

E' consentito l'uso di: -calcolatrice, -tavole termodinamiche, un -formulario (1 pagina A4 F/R)  
Disponibili: tabelle acqua e vapore, proprietà sostanze, abaco Moody

Consegnare: ☐ grafici, ☐ svolgimento (no brutte copie), ☐ formulario.  
Segnare il Cognome+Nome su OGNI foglio consegnato.  
Trattenete il testo

Specificare:

Tutte le **ipotesi, convenzioni, semplificazioni** adottate.

Tracciare sempre i **grafici** o **schemi** utili alla comprensione

I risultati privi di sufficiente calcolo/svolgimento/spiegazione non sono ritenuti validi.

-----Inizio esame completo, tempo disponibile: 3h, esercizi 1-8-----

1) Un tubo in acciaio ha diametro interno 3 cm e spessore 5 mm. Trasporta acqua calda a 70°C, con coefficiente di convezione interno molto (molto) elevato. E' isolato con 2 cm di schiuma poliuretanica ( $\rho=100 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p=1800 \text{ J/kg.K}$ ,  $\lambda=0.3 \text{ W/m.K}$ ), e all'esterno è investito dal vento freddo con coefficiente convettivo  $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Determinare la T a cui il materiale isolante deve poter resistere. Definire il profilo delle temperature.

2) Una torta di verdure (caratteristiche fisiche approssimabili a quelle dell'acqua) da 900 g di peso, avente diametro 26 cm, viene messa a cuocere in un forno tradizionale ventilato. Ipotizzando la temperatura dei gas 180°C, e il coefficiente di convezione pari a  $18 \text{ W/m}^2\text{K}$ , determinare la temperatura al centro e alla superficie dopo 20 minuti. Chiarire e discutere le ipotesi utilizzate

3) Un nastro in acciaio di sezione rettangolare (spessore 4 mm, larghezza 50 cm, lunghezza vari metri), inizialmente a  $T=240^\circ\text{C}$  è investito da un flusso d'aria a 8 m/s. Determinare dopo quanto tempo può essere maneggiato.

Correlazioni suggerite per il numero di Nusselt su lastre piane: (motivare la scelta)

$$\text{lastra piana, } Re < 500'000 \quad Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$\text{lastra piana, } Re > 500'000 \quad Nu = (0.037 Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad (0.6 < Pr < 60, 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7)$$

$$\text{lastra piana, } Re \gg 500'000 \quad Nu = 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (0.6 < Pr < 60, 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7)$$

4) Un caminetto incassato nel muro ha forma di cavità con apertura alta cm 70, larga cm 110, profonda 65 cm, ha le pareti interne a  $T_{\text{Cam}} = 190^\circ\text{C}$ , e si affaccia in una stanza avente pianta di 5x6 metri e alta 2.8 metri. Ipotizzando i coefficienti di emissività tutti pari a 0.90, calcolare il fattore di vista e il calore scambiato per irraggiamento tra caminetto e stanza. Specificare le ipotesi adottate

-----Inizio 2ª parte tempo disponibile: 2h30, esercizi 5-10 ( la 1ª parte prosegue ) -----  
-

5) Sono date le  $T_{\text{min}} = 45^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{max}} = 500^\circ\text{C}$  e la pressione massima 140 bar di un ciclo Rankine a vapore d'acqua, con pompa e turbina isoentropiche. Disegnare il ciclo nel diagramma T-s allegato. Calcolare i valori delle grandezze nei punti necessari ed i rendimenti del ciclo secondo i due principi della termodinamica.

6) Dell'aria compressa che si trova in un recipiente alla pressione di 6 bar assoluti, alla temperatura pari a quella dell'ambiente, fluisce poi in condizioni isoterme in un condotto avente diametro 16 mm, al termine del quale ha perso 2 bar di pressione, e la velocità è 110 m/s. Determinare (se vi è stato) lo scambio di calore con l'ambiente, e la variazione di entropia totale.

7) All'interno di un'automobile  $0.1 \text{ kg/s}$  di aria entra nell'unità raffreddante del condizionatore alla temperatura di  $30^\circ\text{C}$  con umidità relativa 70% e ne esce a  $15^\circ\text{C}$  e satura di umidità. Riportare la trasformazione seguita dall'aria sul diagramma psicrometrico allegato. Calcolare la potenza termica asportata e il liquido che eventualmente condensa

8) Determinare la pressione necessaria per pompare una portata di acqua di 6 litri/minuto dalla cantina all'ottavo piano in tubi aventi diametro 1 cm. Valutare se la presenza di alcuni gomiti a  $90^\circ$  possa cambiare di molto il risultato..

**-----fine esame completo, la seconda parte prosegue -----**

9) Un frigorifero, posto in una stanza a  $25^\circ\text{C}$ , mantiene il contenuto a  $4^\circ\text{C}$ . L'evaporatore necessita di una differenza di temperatura di  $15^\circ\text{C}$  per scambiare calore, il condensatore di  $28^\circ\text{C}$ . L'efficienza è il 60% di quella di una macchina ideale che lavora tra le stesse temperature estreme del ciclo. Sapendo che a regime il motore del frigorifero consuma in media 200 W, determinare i flussi termici. Utilizzare gli schemi necessari a spiegare il funzionamento

10) Uno scambiatore di calore per teleriscaldamento viene usato per non mescolare il fluido dell'impianto comune con quello dei singoli utenti. Un tale scambiatore in controcorrente deve trasmettere 3 kW dal flusso di acqua proveniente dalla centrale al circuito dell'appartamento. L'acqua dell'utente lascia lo scambiatore a  $57^\circ$  e vi ritorna dall'appartamento a  $49^\circ$ . L'acqua dalla centrale arriva a  $64^\circ\text{C}$ , l'efficienza dello scambiatore è del 70%. Disegnare lo schema dei profili di temperatura con i valori mancanti, determinare i flussi di acqua richiesti. Sapendo che il coefficiente di scambio globale vale  $150\text{W/m}^2\text{K}$ , dimensionare la superficie di scambio

Es 1 tubo isolato						
		h	lambda	Ri	deltaT	T
						70
r1	0.015	R conv int	100000	0.000106	0.02	69.98
r2	0.020	cond r1/r2	15	0.003054	0.49	69.50
r3	0.040	cond r2/r3	0.3	0.367913	58.64	10.86
		R conv esi	40.0	0.099522	15.86	-5.00
		R tot		0.470595		-5
				159.3727		

Es 2 torta a cuocere						
massa kg	0.9					
D, cm	26	facce	1			
volume, cr	900	Lc Biot	0.017			
rho	1000	Bi	0.470			
		lambda1	0.635067			
A cm2	530.66	A1	1.066429			
m2	0.053066	alfa	1.63E-07			
sp cm	1.696001	tempo	1200			
m	0.017					
lambda	0.65	Fo = tau	0.68			
Cp	4000	teta_x=0	0.81			
T_amb	180	T x=0	58.30			
h	18	teta_sup	0.65			
T_iniz	30	T sup	82.03			

0.4	0.470	0.5	Bi	0.01
0.5932	0.635067	0.6533	Lambda1	0.0998
1.058	1.066429	1.0701	A1	1.0017
15			indice	1

Es 3 striscia							
Tfilm [K]	400	w m/s	8	lambda_a	60	Biot	0.001041
ro_aria	0.883577	L_Re m	0.500	ro-acc	7900	Tau	910.28
Cp	1.014	Spessore	0.004	Cp_acc	450	T_infinito	25
lambda	0.0338	Re	153599	L	5	T_iniz	240
mu	2.30E-05	Nu	231.1	facce	1	T_ok	30
Pr	0.7	h	15.62	L_biot	0.0040	t_ok	3424

400	400
0.0338	0.0338
2.30E-05	2.30E-05
7	

57.1	1
	0.883577

Es 4 irragg					
hcam	0.7	T K		A m2	eps
Lcam	1.1	Fittizia		0.77	
Prof_cam	0.65	Cam	463	3.11	0.9
Tcam °C	190	Sta	293	120.83	0.9
L1_stanza	5				
L2_stanza	6				
H_stanza	2.8	F_cs	0.248	F_sc	0.006373
Area stanz	121.6	Q'	1638		
Tstanza_°	20				

Es 5		Rankine								
			T °C	P kPa	x	h	s	ideale		reale
Tmin °C	45	1=LiqSat	45	9.593	0	188.5	0.6387	Qin	3118.68	3118.68
Pmax bar	140	2	45	14000	nd (<0)	202.5	"	L_nu_Tid	1289.41	1291.51
Tmax °C	500	2re				202.5		eta1	41.3%	41.4%
etaPpomp	1	5	500	14000	nd (>1)	3321.15	6.38765	etaC	58.9%	58.9%
etaTurb	1	6	45	9.593	0.764	2017.7	6.38765	eta2	70.2%	70.4%
		6re			0.764	2017.7				
		VapSat	45	9.593	1	2583.2	8.1648			

Es 6 Q L deltaU W									
P1 bar ass	6	Tamb	300	w1	73.3	0			
D mm	16	P2 ass	4.00	q_in J/kg	3361.1	6050.0			
w2 m/s	110	ro1	6.98	<b>Q' in W</b>	346	622			
R	286.6897	ro2	4.65	delta_s ga	116.24				
Cp	1003.414	A m2	0.00020	deltaS'gas	11.95				
		<b>m'</b>	<b>0.103</b>	deltaS am	-1.15	-2.07			
				<b>deltaStot</b>	<b>10.80</b>				

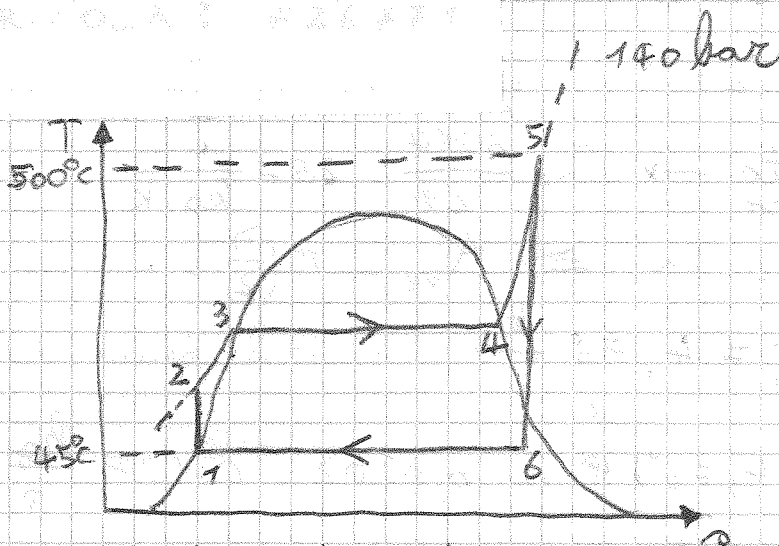
Es 7 aria umida condensa							
punto	m kg	T °C	UR	Psat	Pvap	x	h
1		30	70%	4231.9	2962.32	0.0187	78.03
2		15	100%	1703.1	1703.07	0.0106	41.96
Q'	3.6		m'aria	0.1	delta	0.0081	36.1
			m'cond	0.00081			

es 8 Moody									
V' l/s	0.1	w	1.273885	<b>deltaP</b>	Pa=J/m3	Bar	metri	J/kg	
rho	1000	mi	0.001	L metri	24	altezza Z	235200	2.35	24
m'	0.1	ni	0.000001	ro w2/2	811	attrito	58420	0.58	6.0
D	0.01	Re	12738.85	N	1	N gomiti	811	0.01	0.08
A	7.85E-05	f attrito	0.03			totale	294432	2.94	30.0
									294

es 9 frigorifero						K	°C
T_stanza	25	Lin	200	Tinf	262	-11	
T_frigor	4	<b>COPid</b>	<b>4.09</b>	Tsup	326	53	
deltaT_ev	15	<b>COPre</b>	<b>2.46</b>	deltaT	64		
deltaT_cor	28	<b>Q'sup W</b>	<b>691</b>				
eff	60%	<b>Q'inf W</b>	<b>491</b>				

Es 10 scambiatore deltaTml									
Q' kW	3	deltaTmax	15	cp	4.184	deltaT1	7		
T_ca_in	64	deltaTcald	<b>10.5</b>	m'freddo	0.0896	deltaT2	4.5		
eff.	70%	deltaTfr	8	m'caldo	0.0683	<b>deltaTml</b>	<b>5.66</b>		
T_fr_out	57	<b>T_ca_out</b>	<b>53.5</b>			h tot	150		
T_fr_in	49					<b>A m2</b>	<b>3.535</b>		

5)  
6/6



	T	P
1	45°C	0,09593 bar
2	( )	140 bar
3	336,8°C	140 bar
4	336,8°C	140 bar
5	500°C	140 bar
6	45°C	0,09593 bar

$$\eta_I = \frac{l_{nw}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_5 - h_2} =$$

$$= 1 - \frac{1829,44}{3118,7} = 41,34\%$$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{318}{773} = 58,9\%$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_c} = \frac{41,34}{58,9} = 70,2\%$$

$$v_{LS}(45^\circ) = 0,6387 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$v_{VS}(45^\circ) = 8,1648 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$h_{VS}(45^\circ) = 2583,2 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_1 = h_{LS}(45^\circ) = 188,45 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_1 = P_6 = P_{atm}(45^\circ) = 0,09593 \text{ bar}$$

essendo la pompa isentropica:

$$\Delta h_{12} = v \cdot \Delta P_{12} = 10^{-3} \frac{m^3}{kg} \cdot (P_2 - P_1) =$$

$$= 10^{-3} \cdot 140 \cdot 10^5 = 14000 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h_{12} = 202,45 \frac{kJ}{kg}$$

tabella vap. acqua surrisc.

$$T_5 = 500^\circ C \quad P_5 = 140 \text{ bar}$$

$$h_5 = 3321,15 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_5 = 6,38765 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$v_5 = v_6 \text{ (trasf. isentr.)}$$

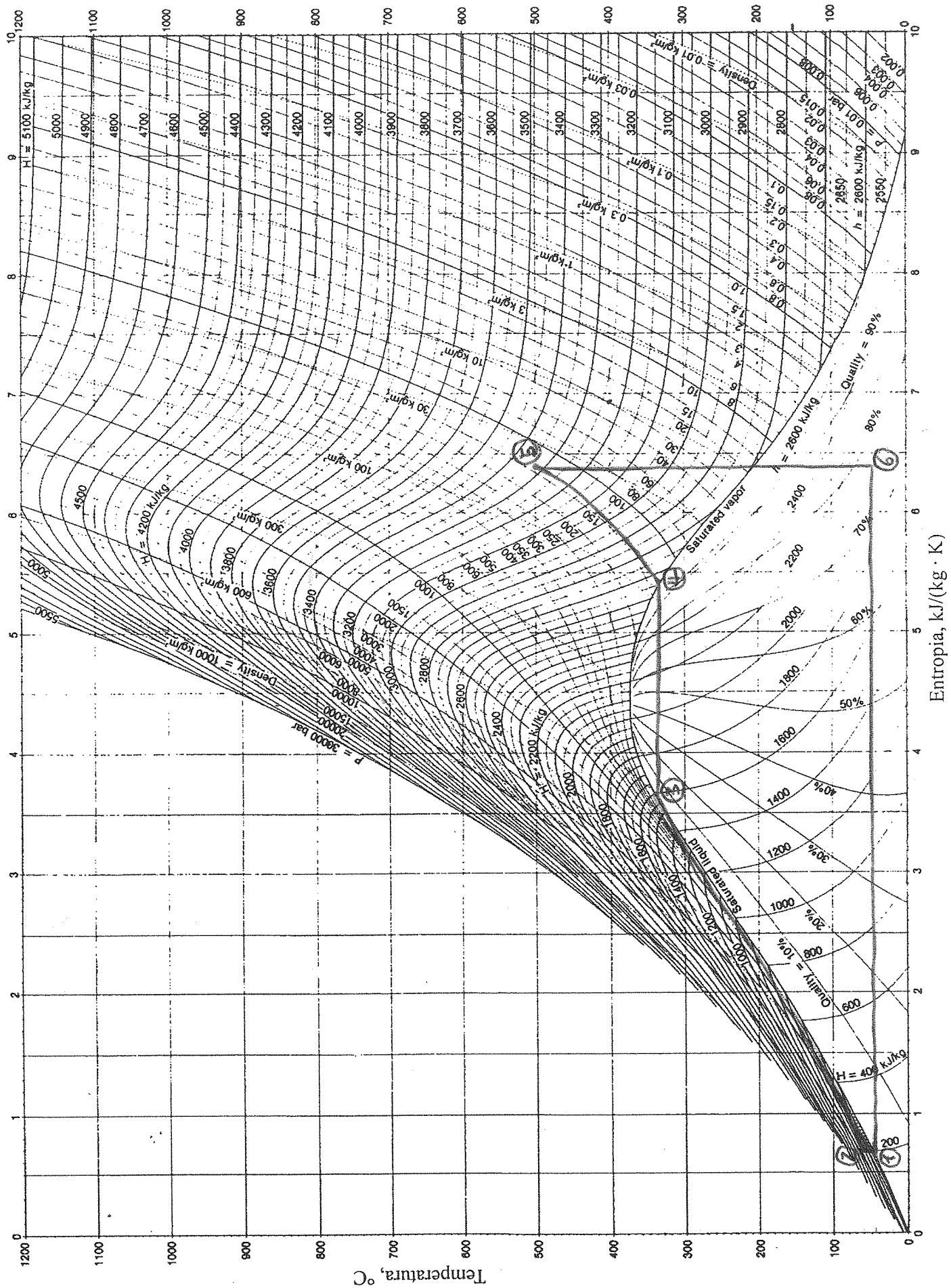
$$x_6 = \frac{v_6 - v_{LS}(45^\circ)}{v_{VS}(45^\circ) - v_{LS}(45^\circ)} = 0,764$$

$$h_6 = (1 - x_6) h_{LS}(45^\circ) + x_6 h_{VS}(45^\circ) =$$

$$= 0,236 \cdot 188,45 + 0,764 \cdot 2583,2 =$$

$$= 44,4742 + 1973,4 =$$

$$= 2017,89 \frac{kJ}{kg}$$



6)  $P_1 = 6 \text{ bar}$      $T_1 = 20^\circ\text{C}$      $w_1 = ?$

6/6  $P_2 = 4 \text{ bar}$      $T_2 = 20^\circ\text{C}$      $w_2 = 110 \text{ m/s}$

aria  $\rightarrow$  gas perfetto  $\rightarrow R = \frac{8314}{29} = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$D = 16 \text{ mm} = 0,016 \text{ m} \Rightarrow A_{sez.} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0,0002 \text{ m}^2$

$\rho_2 = \frac{P_2}{R \cdot T_2} = \frac{4 \cdot 10^5}{287 \cdot 293} = 4,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\dot{m}_2 = \rho_2 \cdot w_2 \cdot A_{sez.} = 4,76 \cdot 110 \cdot 0,0002 = 0,104 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

il sistema è in regime staz.  $\Rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$w_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 \cdot A_{sez.}} = 72 \text{ m/s}$

$\rho_1 = \frac{P_1}{R \cdot T_1} = \frac{6 \cdot 10^5}{287 \cdot 293} = 7,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\Rightarrow q_{in} = \Delta h + \frac{\Delta w^2}{2}$    
 il lavoro d'elica è nullo, così come la variazione di quota

$\Delta h = c_p \Delta T = 0$    
 perché la trasformazione è isoterma

$q_{in} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = \frac{(110)^2 - (72)^2}{2} = 3458 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

$\dot{Q}_{in} = \dot{m} \cdot q_{in} = 359,6 \text{ W}$

$\dot{\Delta S}_{gas} = \dot{m} \Delta s = \dot{m} \cdot R \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = 12,1 \frac{\text{W}}{\text{K}}$

$\dot{\Delta S}_{amb} = -\frac{\dot{Q}}{293 \text{ K}} = -1,2 \frac{\text{W}}{\text{K}}$

$\dot{\Delta S}_{TOT} = \dot{\Delta S}_{gas} + \dot{\Delta S}_{amb} = 10,9 \frac{\text{W}}{\text{K}}$

① :  $T_1 = 30^\circ\text{C}$      $\phi_1 = 70\%$

② :  $T_2 = 15^\circ\text{C}$      $\phi_2 = 100\%$

$P_{vap,1} = \phi_1 \cdot P_{sat}(T_1) = 0,7 \cdot 4246 \text{ Pa} = 2972,2 \text{ Pa}$

$P_{vap,2} = \phi_2 \cdot P_{sat}(T_2) = 1 \cdot 1705 \text{ Pa} = 1705 \text{ Pa}$

$\omega_1 = 0,622 \cdot \frac{P_{vap,1}}{101325 - P_{vap,1}} = 0,0188 \frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{gas}}$

$\omega_2 = 0,622 \cdot \frac{P_{vap,2}}{101325 - P_{vap,2}} = 0,01065 \frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{gas}}$

$\dot{m}_{condensa} = \dot{m}_{gas} (\omega_1 - \omega_2) = 0,000845 \frac{\text{kg}_{acqua}}{\text{s}}$

$h_1 = 1,005 \cdot 30 + 0,0188 \cdot (2501,3 + 1,82 \cdot 30) = 78,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{gas}}$

$h_2 = 1,005 \cdot 15 + 0,01065 \cdot (2501,3 + 1,82 \cdot 15) = 42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{gas}}$

$\dot{H}_{condensa} = \dot{m}_{condensa} \cdot c_{p,acqua} \cdot T_2 = 51,15 \text{ W}$

$\dot{Q} = \dot{H}_f - \dot{H}_i = \dot{m}_{gas} (h_2 - h_1) + \dot{H}_{condensa} =$

$= -3620 \text{ W} + 51,15 \text{ W} = -3568,9 \text{ W}$



8)  $\dot{V} = 6 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 6 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}} = 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$   $D = 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m}$

5/5 ipotizzo che ogni piano disti 3 m da quello superiore, quindi l'acqua deve essere innalzata di:

$$\Delta z = 9 \cdot 3 \text{ m} = 27 \text{ m}$$

considero l'acqua come un fluido incompressibile:  $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\Delta P_{\text{tot}} = \rho g \Delta z + \underbrace{\lambda \frac{L}{D} \rho \frac{w^2}{2}}$$

perdite di carico distribuite  $\rightarrow$  ipotizzo  $\lambda = 0,03$

$$w = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{10^{-4}}{\pi \cdot 0,005^2} = 1,27 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

area della sezione

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{tot}} &= 10^3 \cdot 9,81 \cdot 27 + 0,03 \cdot \frac{27}{0,01} \cdot 10^3 \cdot \frac{(1,27)^2}{2} = \\ &= 264870 + 65322 = 330192 \text{ Pa} \quad (= 3,3 \text{ bar}) \end{aligned}$$

la presenza di curve a gomito incrementa le perdite concentrate di qualche quota cinetica, il che non avrebbe un effetto significativo

9)  $\eta_{II} = 60\%$   $\dot{L}_{IN} = 200 \text{ W}$

4/4  $T_{\text{amb}} = 25^\circ \text{C}$

$T_{\text{int}} = 4^\circ \text{C}$

$\Delta T_{\text{evap}} = 15^\circ \text{C}$

$\Delta T_{\text{cond}} = 28^\circ \text{C}$

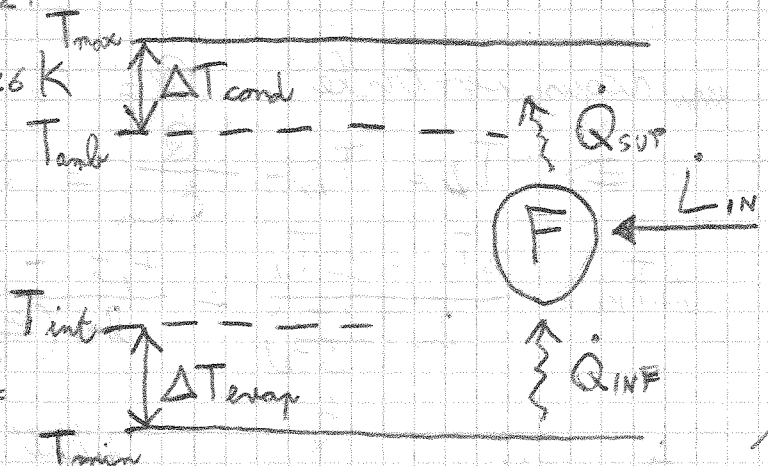
$$T_{\text{min}} = T_{\text{int}} - \Delta T_{\text{evap}} = -11^\circ \text{C} = 262 \text{ K}$$

$$T_{\text{max}} = T_{\text{amb}} + \Delta T_{\text{cond}} = 53^\circ \text{C} = 326 \text{ K}$$

$$\text{COP}_{\text{frigid}} = \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} =$$

$$= \frac{262}{326 - 262} = 4,09$$

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{re}} &= \eta_{II} \cdot \text{COP}_{\text{frigid}} = 0,6 \cdot 4,09 = \\ &= 2,45 \end{aligned}$$



$$\dot{Q}_{INF} = \dot{L}_{IN} \cdot COP_{ref} = 490 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{SUP} = \dot{L}_{IN} + \dot{Q}_{INF} = 690 \text{ W}$$

$$10) \dot{Q} = 3 \text{ kW} \quad \eta = 70\%$$

6/6

$$\text{acqua} \rightarrow \Delta h = c_p \Delta T$$

acqua utente:

$$T_i = 49^\circ \text{C}$$

$$T_f = 57^\circ \text{C}$$

$$\dot{m}_{\text{acqua}} = \frac{\dot{Q}}{c_p (T_f - T_i)} = 0,0896 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_{max} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{\eta} = 4,29 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{C}_{min} (64^\circ \text{C} - 49^\circ \text{C}) \Rightarrow \dot{C}_{min} = \frac{\dot{Q}_{max}}{64^\circ \text{C} - 49^\circ \text{C}} = 286 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$\text{in entrambi i condotti scorre acqua: } c_{pau} = c_{pac} = 4184 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{min} = \frac{\dot{C}_{min}}{c_p} = 0,0683 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

~~non~~ ~~non~~ ~~non~~ ~~non~~

Sato che  $\dot{m}_{acu}$  è noto ed è diverso da  $\dot{m}_{min}$ , si può dedurre che:

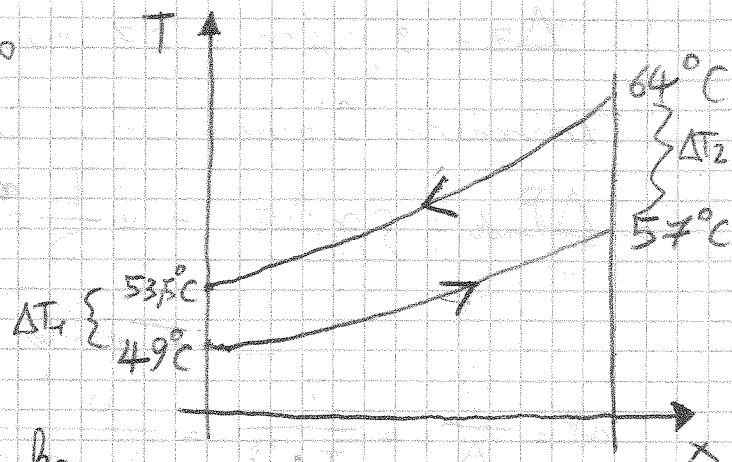
$$\dot{m}_{ac} = \dot{m}_{min} = 0,0683 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{non acqua centrale: } \dot{Q} = c_p \cdot \dot{m}_{ac} (T_i - T_f)$$

$$\Rightarrow T_f = T_i - \frac{\dot{Q}}{\dot{C}_{min}} = 64^\circ \text{C} - \frac{3 \text{ kW}}{286 \frac{\text{W}}{\text{K}}} = 53,5^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = \frac{4,5 - 7}{\ln \left( \frac{4,5}{7} \right)} = 5,66 \text{ K}$$

$$A_{scambiatore} = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{ML}} = \frac{3 \text{ kW}}{150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 5,66 \text{ K}} = 3,53 \text{ m}^2$$



# Abaco di Moody

