

Cognome e Nome _____ Matricola _____ Firma _____

Domande di teoria (valutazione secondo le istruzioni pubblicate sulla pagina BEEP del corso)

1. Da dimostrare. Processo isoterma reversibile (derivazione di k_T e della legge di Boyle)
2. Descrivere le condizioni in cui un gas può essere trattato come ideale; riportare un'equazione di stato di un modello di gas reale e descrivere il significato fisico dei termini che vi appaiono
3. Scrivere l'equazione generale della conduzione per un mezzo avente conduttività variabile con la temperatura.
4. Scrivere l'espressione del bilancio entropico per un sistema aperto o per una macchina termodinamica e spiegare il significato dei termini che vi compaiono.
5. Scrivere le espressioni delle variazioni di entalpia ed entropia per un liquido ideale in funzione di temperatura e pressione.
6. Esprimere il rendimento di un ciclo Joule diretto ideale in funzione di: 1) variazioni entalpiche, 2) temperature.
7. Scrivere la definizione ed il significato dei gruppi adimensionali di Nusselt e di Prandtl.

Esercizio 1 (9 punti)

Un recipiente chiuso contiene acqua liquida a 25 °C e vapore d'acqua saturo a 50 °C. Per ciascuna fase è presente una massa pari a 1 kg. Durante il miscelamento tra le fasi, attraverso i contorni del recipiente la miscela cede all'ambiente esterno, che si trova ad una temperatura $T_E = 15$ °C, energia termica pari a $Q = 1$ kJ. Sapendo che il recipiente è mantenuto a pressione costante, determinare lo stato finale della miscela, la variazione entropica della miscela (commentandone il segno) e l'irreversibilità del processo.

Esercizio 2 (9 punti)

Un compressore adiabatico reale, con un rendimento isoentropico η_{is} pari a 0.85, comprime un flusso d'aria a pressione ambiente e temperatura di 280 K fino a 1.5 Mpa. Si determini:

- la temperatura dell'aria all'uscita del compressore;
- l'entropia specifica generata per irreversibilità;
- l'indice n della trasformazione ideale politropica che porterebbe l'aria dallo stesso stato di ingresso allo stesso stato di uscita;
- il lavoro specifico che sarebbe necessario se il compressore operasse una trasformazione isoterma internamente reversibile.

Esercizio 3 (12 punti)

Una portata di R134a, in condizioni di liquido saturo alla temperatura di 46°C, entra prima in una valvola isoentalpica, che permette l'espansione fino alla pressione di 4 bar, e successivamente nel lato mantello di uno scambiatore di calore tubi/mantello, dove evapora completamente con un coefficiente di scambio termico convettivo h_e pari a 6000 W/(m² K). Una portata di acqua pari a 1 kg/s scorre all'interno di 40 tubi in parallelo del diametro di 6 mm e spessore trascurabile, raffreddandosi da una temperatura di 25°C a 15°C. Sapendo che per le proprietà termofisiche dell'acqua possono essere assunti i valori costanti $\mu = 0.0011$ kg/ms e $\lambda = 0.6$ W/mK, si determini:

- il titolo di vapore in uscita dalla valvola
- il coefficiente di scambio termico totale [W/(m² K)]
- la lunghezza dei tubi

Acqua saturo: tabella in temperatura

Temp. T °C	Press. sat. p_{sat} kPa	Volume specifico m ³ /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_{lu}	Vapore sat. u_u	Liquido sat. h_l	Evap. h_{lu}	Vapore sat. h_u	Liquido sat. s_l	Evap. s_{lu}	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

Correlazioni per il calcolo di Nu per flusso all'interno di tubi

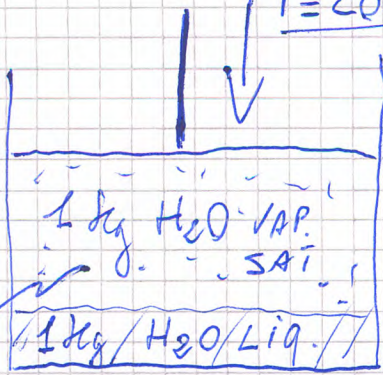
$Re > 4000$ Turbolento $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n$ $n = 0.4$ riscaldamento
 $n = 0.3$ raffreddamento
 $Re < 2500$ Laminare $Nu = 4.36$ flusso termico costante
 $Nu = 3.66$ T superficiale costante

Proprietà del R134a in transizione di fase

Temperature (K)	Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/m ³)	Vapor Density (kg/m ³)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
280.15	0.37463	1271.3	18.319	209.47	402.63	1.0340	1.7235
281.15	0.38761	1267.9	18.938	210.84	403.20	1.0388	1.7230
282.15	0.40094	1264.4	19.573	212.21	403.76	1.0437	1.7226
283.15	0.41461	1261.0	20.226	213.58	404.32	1.0485	1.7221
318.15	1.1599	1125.1	57.657	263.94	421.52	1.2139	1.7092
319.15	1.1903	1120.6	59.292	265.47	421.92	1.2186	1.7089
320.15	1.2213	1116.1	60.969	267.00	422.31	1.2233	1.7085
321.15	1.2529	1111.5	62.690	268.53	422.69	1.2280	1.7081

ESERCIZIO 1

$$P = \text{cost.} = P_{\text{SAT}} @ 50^\circ\text{C} = 12,349 \text{ kPa}$$



ACQUA LIQUIDA

$$M_l = 1 \text{ kg} \quad T_l = 25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$$

ACQUA VAPORE

$$M_v = 1 \text{ kg} \quad T_v = 50^\circ\text{C} = 323,15 \text{ K}$$

$$Q = 1 \text{ kJ} \text{ VERSO AMBIENTE A } T_{\text{AMB}} = 13^\circ\text{C} = 288,15 \text{ K}$$

MISCELAZIONE ISOBARA NON ADIABATICA DI ACQUA

$$H_f = H_i - Q \quad H_i = M_l \cdot h_l^* + M_v \cdot h_v^*$$

$$h_l^* \approx c_{pe}^* \cdot T_l(z) \quad h_l^* = 4 \cdot 186,8 \cdot 25 = 104'670 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{DA TABELLA } h_v^* = 2592,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_i = 1 \cdot 104'670 + 1 \cdot 2592,1 \cdot 10^3 = 2696,770 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$H_f = 2696,770 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^3 = 2695,770 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$h_m^* = h_f^* = \frac{H_f}{M_l + M_v} \rightarrow h_f^* = \frac{2695,77 \cdot 10^3}{2} = 1347,885 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Dalla tabella dell'acqua satura, considerando che la pressione è rimasta costante, vedo che h_f^* è compresa tra l'entalpia del liquido saturo e quella del vapore saturo. Lo stato finale è una miscela liquido-vapore di cui posso ricavare il titolo utilizzando la regola della leva.

$$h_f^* = (1-x) h_{ls}^* + x h_{vs}^* \quad h_{ls}^* = 209,33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{vs}^* = 2532,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x_f = \frac{h_f^* - h_{ls}^*}{h_{vs}^* - h_{ls}^*} = \frac{1347,885 - 209,33}{2532,1 - 209,33} = 0,4778$$

$47,78\%$

VARIAZIONE DI ENTROPIA DELLA MISCELA

$$\Delta S_M = S_f - S_i \quad S_f = M_f \Delta s_f^* = (M_l + M_v) \Delta s_f^*$$

$$\Delta s_f^* = (1-x) \Delta s_{ls}^* + x \Delta s_{vs}^* \quad \text{da tabella } \Delta s_{ls}^* = 0,7038 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \quad \Delta s_{vs}^* = 8,0763 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta s_f^* = (1-0,4778) 0,7038 + 0,4778 \cdot 8,0763 = 4,2263805 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$S_f = 2 \cdot 4,2263805 = 8,452761 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

$$S_i = S_{li} + S_{vi} = M_l \Delta s_{li}^* + M_v \Delta s_{vi}^* \quad \Delta s_{vi}^* = 8,0763 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta s_{li}^* = c_{pl}^* \ln \frac{T_c}{T_{ref}} = 4,1868 \cdot \ln \frac{298,15}{273,15} = 0,366662 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$S_i = 1 \cdot 0,366662 + 1 \cdot 8,0763 = 8,442962 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

$$\Delta S_M = S_f - S_i = 9,799 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \approx 9,8 \frac{\text{J}}{\text{K}} > 0 \text{ a causa dell'}$$

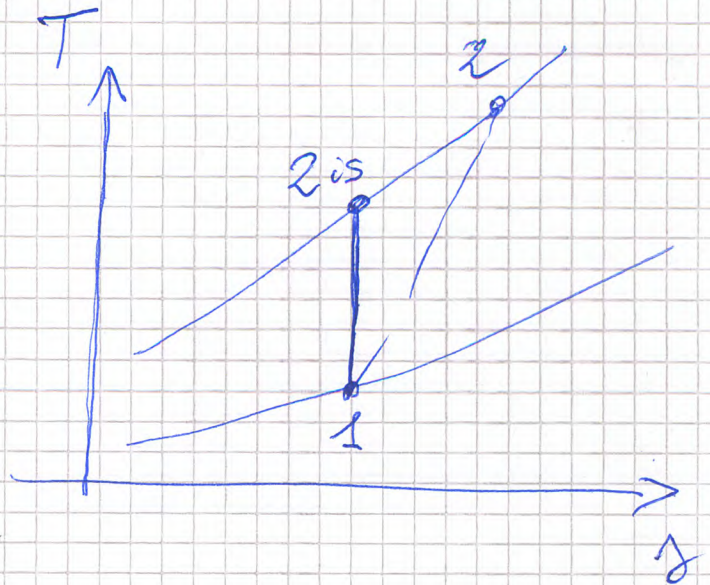
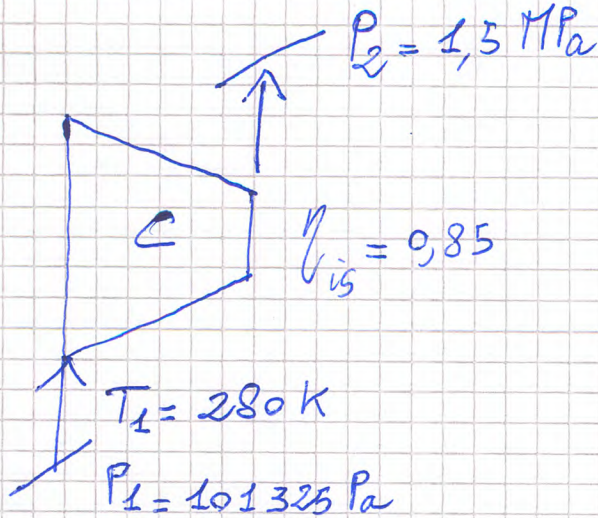
dell'entropia di miscelamento, nonostante ceda calore all'ambiente.

VARIAZIONE DI ENTROPIA DEL PROCESSO, $\Delta S_{TOT} > 0$

$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_M + \Delta S_{AMB} \quad \Delta S_{AMB} = \frac{Q}{T_{AMB}}$$

$$\Delta S_{TOT} = 9,799 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{288,15} = 0,01327 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} = 13,27 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

ESERCIZIO 2



X TRASFORMAZIONE ADIABATICA REVERSIBILE 1-2_{is} SI HA

$$P_1^{\frac{1-m}{m}} T_1 = P_2^{\frac{1-m}{m}} T_{2is} \quad \text{con } m = \kappa = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$$

$$T_{2is} = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = 280 \left(\frac{0,101325}{1,5} \right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 604,72 \text{ K}$$

$$\eta_{is} = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \underset{\text{IDEALE}}{\text{GAS}} \frac{T_{2is} - T_1}{T_2 - T_1} \rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2is} - T_1}{\eta_{is}}$$

$$T_2 = 280 + \frac{604,72 - 280}{0,85} = \boxed{662 \text{ K} = T_2}$$

$$\Delta s_{12}^* = \Delta s_{12}^* = c_{Pa}^* \ln \frac{T_2}{T_{2is}} \quad c_{Pa}^* = \frac{17}{2} \frac{8314,5}{28,96} = 1004,86 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$= 1004,86 \ln \frac{662}{604,72} = \boxed{90,94 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}}$$

Per trasformazione politropica di indice n tra 1 e 2, si può scrivere: $\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-m}{m}} = \frac{T_2}{T_1}$ dalla definizione di logaritmi $\log_b x = y \rightarrow x = b^y$ scrivo $\log \left(\frac{T_2/T_1}{(P_1/P_2)^{\frac{1-m}{m}}} \right) = \frac{1-m}{m}$ dalla regola del cambiamento di base per i logaritmi

$$\log_b x = \frac{\log_k x}{\log_k b} \text{ posso scrivere}$$

$$\log_{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)} \left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{\log_e \frac{T_2}{T_1}}{\log_e \frac{P_1}{P_2}} = \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{\ln \frac{P_1}{P_2}} = \frac{1-m}{m}$$

$$\frac{1-m}{m} = \frac{\ln \frac{662}{280}}{\ln \frac{e,101325}{1,5}} = -0,3193 \rightarrow 1-m = -0,3193 m$$

$$m = \frac{1}{1-0,3193} = 1,4690 \approx 1,47$$

Per una generica politropica il lavoro scambiato è:

$$L^* = - \frac{P_i V_i}{1-m} \left[1 - \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{m-1} \right] \begin{matrix} \text{con } i = \text{stato iniziale} = 1 \\ \text{con } f = \text{stato finale} = 2 \end{matrix} \text{ se } m \neq 1$$

$$L^* = P_i V_i \ln \frac{V_f}{V_i} \text{ se } m=1 \text{ (ISOBARICA)} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}$$

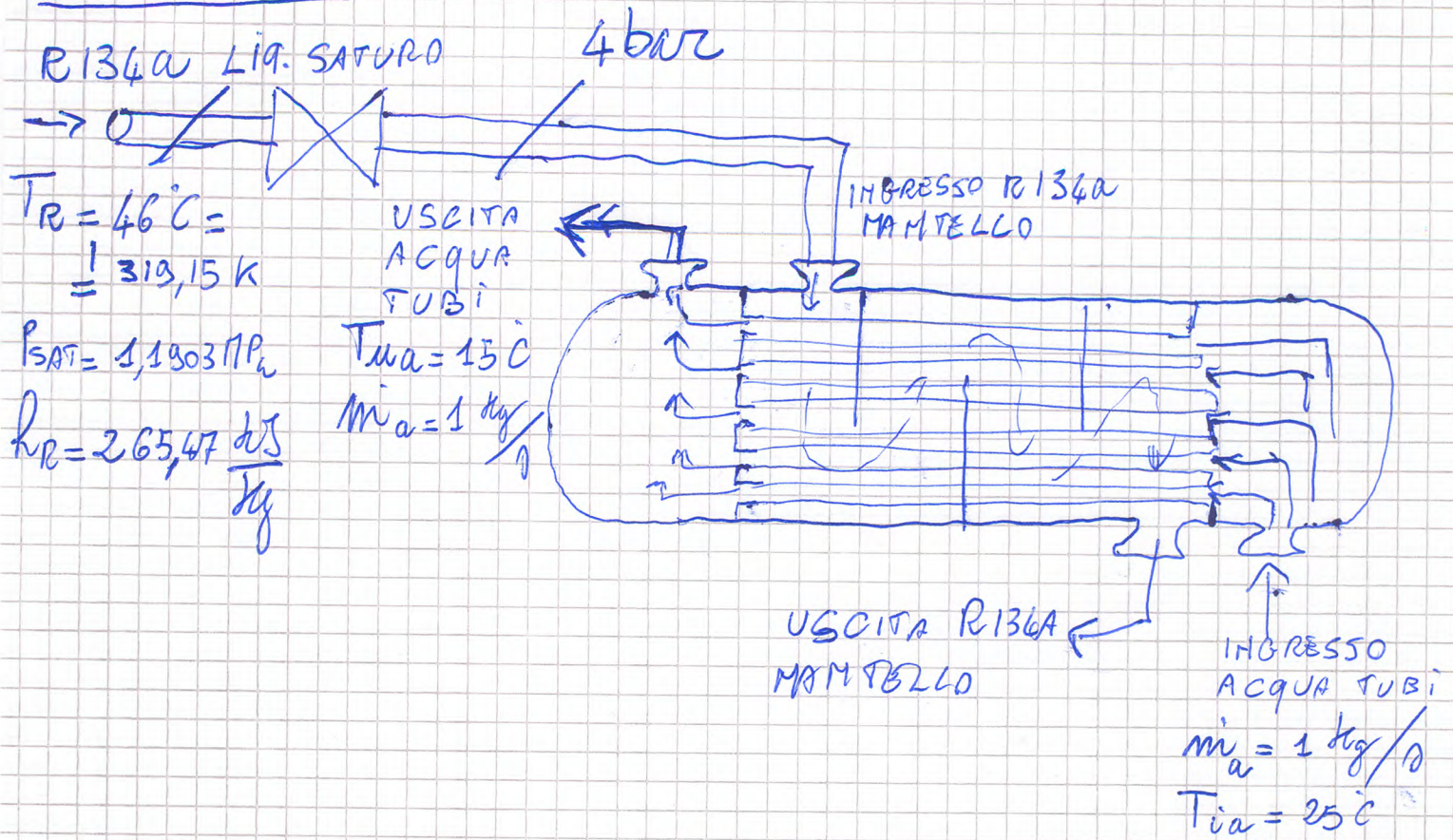
$$L^* = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} \rightarrow L^* = R^* T_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$L^* = \frac{8314,5}{28,96} \cdot 280 \ln \left(\frac{0,101325}{1,5} \right) = -216 \cdot 638,8 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

< 0 perché entrante

$$L^* = \int_1^2 P dV > 0 \text{ se uscente}$$

ESERCIZIO 3



ESPANSIONE IN VALVOLA ISOENTROPICA DA

$$P_i = 1,1903 \cdot 10^6 \text{ Pa} \quad \text{a} \quad P_u = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad h_i = h_u = 265,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Per } P_u = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 0,4 \text{ MPa} \quad h_{LS}^* = 212,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad h_{VS}^* = 403,76 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_u^* = (1-x) h_{LS}^* + x h_{VS}^* \quad x = \frac{h_u^* - h_{LS}^*}{h_{VS}^* - h_{LS}^*}$$

$$x = \frac{265,47 - 212,21}{403,76 - 212,21} = 0,2780$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad h_i \text{ da correlazione a scelta}$$

$$h_e = 6000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

portata di acqua $\dot{m} = f \cdot w \cdot S_c \cdot N_t$ S_c area singolo tubo

$N_t = n$ di tubi

$$w = \frac{\dot{m}}{f \cdot S_c \cdot N_t} \quad S_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad w = \frac{1}{\frac{1000 \cdot \pi (6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 40}{4}} = 0,8842 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,8842 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{1,1 \cdot 10^{-3}} \approx 4823 \rightarrow \text{turbolento}$$

$$Nu = 0,023 \cdot 4823^{0,8} \cdot 8^{0,3} = 37,96 \quad Nu = \frac{h d}{\lambda}$$

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{37,96 \cdot 0,96}{6 \cdot 10^{-3}} = 3796 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{3796} + \frac{1}{6000}} = \boxed{2325 \frac{W}{m^2 K}} \quad \text{ho trascurato conduttione attraverso il tubo.}$$

$$Q = U \Delta T_{ml} \cdot S \quad S = \pi d L N$$

$$Q = U \Delta T_{ml} \pi d L N \rightarrow L = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml} \cdot \pi \cdot d \cdot N}$$

$$Q = \dot{m}_a C_a (T_{ia} - T_{ua}) \quad \text{BILANCIO ENERGETICO SU ACQUA}$$

$$Q = 1 \cdot 4186,8 (25 - 15) = 41868 \text{ W}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{ia} - T_{ur}) - (T_{ua} - T_{ir})}{\ln \frac{T_{ia} - T_{ur}}{T_{ua} - T_{ir}}} \quad \begin{array}{l} T_{ir} = T_{ur} = T_{ev} = 282,15 \text{ K} \\ \text{è la } T_{SAT} \text{ a } P = 4 \text{ bar} \end{array}$$

$$T_{ia} = 25^\circ C = 298,15 \text{ K}$$

$$T_{ua} = 15^\circ C = 288,15 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(298,15 - 282,15) - (288,15 - 282,15)}{\ln \frac{298,15 - 282,15}{288,15 - 282,15}} = \frac{10}{0,980829} = 10,1955^\circ C$$

$$L = \frac{41868}{2325 \cdot 10,1955 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 40} = 2,34255 \rightarrow \boxed{2,35 \text{ m}}$$