	3889.1	6.4109
900	0.012962	3739.4	4257.9	6.9150	0.010283	3710.3	4224.4	6.7882	0.008508	3681.0	4191.5	6.6805
1000	0.014324	3954.6	4527.6	7.1356	0.011411	3930.5	4501.1	7.0146	0.009480	3906.4	4475.2	6.9127
1100	0.015642	4167.4	4793.1	7.3364	0.012496	4145.7	4770.5	7.2184	0.010409	4124.1	4748.6	7.1195
1200	0.016940	4380.1	5057.7	7.5224	0.013561	4359.1	5037.2	7.4058	0.011317	4338.2	5017.2	7.3083
1300	0.018229	4594.3	5323.5	7.6969	0.014616	4572.8	5303.6	7.5808	0.012215	4551.4	5284.3	7.4837

# A8 – Refrigerante saturo [in temperatura]

ES.2 ES.5

TABELLA A.  
Refrigerante - 134a saturo: tabella in temperatur

Temp. <i>T</i> °C	Press. <i>p<sub>sat</sub></i> MPa	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)	
		Liquido sat. <i>v<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>v<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>u<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>u<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>h<sub>l</sub></i>	Evap. <i>h<sub>lv</sub></i>	Vapore sat. <i>h<sub>v</sub></i>	Liquido sat. <i>s<sub>l</sub></i>	Vapore sat. <i>s<sub>v</sub></i>
-40	0.05164	0.0007055	0.3569	-0.04	204.45	0.00	222.88	222.88	0.0000	0.9560
-36	0.06332	0.0007113	0.2947	4.68	206.73	4.73	220.67	225.40	0.0201	0.9506
-32	0.07704	0.0007172	0.2451	9.47	209.01	9.52	218.37	227.90	0.0401	0.9456
-28	0.09305	0.0007233	0.2052	14.31	211.29	14.37	216.01	230.38	0.0600	0.9411
-26	0.10199	0.0007265	0.1882	16.75	212.43	16.82	214.80	231.62	0.0699	0.9390
-24	0.11160	0.0007296	0.1728	19.21	213.57	19.29	213.57	232.85	0.0798	0.9370
-22	0.12192	0.0007328	0.1590	21.68	214.70	21.77	212.32	234.08	0.0897	0.9351
-20	0.13299	0.0007361	0.1464	24.17	215.84	24.26	211.05	235.31	0.0996	0.9332
-18	0.14483	0.0007395	0.1350	26.67	216.97	26.77	209.76	236.53	0.1094	0.9315
-16	0.15748	0.0007428	0.1247	29.18	218.10	29.30	208.45	237.74	0.1192	0.9298
-12	0.18540	0.0007498	0.1068	34.25	220.36	34.39	205.77	240.15	0.1388	0.9267
-8	0.21704	0.0007569	0.0919	39.38	222.60	39.54	203.00	242.54	0.1583	0.9239
-4	0.25274	0.0007644	0.0794	44.56	224.84	44.75	200.15	244.90	0.1777	0.9213
0	0.29282	0.0007721	0.0689	49.79	227.06	50.02	197.21	247.23	0.1970	0.9190
4	0.33765	0.0007801	0.0600	55.08	229.27	55.35	194.19	249.53	0.2162	0.9169
8	0.38756	0.0007884	0.0525	60.43	231.46	60.73	191.07	251.80	0.2354	0.9150
12	0.44294	0.0007971	0.0460	65.83	233.63	66.18	187.85	254.03	0.2545	0.9132
16	0.50416	0.0008062	0.0405	71.29	235.78	71.69	184.52	256.22	0.2735	0.9116
20	0.57160	0.0008157	0.0358	76.80	237.91	77.26	181.09	258.36	0.2924	0.9102
24	0.64566	0.0008257	0.0317	82.37	240.01	82.90	177.55	260.45	0.3113	0.9089
26	0.68530	0.0008309	0.0298	85.18	241.05	85.75	175.73	261.48	0.3208	0.9082
28	0.72675	0.0008362	0.0281	88.00	242.08	88.61	173.89	262.50	0.3302	0.9076
30	0.77006	0.0008417	0.0265	90.84	243.10	91.49	172.00	263.50	0.3396	0.9070
32	0.81528	0.0008473	0.0250	93.70	244.12	94.39	170.09	264.48	0.3490	0.9064
34	0.86247	0.0008530	0.0236	96.58	245.12	97.31	168.14	265.45	0.3584	0.9058
36	0.91168	0.0008590	0.0223	99.47	246.11	100.25	166.15	266.40	0.3678	0.9053
38	0.96298	0.0008651	0.0210	102.38	247.09	103.21	164.12	267.33	0.3772	0.9047
40	1.0164	0.0008714	0.0199	105.30	248.06	106.19	162.05	268.24	0.3866	0.9041
42	1.0720	0.0008780	0.0188	108.25	249.02	109.19	159.94	269.14	0.3960	0.9035
44	1.1299	0.0008847	0.0177	111.22	249.96	112.22	157.79	270.01	0.4054	0.9030
48	1.2526	0.0008989	0.0159	117.22	251.79	118.35	153.33	271.68	0.4243	0.9017
52	1.3851	0.0009142	0.0142	123.31	253.55	124.58	148.66	273.24	0.4432	0.9004
56	1.5278	0.0009308	0.0127	129.51	255.23	130.93	143.75	274.68	0.4622	0.8990
60	1.6813	0.0009488	0.0114	135.82	256.81	137.42	138.57	275.99	0.4814	0.8973
70	2.1162	0.0010027	0.0086	152.22	260.15	154.34	124.08	278.43	0.5302	0.8918
80	2.6324	0.0010766	0.0064	169.88	262.14	172.71	106.41	279.12	0.5814	0.8827
90	3.2435	0.0011949	0.0046	189.82	261.34	193.69	82.63	276.32	0.6380	0.8655
100	3.9742	0.0015443	0.0027	218.60	248.49	224.74	34.40	259.13	0.7196	0.8117

Fonte per le tabelle da A.8 fino ad A.10: M.J. Moran e H.N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 2<sup>a</sup> ed., Wiley, New York 1992 pp. 710-15. Basate originariamente su equazioni da D.P. Wilson e R.S. Basu, *Thermodynamics properties of a New Stratospherically Safe Working Fluid-Refrigerant 134a*, in «ASHRAE Trans.», 1988, vol. 94, pt. 2, pp. 2095-2118. Usate con licenza.

# A9 – Refrigerante saturo [in pressione]

## ES.5-6

TABELLA A.9

Refrigerante - 134a saturo: tabella in pressione

Press. MPa	Temp. °C	Volume specifico m³/kg		Energia interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)	
		Liquido sat. $v_l$	Vapore sat. $v_u$	Liquido sat. $u_l$	Vapore sat. $u_u$	Liquido sat. $h_l$	Evap. $h_{lv}$	Vapore sat. $h_u$	Liquido sat. $s_l$	Vapore sat. $s_u$
0.06	-37.07	0.0007097	0.3100	3.41	206.12	3.46	221.27	224.72	0.0147	0.9520
0.08	-31.21	0.0007184	0.2366	10.41	209.46	10.47	217.92	228.39	0.0440	0.9447
0.10	-26.43	0.0007258	0.1917	16.22	212.18	16.29	215.06	231.35	0.0678	0.9395
0.12	-22.36	0.0007323	0.1614	21.23	214.50	21.32	212.54	233.86	0.0879	0.9354
0.14	-18.80	0.0007381	0.1395	25.66	216.52	25.77	210.27	236.04	0.1055	0.9322
0.16	-15.62	0.0007435	0.1229	29.66	218.32	29.78	208.18	237.97	0.1211	0.9295
0.18	-12.73	0.0007485	0.1098	33.31	219.94	33.45	206.26	239.71	0.1352	0.9273
0.20	-10.09	0.0007532	0.0993	36.69	221.43	36.84	204.46	241.30	0.1481	0.9253
0.24	-5.37	0.0007618	0.0834	42.77	224.07	42.95	201.14	244.09	0.1710	0.9222
0.28	-1.23	0.0007697	0.0719	48.18	226.38	48.39	198.13	246.52	0.1911	0.9197
0.32	2.48	0.0007770	0.0632	53.06	228.43	53.31	195.35	248.66	0.2089	0.9177
0.36	5.84	0.0007839	0.0564	57.54	230.28	57.82	192.76	250.58	0.2251	0.9160
0.4	8.93	0.0007904	0.0509	61.69	231.97	62.00	190.32	252.32	0.2399	0.9145
0.5	15.74	0.0008056	0.0409	70.93	235.64	71.33	184.74	256.07	0.2723	0.9117
0.6	21.58	0.0008196	0.0341	78.99	238.74	79.48	179.71	259.19	0.2999	0.9097
0.7	26.72	0.0008328	0.0292	86.19	241.42	86.78	175.07	261.85	0.3242	0.9080
0.8	31.33	0.0008454	0.0255	92.75	243.78	93.42	170.73	264.15	0.3459	0.9066
0.9	35.53	0.0008576	0.0226	98.79	245.88	99.56	166.62	266.18	0.3656	0.9054
1.0	39.39	0.0008695	0.0202	104.42	247.77	105.29	162.68	267.97	0.3838	0.9043
1.2	46.32	0.0008928	0.0166	114.69	251.03	115.76	155.23	270.99	0.4164	0.9023
1.4	52.43	0.0009159	0.0140	123.98	253.74	125.26	148.14	273.40	0.4453	0.9003
1.6	57.92	0.0009392	0.0121	132.52	256.00	134.02	141.31	275.33	0.4714	0.8982
1.8	62.91	0.0009631	0.0105	140.49	257.88	142.22	134.60	276.83	0.4954	0.8959
2.0	67.49	0.0009878	0.0093	148.02	259.41	149.99	127.95	277.94	0.5178	0.8934
2.5	77.59	0.0010562	0.0069	165.48	261.84	168.12	111.06	279.17	0.5687	0.8854
3.0	86.22	0.0011416	0.0053	181.88	262.16	185.30	92.71	278.01	0.6156	0.8735

# A10 – Refrigerante surriscaldato (1)

**TABELLA A.10**

# A10 – Refrigerante surriscaldato (2)

Es.5

TABELLA A.10

Refrigerante - 134a surriscaldato (*continua*)

<i>T</i> °C	<i>u</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/(kg · K)	<i>u</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/(kg · K)	<i>u</i> m <sup>3</sup> /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/(kg · K)
<i>p</i> = 0.50 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 15.74°C)					<i>p</i> = 0.60 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 21.58°C)				<i>p</i> = 0.70 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 26.72°C)			
Sat.	0.04086	235.64	256.07	0.9117	0.03408	238.74	259.19	0.9097	0.02918	241.42	261.85	0.9080
20	0.04188	239.40	260.34	0.9264								
30	0.04416	248.20	270.28	0.9597	0.03581	246.41	267.89	0.9388	0.02979	244.51	265.37	0.9197
40	0.04633	256.99	280.16	0.9918	0.03774	255.45	278.09	0.9719	0.03157	253.83	275.93	0.9539
50	0.04842	265.83	290.04	1.0229	0.03958	264.48	288.23	1.0037	0.03324	263.08	286.35	0.9867
60	0.05043	274.73	299.95	1.0531	0.04134	273.54	298.35	1.0346	0.03482	272.31	296.69	1.0182
70	0.05240	283.72	309.92	1.0825	0.04304	282.66	308.48	1.0645	0.03634	281.57	307.01	1.0487
80	0.05432	292.80	319.96	1.1114	0.04469	291.86	318.67	1.0938	0.03781	290.88	317.35	1.0784
90	0.05620	302.00	330.10	1.1397	0.04631	301.14	328.93	1.1225	0.03924	300.27	327.74	1.1074
100	0.05805	311.31	340.33	1.1675	0.04790	310.53	339.27	1.1505	0.04064	309.74	338.19	1.1358
110	0.05988	320.74	350.68	1.1949	0.04946	320.03	349.70	1.1781	0.04201	319.31	348.71	1.1637
120	0.06168	330.30	361.14	1.2218	0.05099	329.64	360.24	1.2053	0.04335	328.98	359.33	1.1910
130	0.06347	339.98	371.72	1.2484	0.05251	339.38	370.88	1.2320	0.04468	338.76	370.04	1.2179
140	0.06524	349.79	382.42	1.2746	0.05402	349.23	381.64	1.2584	0.04599	348.66	380.86	1.2444
150					0.05550	359.21	392.52	1.2844	0.04729	358.68	391.79	1.2706
160					0.05698	369.32	403.51	1.3100	0.04857	368.82	402.82	1.2963
<i>p</i> = 0.80 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 31.33°C)					<i>p</i> = 0.90 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 35.53°C)				<i>p</i> = 1.00 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 39.39°C)			
Sat.	0.02547	243.78	264.15	0.9066	0.02255	245.85	266.18	0.9054	0.02020	247.77	267.97	0.9043
40	0.02691	252.13	273.66	0.9374	0.02325	250.32	271.25	0.9217	0.02029	248.39	268.68	0.9066
50	0.02846	261.62	284.39	0.9711	0.02472	260.08	282.34	0.9566	0.02171	258.48	280.19	0.9428
60	0.02992	271.04	294.98	1.0034	0.02609	269.72	293.21	0.9897	0.02301	268.35	291.36	0.9768
70	0.03131	280.45	305.50	1.0345	0.02738	279.30	303.94	1.0214	0.02423	278.11	302.34	1.0093
80	0.03264	289.89	316.00	1.0647	0.02861	288.87	314.62	1.0521	0.02538	287.82	313.20	1.0405
90	0.03393	299.37	326.52	1.0940	0.02980	298.46	325.28	1.0819	0.02649	297.53	324.01	1.0707
100	0.03519	308.93	337.08	1.1227	0.03095	308.11	335.96	1.1109	0.02755	307.27	334.82	1.1000
110	0.03642	318.57	347.71	1.1508	0.03207	317.82	346.68	1.1392	0.02858	317.06	345.65	1.1286
120	0.03762	328.31	358.40	1.1784	0.03316	327.62	357.47	1.1670	0.02959	326.93	356.52	1.1567
130	0.03881	338.14	369.19	1.2055	0.03423	337.52	368.33	1.1943	0.03058	336.88	367.46	1.1841
140	0.03997	348.09	380.07	1.2321	0.03529	347.51	379.27	1.2211	0.03154	346.92	378.46	1.2111
150	0.04113	358.15	391.05	1.2584	0.03633	357.61	390.31	1.2475	0.03250	357.06	389.56	1.2376
160	0.04227	368.32	402.14	1.2843	0.03736	367.82	401.44	1.2735	0.03344	367.31	400.74	1.2638
170	0.04340	378.61	413.33	1.3098	0.03838	378.14	412.68	1.2992	0.03436	377.66	412.02	1.2895
180	0.04452	389.02	424.63	1.3351	0.03939	388.57	424.02	1.3245	0.03528	388.12	423.40	1.3149
<i>p</i> = 1.20 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 46.32°C)					<i>p</i> = 1.40 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 52.43°C)				<i>p</i> = 1.60 MPa ( <i>T<sub>m</sub></i> = 57.92°C)			
Sat.	0.01663	251.03	270.99	0.9023	0.01405	253.74	273.40	0.9003	0.01208	256.00	275.33	0.8982
50	0.01712	254.98	275.52	0.9164								
60	0.01835	265.42	287.44	0.9527	0.01495	262.17	283.10	0.9297	0.01233	258.48	278.20	0.9069
70	0.01947	275.59	298.96	0.9868	0.01603	272.87	295.31	0.9658	0.01340	269.89	291.33	0.9457
80	0.02051	285.62	310.24	1.0192	0.01701	283.29	307.10	0.9997	0.01435	280.78	303.74	0.9813
90	0.02150	295.59	321.39	1.0503	0.01792	293.55	318.63	1.0319	0.01521	291.39	315.72	1.0148
100	0.02244	305.54	332.47	1.0804	0.01878	303.73	330.02	1.0628	0.01601	301.84	327.46	1.0467
110	0.02335	315.50	343.52	1.1096	0.01960	313.88	341.32	1.0927	0.01677	312.20	339.04	1.0773
120	0.02423	325.51	354.58	1.1381	0.02039	324.05	352.59	1.1218	0.01750	322.53	350.53	1.1069
130	0.02508	335.58	365.68	1.1660	0.02115	334.25	363.86	1.1501	0.01820	332.87	361.99	1.1357
140	0.02592	345.73	376.83	1.1933	0.02189	344.50	375.15	1.1777	0.01887	343.24	373.44	1.1638
150	0.02674	355.95	388.04	1.2201	0.02262	354.82	386.49	1.2048	0.01953	353.66	384.91	1.1912
160	0.02754	366.27	399.33	1.2465	0.02333	365.22	397.89	1.2315	0.02017	364.15	396.43	1.2181
170	0.02834	376.69	410.70	1.2724	0.02403	375.71	409.36	1.2576	0.02080	374.71	407.99	1.2445
180	0.02912	387.21	422.16	1.2980	0.02472	386.29	420.90	1.2834	0.02142	385.35	419.62	1.2704
190					0.02541	396.96	432.53	1.3088	0.02203	396.08	431.33	1.2960
200					0.02608	407.73	444.24	1.3338	0.02263	406.90	443.11	1.3212

## Esercitazione 10

### Oggetto: Conduzione

1.Determinare la resistenza termica complessiva di un condotto cilindrico di lunghezza  $L = 10 \text{ m}$ , diametro interno  $D_i = 4 \text{ mm}$  e spessore  $s = 1 \text{ mm}$ , realizzato in un materiale avente conduttività termica  $k = 25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . **[0.000258 K/W]**

2.Sia dato un cilindro indefinito cavo con raggio interno  $R_1 = 10 \text{ cm}$  e raggio esterno  $R_2 = 15 \text{ cm}$  realizzato con materiale di conduttività termica  $k = 10 \text{ W/mK}$ . La superficie interna del cilindro ha una temperatura  $T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  mentre sulla superficie esterna è  $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si chiede di determinare l'espressione della distribuzione di temperatura ed il valore di questa per  $r = 12 \text{ cm}$ . **[75 }^\circ\text{C]**

3.Determinare il flusso termico areico che attraversa una parete piana indefinita composta da due strati: il primo ha spessore  $s_1 = 25 \text{ cm}$  e conduttività termica  $k_1 = 8 \text{ W/mK}$  mentre il secondo ha spessore  $s_2 = 12 \text{ cm}$  e conduttività termica  $k_2 = 10 \text{ W/mK}$ . Le due superfici esterne della parete sono rispettivamente a temperatura  $T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . **[2312.1 W/m<sup>2</sup>]**

4.Determinare la resistenza termica complessiva di una parete piana di superficie  $S = 4 \text{ m}^2$  e realizzata con due strati di spessore  $s_1 = s_2 = 20$  di materiali di conduttività termica  $k_1 = 20 \text{ W/mK}$  e  $k_2 = 4 \text{ W/mK}$  rispettivamente. Sulla superficie interna si ha un coefficiente convettivo  $h_i = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$  mentre sulla superficie esterna si ha un coefficiente convettivo  $h_e = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$ . **[0.026 K/W]**

5.Determinare il raggio critico di isolamento per un condotto in acciaio rivestito da uno strato di isolante ed immerso in un fluido con coefficiente convettivo  $h = 15 \text{ W/m}_2\text{K}$ . Sono note le proprietà dell'acciaio e dell'isolante: $K_{acc} = 15 \text{ W/mK}$ ,  $\rho_{acc} = 7800 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{acc} = 1 \text{ kJ/kgK}$ ,  $K_{is} = 0.3 \text{ W/mK}$ ,  $\rho_{is} = 1200 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{is} = 0.6 \text{ kJ/kgK}$ . **[20 mm]**

6.Una parete di spessore  $L = 10 \text{ cm}$  e superficie  $S = 5 \text{ m}^2$  è attraversata da un flusso termico areico  $J = 6000 \text{ W/m}^2$ . Sapendo che la superficie, a temperatura  $T_s = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , è lambita da un fluido con temperatura  $T_\infty = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  determinare il coefficiente convettivo. **[75 W/m<sup>2</sup>K]**

7.Determinare la resistenza termica di una parete piana multistrato di superficie  $S = 3 \text{ m}^2$  realizzata con materiali di spessori e conduttività termica noti.  
 $L_1 = 0.5 \text{ cm}$   $K_1 = 0.2 \text{ W/mK}$ ;  $L_2 = 10 \text{ cm}$   $K_2 = 3.7 \text{ kcal/mhK}$ ;  $L_3 = 10 \text{ mm}$   $K_3 = 2 \text{ W/mK}$ . **[0.01775 K/W]**

8.Il vetro di una finestra ha spessore  $s = 6 \text{ mm}$  e separa un locale a temperatura  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  dall'ambiente esterno alla temperatura  $T_e = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . La conduttività termica del vetro è  $k = 1.2 \text{ W/mK}$ , mentre i coefficienti di scambio termico convettivo all'interno e all'esterno sono, rispettivamente,  $h_i = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $h_e = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Calcolare:

- il flusso termico trasmesso attraverso la lastra di vetro
- la temperatura della faccia interna del vetro

**[55.21 W/m<sup>2</sup>, 16.3 }^\circ\text{C]**

9. Una parete piana indefinita di un forno industriale ha una superficie complessiva  $S = 15 \text{ m}^2$  ed è costituita da tre strati. L'interno del forno si trova alla temperatura  $T_i = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ , mentre l'ambiente esterno si trova alla temperatura  $T_e = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . La parete affacciata all'interno del forno ha spessore  $L_1 = 60 \text{ cm}$  ed è realizzata con mattoni refrattari con conduttività termica  $k_1 = 3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; lo strato intermedio ha spessore  $L_2 = 30 \text{ cm}$  ed è realizzato con materiale isolante avente conduttività termica  $k_2 = 0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; la parete esterna ha spessore  $L_3 = 2 \text{ cm}$  ed è realizzata in acciaio con conduttività termica  $k_3 = 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Nell'ipotesi che la parete sia in condizioni stazionarie e che i coefficienti scambio termico convettivo valgano  $h_i = h_e = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ :

- determinare la resistenza termica complessiva della parete;
- determinare la potenza termica trasmessa verso l'esterno;
- rappresentare graficamente la distribuzione di temperatura nella parete;
- determinare la massima temperatura nello strato isolante.

$$[0.227 \text{ K/W}, 3876.7 \text{ W}, 822.5 \text{ }^\circ\text{C}]$$

$$1 \quad L=10m \quad D_i=4mm \quad \lambda=1mm \quad K=25 \frac{W}{m \cdot K} \quad R?$$

$$R = \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi L K}$$

$$r_1 = D_i/2 = 0,002 \text{ mm} \quad r_2 = r_1 + \lambda = 0,003 \text{ mm} \Rightarrow R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$2 \quad R_1=10cm \quad R_2=15cm \quad K=10 \frac{W}{m \cdot K} \quad T_1=120^\circ C \quad T_2=20^\circ C$$

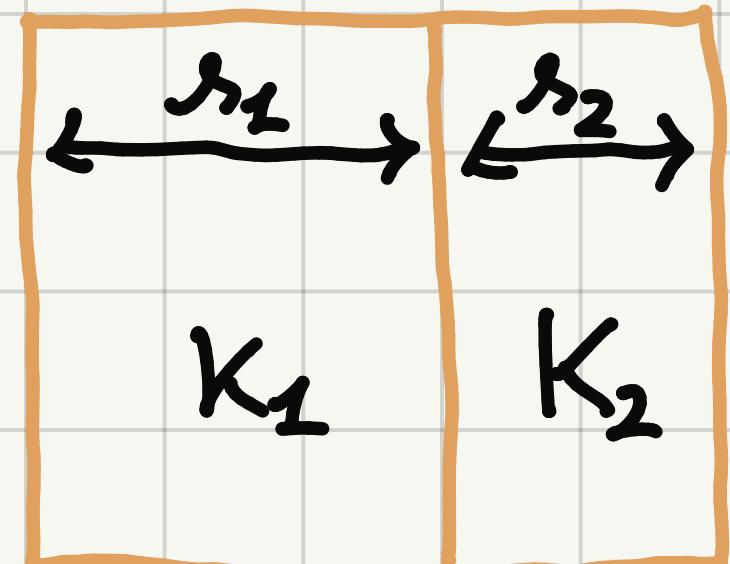
$T_r$ ? CALCOLO PER  $r=12 \text{ cm}$

$$\text{EQUAZIONE DI FOURIER} \quad \dot{Q} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dr} = -2\pi L K \cdot \frac{T_2 - T_1}{\ln(R_2/R_1)}$$

$$Q \text{ COSTANTE} \Rightarrow \dot{Q} = -2\pi L K \cdot \frac{T_r - T_1}{\ln(R_r/R_1)}$$

$$\Rightarrow T_r = T_1 + (T_2 - T_1) \cdot \frac{\ln(R_r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} = 75,0^\circ C$$

$$3 \quad \lambda_1=25 \text{ nm} \quad K_1=8 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_2=12 \text{ nm} \quad K_2=10 \frac{W}{m \cdot K} \quad T_1=120^\circ C \quad T_2=20^\circ C \quad \Phi?$$



$$\overline{\Phi} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad \dot{Q} = -K \cdot A \cdot \frac{dT}{dr}$$

$$\int_0^L \dot{Q} dr = \int_{T_1}^{T_2} -KA dT \rightarrow L \dot{Q} = -KA(T_2 - T_1)$$

$$\text{POSTO} \quad R = \frac{L}{KA} \rightarrow \dot{Q} = \frac{1}{R} (T_1 - T_2)$$

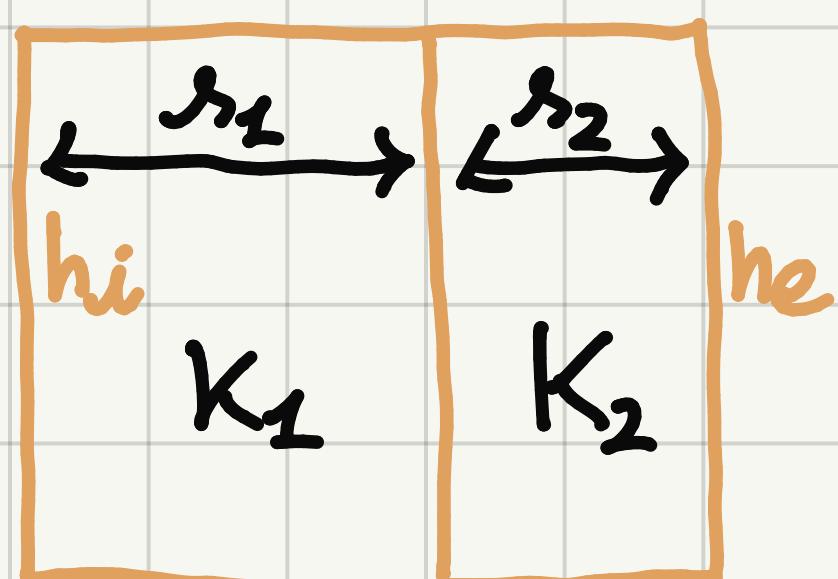
$$\text{PARETE MISTRAIO} \Rightarrow R_{\text{TOT}} = R_1 + R_2 = \frac{\lambda_1}{K_1 A} + \frac{\lambda_2}{K_2 A} =$$

$$= \frac{\lambda_1 K_2 + \lambda_2 K_1}{K_1 K_2 A} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{K_1 K_2 A}{\lambda_1 K_2 + \lambda_2 K_1} (T_1 - T_2)$$

$$\overline{\Phi} = \frac{K_1 K_2 A}{\lambda_1 K_2 + \lambda_2 K_1} (T_1 - T_2) \cdot \frac{1}{A} = 2312,14 \frac{W}{m^2}$$

$$4 \quad S=4 \text{ m}^2 \quad L_1=L_2=20 \text{ cm} \quad K_1=20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad K_2=4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad h_i=200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$h_e=30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad R_{\text{TOT}}?$$

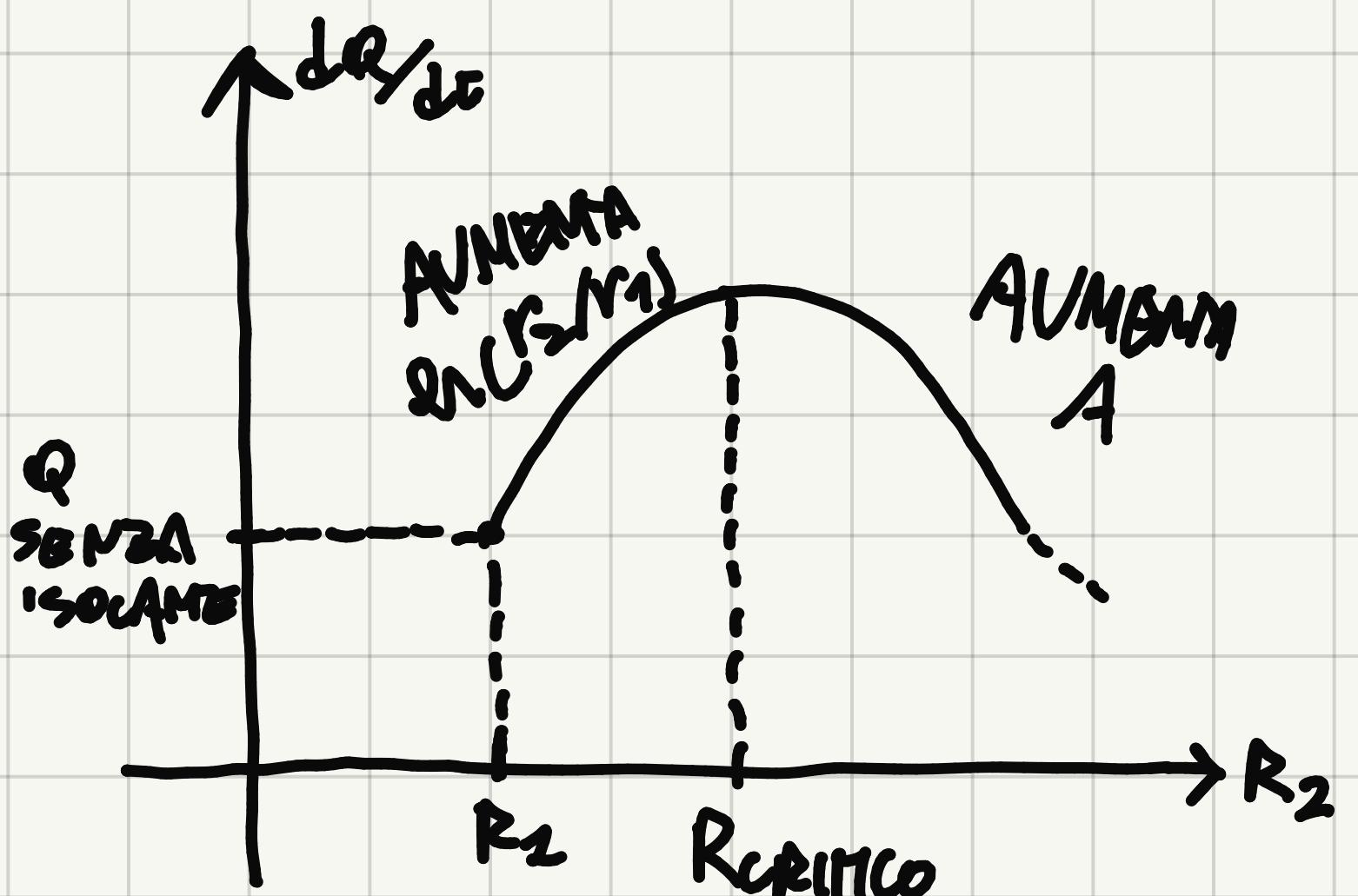


$$Q=hA \cdot (T_i - T_e) \quad R=\frac{1}{hA}$$

$$R_{\text{TOT}} = \frac{1}{h_i S} + \frac{1}{h_e S} + \frac{L_1}{K_1 S} + \frac{L_2}{K_2 S} = 0,0258 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$5 \quad h=15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad K_{\text{air}}=15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad \rho_{\text{air}}=1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad C_{\text{air}}=1 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \text{OK}}$$

$$K_{\text{air}}=0,3 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{OK}} \quad \rho_{\text{air}}=1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad C_{\text{air}}=0,6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \text{OK}} \quad r_{\text{CRIMCO}}?$$



$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_\infty}{R_{\text{int}} R_{\text{conv}}}$$

$$R_{\text{IS}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L K_{\text{air}}}$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h \cdot 2\pi r_2 L}$$

$$\text{CRIMCO PER } \frac{d\dot{Q}}{dR_2} = 0 \Rightarrow r_{\text{CRIMCO}} = \frac{K_{\text{air}}}{h} = 2 \text{ cm}$$

$$6 \quad L=10 \text{ cm} \quad S=5 \text{ m}^2 \quad \overline{\Phi}=6000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad T_s=110^\circ \text{C} \quad T_\infty=30^\circ \text{C} \quad h?$$

$$\begin{cases} \dot{Q}=h S (T_s - T_\infty) \\ \overline{\Phi} = \frac{\dot{Q}}{S} \end{cases} \Rightarrow h = 75 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$7 \quad S=3 \text{ m}^2 \quad L_1=0,5 \text{ cm} \quad K_1=0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad L_2=10 \text{ cm} \quad K_2=3,7 \frac{\text{Kcal}}{\text{mh} \text{OK}}$$

$$L_3=10 \text{ mm} \quad K_3=2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \quad R_{\text{TOT}}?$$

$$R_{\text{TOT}} = \frac{1}{S} \left( \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \right) = 0,017752 \frac{\text{OK}}{\text{W}}$$

8  $\lambda = 6 \text{ mm} \quad T_i = 20^\circ\text{C} \quad T_e = 5^\circ\text{C} \quad k = 1,2 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{OK}} \quad h_v = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{OK}}$

$h_e = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{OK}}$   $\Phi?$   $T_o?$

$$\Phi = \frac{\dot{Q}}{A} \quad \dot{Q} = \frac{1}{R_{\text{TOT}}} (T_i - T_e) \quad R_{\text{TOT}} = \frac{1}{A} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{k} + \frac{1}{h_e} \right)$$

$$\Rightarrow \Phi = (T_i - T_e) \cdot \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{k} + \frac{1}{h_e} \right)^{-1} = 55,23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{OK}}$$

$\dot{Q}$  COSTANTE

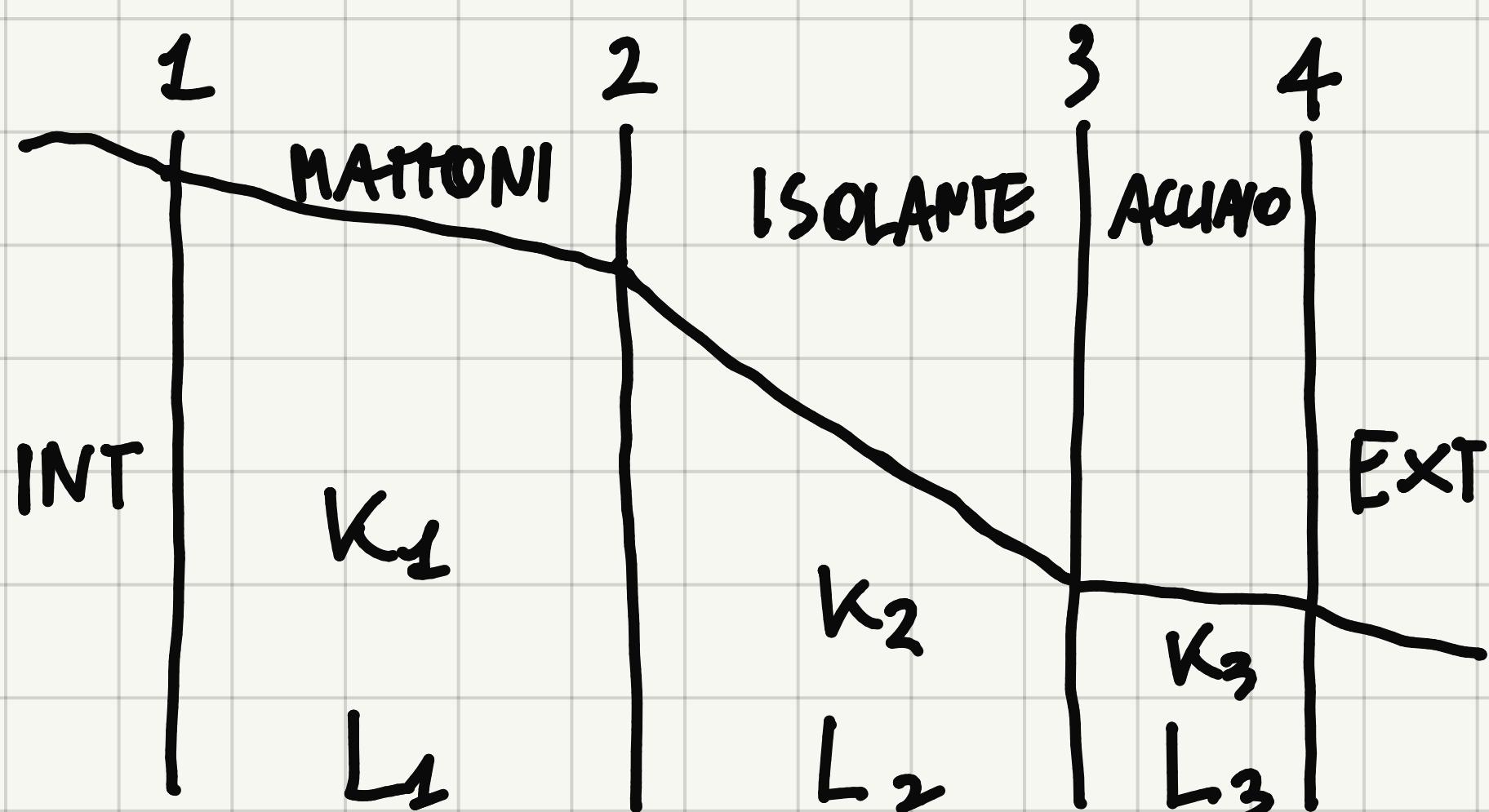
$$\Phi = \frac{1}{R \cdot A} (T_i - T_o) \quad R = \frac{1}{A h_i}$$

$$\Rightarrow T_o = T_i - \frac{\Phi}{h_i} = 16,32^\circ\text{C}$$

9  $S = 15 \text{ m}^2 \quad T_i = 900^\circ\text{C} \quad T_e = 20^\circ\text{C} \quad L_1 = 60 \text{ cm} \quad k_1 = 3 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{OK}}$

$$L_2 = 30 \text{ cm} \quad k_2 = 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{OK}} \quad L_3 = 2 \text{ cm} \quad k_3 = 20 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{OK}} \quad h_i = h_e = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{OK}}$$

$R_{\text{TOT}}$ ?  $\dot{Q}_e$ ? GRAFICO  $T$ ?  $T_{\text{MAX},s}$ ?



$$R_{\text{TOT}} = \frac{1}{S} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{1}{h_e} \right) = 0,1267 \frac{\text{OK}}{\text{W}} \quad \dot{Q}_e = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{TOT}}} = 3881,8 \text{ W}$$

$T_{\text{MAX},s}$  IN PROSSIMITÀ DI 2

$$R_{1s} = \frac{1}{S} \left( \frac{1}{h_i} + \frac{L_1}{K_1} \right) = 0,02 \frac{\text{OK}}{\text{W}}$$

$$\dot{Q} \text{ COSTANTE} \Rightarrow \dot{Q} = \frac{T_i - T_2}{R_{1s}} \Rightarrow T_2 = T_i - \dot{Q} R_{1s} = 822,36^\circ\text{C}$$