

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



PME 3344

Termodinâmica Aplicada

2ª Lei da Termodinâmica - Exercícios



Exercício 01

Utilizando a tabela apropriada, determine a variação da entropia específica nos estados indicados, em kJ/kg.K.

a) Água, $p_1=10$ MPa, $T_1=400^\circ\text{C}$, $p_2=10$ MPa, $T_2=100^\circ\text{C}$

b) R134a, $h_1=261,23$ kJ/kg, $T_1=-40^\circ\text{C}$, vapor saturado a $p_2=0,5$ MPa

c) Ar como gás ideal, $T_1=7^\circ\text{C}$, $p_1=0,2$ MPa, $p_2=0,1$ MPa, $T_2=327^\circ\text{C}$



Exercício 01

a) Água, $p_1=10$ MPa, $T_1=400^\circ\text{C}$, $p_2=10$ MPa, $T_2=100^\circ\text{C}$

Tabela B.1.2 (continuação)

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_l	v_v	u_l	u_w	u_v	h_l	h_w	h_v	s_l	s_w	s_v
9000	303,40	0,001418	0,02048	1350,47	1207,28	2557,75	1363,23	1378,88	2742,11	3,2857	2,3915	5,6771
10000	311,06	0,001452	0,01803	1393,00	1151,40	2544,41	1407,53	1317,14	2724,67	3,3595	2,2545	5,6140
11000	318,15	0,001489	0,01599	1433,68	1096,06	2529,74	1450,05	1255,55	2705,60	3,4294	2,1233	5,5527

Tabela B.1.3 (continuação)

Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 10\,000$ kPa (311,06)				
Sat.	0,01803	2544,41	2724,67	5,6140
350	0,02242	2699,16	2923,39	5,9442
400	0,02641	2832,38	3096,46	6,2119
450	0,02975	2943,32	3240,83	6,4189
500	0,03279	3045,77	3373,63	6,5965
550	0,03564	3144,54	3500,92	6,7561
600	0,03837	3241,68	3625,34	6,9028
650	-	-	-	-
700	0,04358	3434,72	3870,52	7,1687
800	0,04859	3628,97	4114,91	7,4077
900	0,05349	3826,32	4361,24	7,6272
1000	0,05832	4027,81	4611,04	7,8315
1100	0,06312	4233,97	4865,14	8,0236
1200	0,06789	4444,93	5123,84	8,2054
1300	0,07265	4660,44	5386,99	8,3783

$$s_1 = 6,2119 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 01

a) Água, $p_1=10$ MPa, $T_1=400^\circ\text{C}$, $p_2=10$ MPa, $T_2=100^\circ\text{C}$

Tabela B.1.1

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_l	v_v	u_l	u_{lv}	u_v	h_l	h_{lv}	h_v	s_l	s_{lv}	s_v
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2688,13	1,2500	6,1859	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958

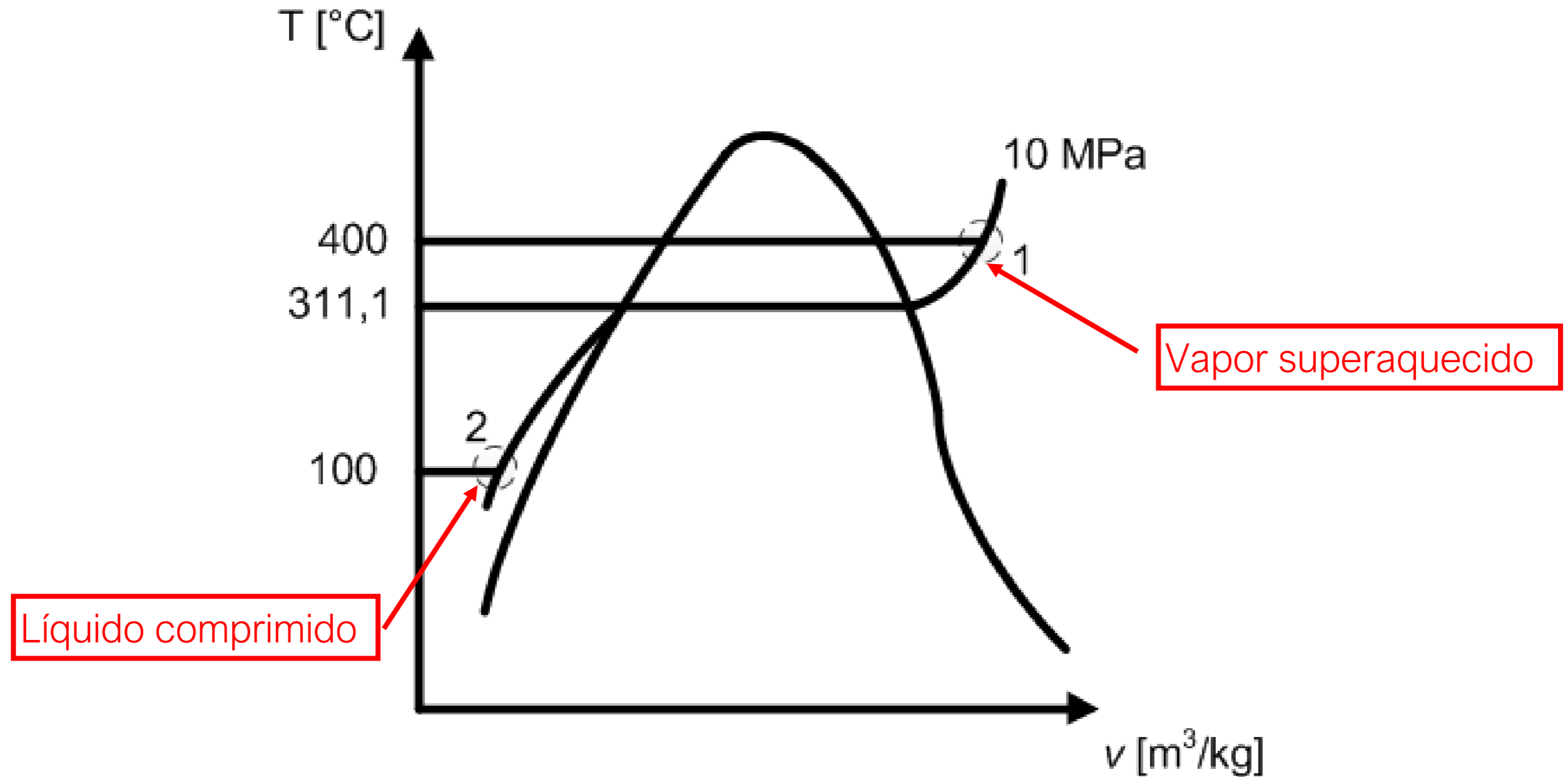
$$s_2 = s_{\text{líquido}, T=100^\circ\text{C}} = 1,3068 \text{ kJ/kg.K}$$

$$s_2 - s_1 = 1,3068 - 6,2119 = -4,9051 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 01

a) Água, $p_1=10$ MPa, $T_1=400^\circ\text{C}$, $p_2=10$ MPa, $T_2=100^\circ\text{C}$



Exercício 01



b) R134a, $h_1=261,23$ kJ/kg, $T_1=-40^\circ\text{C}$, vapor saturado a $p_2=0,5$ MPa

Tabela B.5.1
R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado $v_{f,l}$	Evap. v_{fg}	Vapor saturado $v_{g,v}$	Líquido saturado $u_{f,l}$	Evap. u_{fg}	Vapor saturado $u_{g,v}$	Líquido saturado $h_{f,l}$	Evap. h_{fg}	Vapor saturado $h_{g,v}$	Líquido saturado $s_{f,l}$	Evap. s_{fg}	Vapor saturado $s_{g,v}$
-45	39,6	0,000701	0,45783	0,45853	143,15	208,99	352,15	143,18	227,14	370,32	0,7740	0,9956	1,7695
-40	51,8	0,000708	0,35625	0,35696	148,95	206,05	355,00	148,98	224,50	373,48	0,7991	0,9629	1,7620
-35	66,8	0,000715	0,28051	0,28122	154,93	202,93	357,86	154,98	221,67	376,64	0,8245	0,9308	1,7553

Para $T=-40^\circ\text{C}$: $h_l=148,98$ kJ/kg e $h_v=373,48$ kJ/kg $\rightarrow h_l < h_1 < h_v$

$$h_1 = x_1 h_{v,1} + (1 - x_1) h_{l,1}$$

$$x_1 = \frac{h_1 - h_{l,1}}{h_{v,1} - h_{l,1}} = \frac{261,23 - 148,98}{373,48 - 148,98} = 0,50$$

$$s_1 = x_1 s_{v,1} + (1 - x_1) s_{l,1}$$

$$s_1 = (0,5 * 1,7620) + ((1 - 0,5) * 0,7991) = 1,2806 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

Exercício 01



b) R134a, $h_1=261,23$ kJ/kg, $T_1=-40^\circ\text{C}$, vapor saturado a $p_2=0,5$ MPa

Tabela B.5.1

R-134a saturado

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg.K)		
		Líquido saturado $v_{f,l}$	Evap. v_{lv}	Vapor saturado v_v	Líquido saturado u_l	Evap. u_{lv}	Vapor saturado u_v	Líquido saturado h_l	Evap. h_{lv}	Vapor saturado h_v	Líquido saturado s_l	Evap. s_{lv}	Vapor saturado s_v
15	489,5	0,000805	0,04133	0,04213	220,10	166,35	386,45	220,49	186,58	407,07	1,0725	0,6475	1,7200
20	572,8	0,000817	0,03524	0,03606	227,03	162,16	389,19	227,49	182,35	409,84	1,0963	0,6220	1,7183
25	666,3	0,000829	0,03015	0,03098	234,04	157,83	391,87	234,59	177,92	412,51	1,1201	0,5967	1,7168

Interpolando $p_2= 500$ kPa: $p_a=489,5$ kPa $\rightarrow s_a=1,7200$ kJ/kg.K

$p_b=572,8$ kPa $\rightarrow s_b=1,7183$ kJ/kg.K

$$s_2 = s_a + (p_2 - p_a) \frac{s_b - s_a}{p_b - p_a} =$$

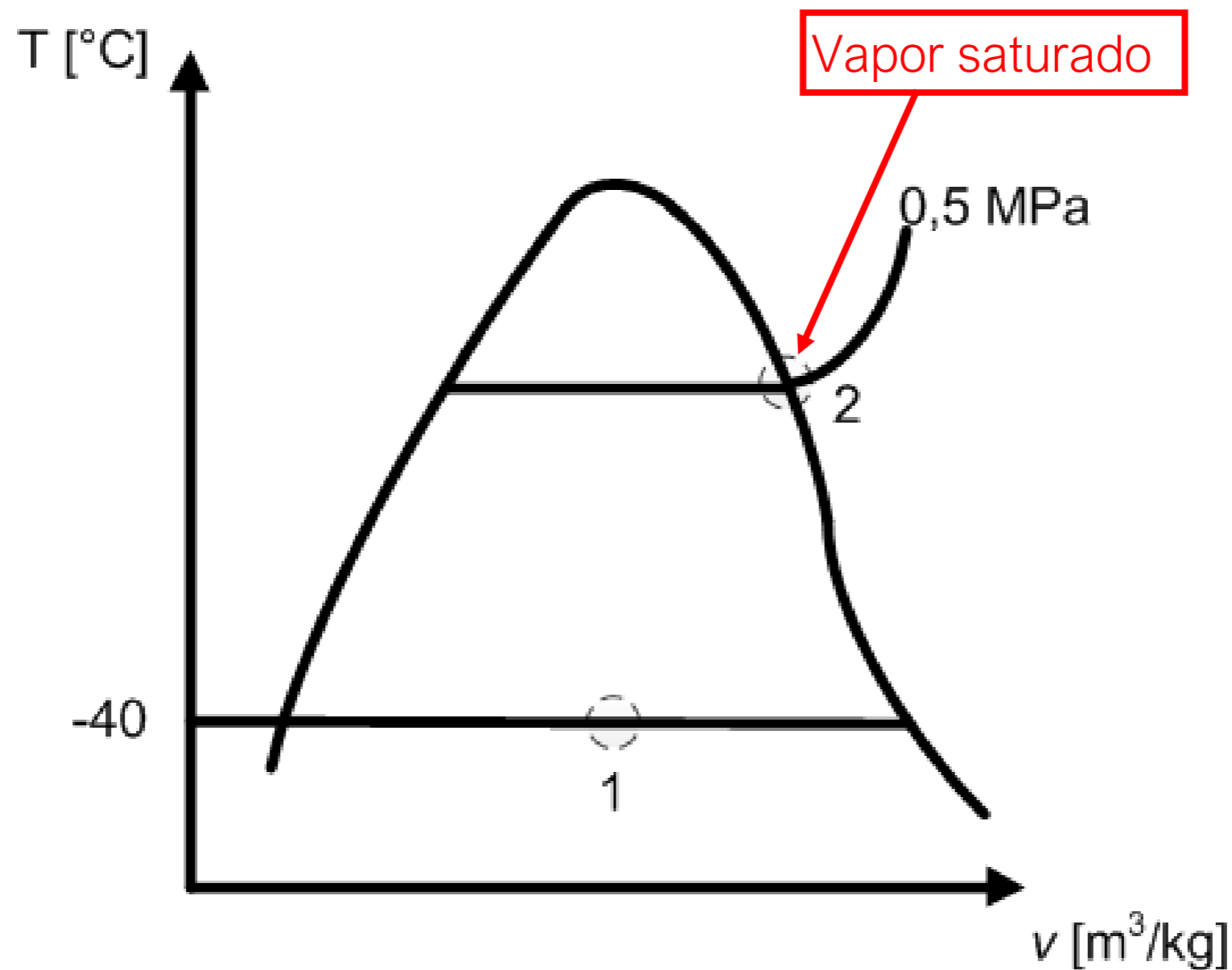
$$s_2 = 1,7200 + (500 - 489,5) \frac{(1,7183 - 1,7200)}{(572,8 - 489,5)} = 1,7198 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 01

b) R134a, $h_1=114,44$ kJ/kg, $T_1=-40^\circ\text{C}$, vapor saturado a $p_2=0,5$ MPa

$$s_2 - s_1 = 1,7198 - 1,2086 = 0,5112 \text{ kJ/kg.K}$$





Exercício 01

c) Ar como gás ideal, $T_1=7^\circ\text{C}$, $p_1=0,2\text{ MPa}$, $p_2=0,1\text{ MPa}$, $T_2=327^\circ\text{C}$

Sendo gás ideal $s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$ ou $s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

TABELA A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s_T^0 kJ/kg \times K	P_r	v_r
200	142,77	200,17	6,46260	0,2703	493,47
220	157,07	220,22	6,55812	0,3770	389,15
240	171,38	240,27	6,64535	0,5109	313,27
260	185,70	260,32	6,72562	0,6757	256,58
280	200,02	280,39	6,79998	0,8756	213,26
290	207,02	290,43	6,83521	0,9899	195,36

$$s_2 - s_1 = s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{ou} \quad s_2 - s_1 = s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0 + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$



Exercício 01

c) Ar como gás ideal, $T_1=7^\circ\text{C}$, $p_1=0,2$ MPa, $p_2=0,1$ MPa, $T_2=327^\circ\text{C}$

- $T_1=7^\circ\text{C}=280$ K, $p_1=0,2$ MPa ; $T_2=327^\circ\text{C}=600$ K, $p_2=0,1$ MPa
- $C_{p,\text{ar}}=1,004$ kJ/kg.K

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 1,004 * \ln \left(\frac{600}{280} \right) - 0,287 * \ln \left(\frac{0,1}{0,2} \right)$$
$$= 0,7652 + 0,1989 = 0,9641 \text{ kJ} / \text{kg.K}$$

TABELA A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

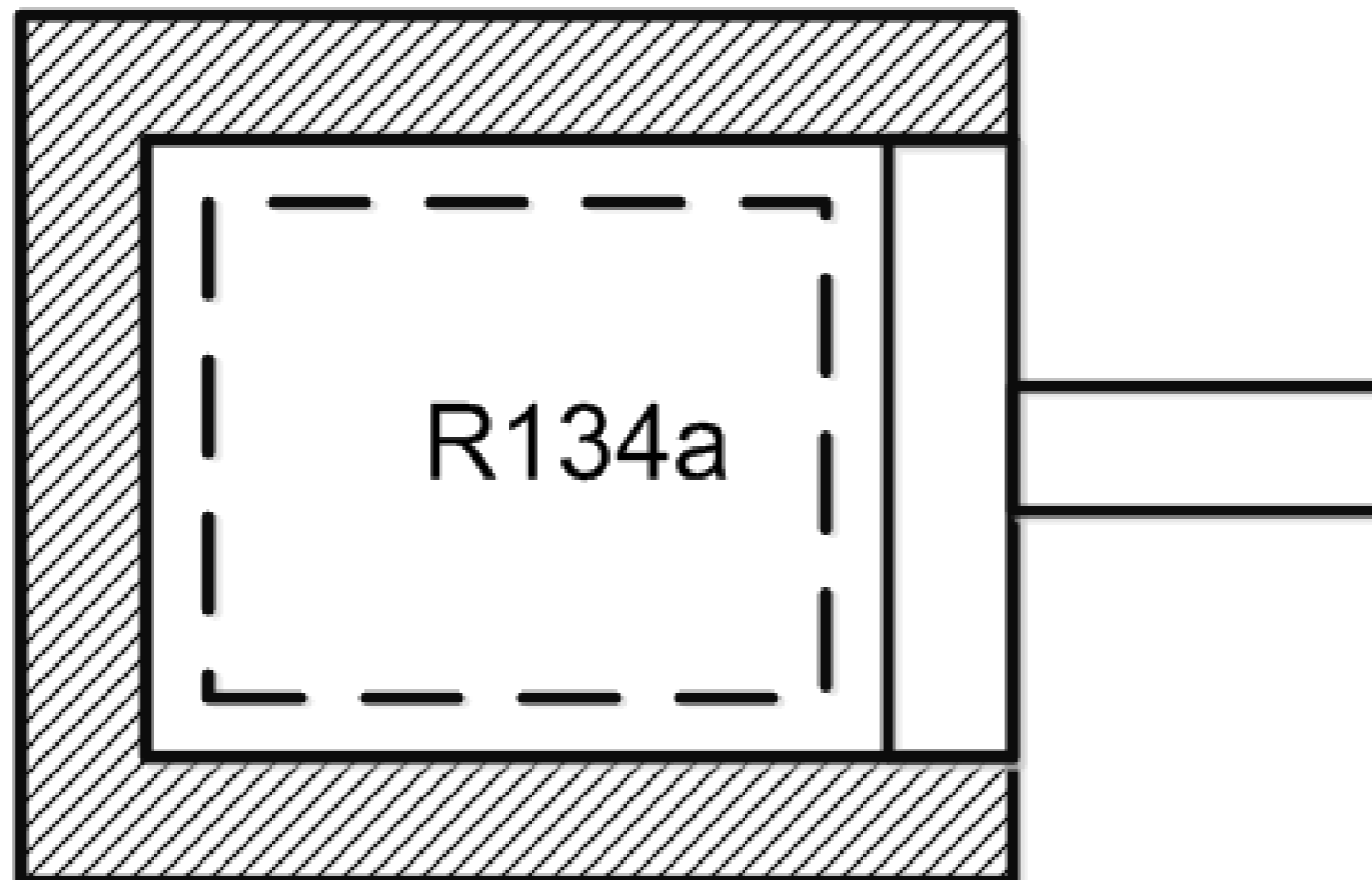
T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s_T^0 kJ/kg \times K	P_r	v_r
280	200,02	280,39	6,79998	0,8756	213,26
600	435,10	607,32	7,57638	13,092	30,561

$$s_2 - s_1 = s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = (7,57638 - 6,79998) - 0,287 * \ln \left(\frac{0,1}{0,2} \right) =$$
$$= 0,7764 + 0,1989 = 0,9753 \text{ kJ} / \text{kg.K}$$



Exercício 02

Um conjunto pistão-cilindro, isolado, contém fluido refrigerante 134a, inicialmente ocupando $0,02 \text{ m}^3$ a 650 kPa , 40°C . O fluido refrigerante se expande até um estado final onde a pressão é de 350 kPa . O trabalho desenvolvido pelo fluido refrigerante é medido como 5300 J . Este valor está correto?





Exercício 02

Hipóteses:

- Sistema: massa de R134a
- Processo adiabático
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial

Aplicando a 2ª Lei para sistemas:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gerada}$$

Processo adiabático: $\delta Q = 0$

Logo: $\Delta S = S_{gerada} \geq 0 \Rightarrow s_2 - s_1 \geq 0 \Rightarrow s_2 \geq s_1$ (Condição para a qual o processo é possível)

Aplicando a 1ª Lei para sistemas:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$u_2 - u_1 = \frac{-W_{1-2}}{m}$$

Para o estado 1: $p_1=650$ kPa, $T_1=40^\circ\text{C}$ → vapor superaquecido

Logo: $u_1=405,38$ kJ/kg, $v_1=0,03525$ m³/kg, $s_1= 1,7696$ kJ/kg.K

$$v_1 = \frac{V_1}{m} \Rightarrow m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0,02}{0,03525} = 0,57\text{kg}$$

$$\text{Logo: } u_2 = 405,38 - \frac{5,3}{0,57} = 396,08\text{kJ} / \text{kg}$$



Exercício 02

Para o estado 2: $u_2=396,08$ kJ/kg, $p_2= 350$ kPa \rightarrow vapor superaquecido

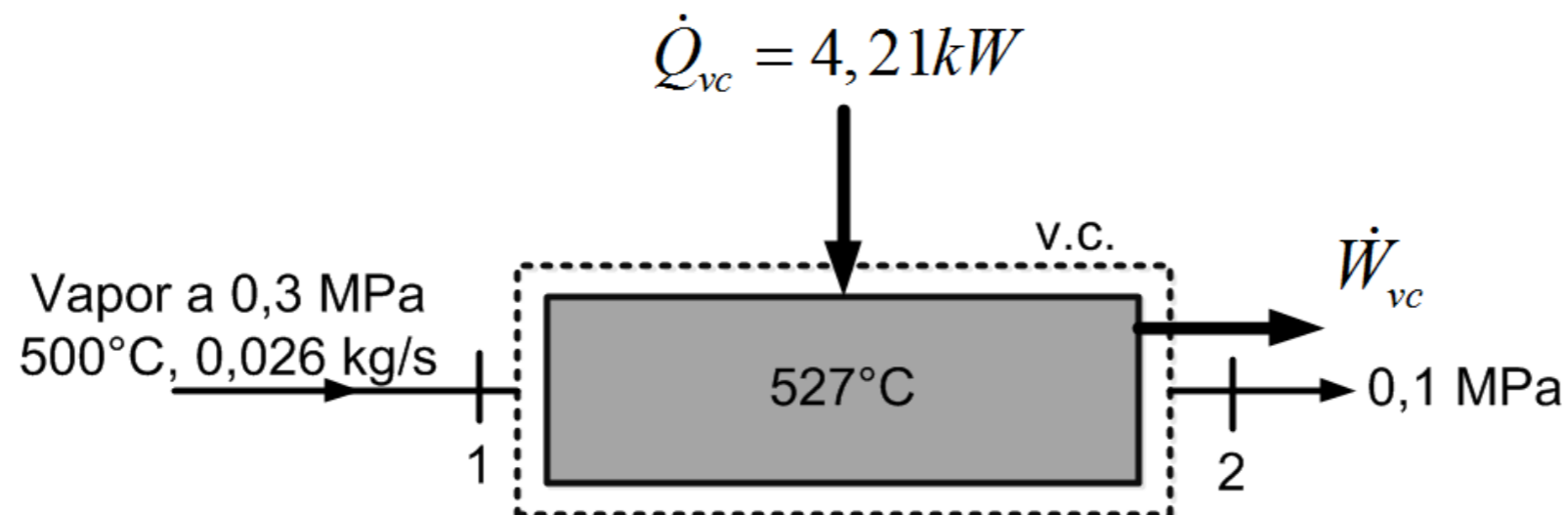
Logo: $T_2=23,8^\circ\text{C}$, $s_2= 1,7845$ kJ/kg.K e $s_1= 1,7696$ kJ/kg.K

Portanto: $s_2 > s_1 \rightarrow$ Processo proposto é possível



Exercício 03

A figura abaixo mostra uma proposta de um equipamento para produzir potência utilizando energia sob a forma de calor proveniente de um processo industrial a alta temperatura em conjunto com uma entrada de vapor. A figura fornece dados para a operação em estado estacionário. Todas as superfícies são bem isoladas, exceto uma a 527°C , através da qual ocorre transferência de calor a uma taxa de $4,21\text{ kW}$. Desprezando as variações de energia cinética e potencial, calcule a potência teórica máxima que pode ser desenvolvida em kW.





Exercício 03

Hipóteses:

- Volume de controle: equipamento
- Regime permanente
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial
- Transferências de calor ocorrem a 527°C

Aplicando o balanço de massa:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\therefore \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$



Exercício 03

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\dot{Q}_{vc} = 4,21 \text{ kW}$$

$$\dot{m}(h_1 - h_2) + 4,21 - \dot{W}_{vc} = 0$$

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) + 4,21 \Rightarrow \dot{W}_{vc} \uparrow \quad h_2 \downarrow$$



Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

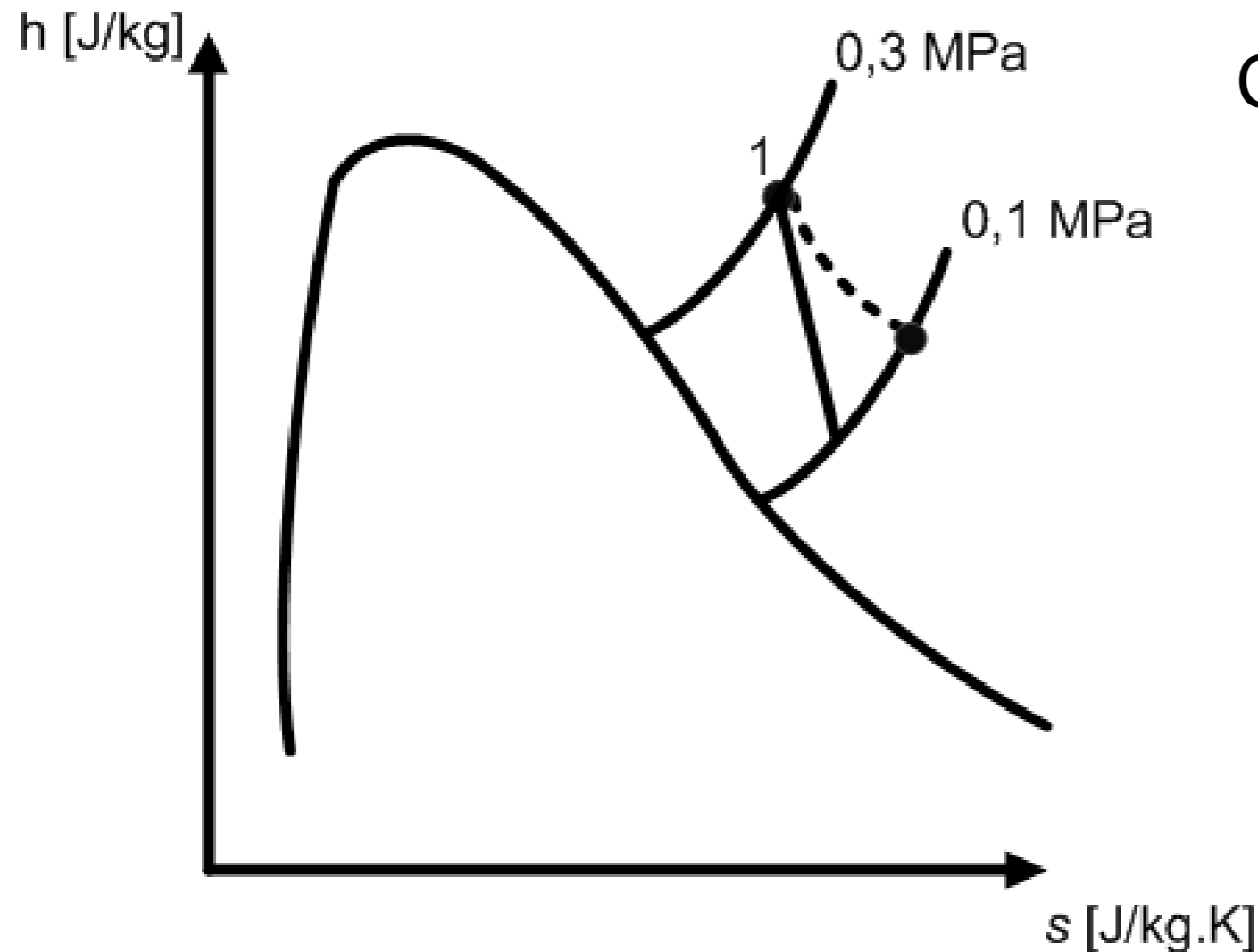
Sendo: $\therefore \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad \frac{dS_{vc}}{dt} = 0$

$$0 = \dot{m}(s_1 - s_2) + \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

$$s_2 = s_1 + \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}T} + \frac{\dot{S}_{gerada}}{\dot{m}}$$



Exercício 03



Como queremos reduzir o trabalho:

$$\dot{W}_{vc} \uparrow \quad h_2 \downarrow$$

Observando o diagrama hXs:

$$h_2 \downarrow \quad s_2 \downarrow$$

Logo:

$$s_2 = s_1 + \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}T} + \frac{\dot{S}_{gerada}}{\dot{m}} \rightarrow s_{2,mínimo} \Rightarrow \frac{\dot{S}_{gerada}}{\dot{m}} = 0 \Rightarrow s_{2,mínimo} = s_1 + \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}T}$$



Exercício 03

$$s_{2,mínimo} = s_1 + \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}T}$$

Para o estado 1: vapor a 0,3 MPa e 500°C → vapor superaquecido

$$s_1 = 8,3250 \text{ kJ/kg.K}; h_1 = 3485,96 \text{ kJ/kg}$$

Logo:

$$s_{2,mínimo} = s_1 + \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}T} = 8,3250 + \frac{4,21}{0,026 * (527 + 273)} = 8,5274 \text{ kJ/kg.K}$$

Para o estado 2: vapor a 0,1 MPa e $s_2 = 8,5274 \text{ kJ/kg.K}$

$$T_2 = 395,1^\circ\text{C}; h_2 = 3268,16 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{vc,máximo} &= \dot{m}(h_1 - h_2) + 4,21 = \\ &= 0,026 * (3485,96 - 3268,16) + 4,21 = 9,87 \text{ kW} \end{aligned}$$



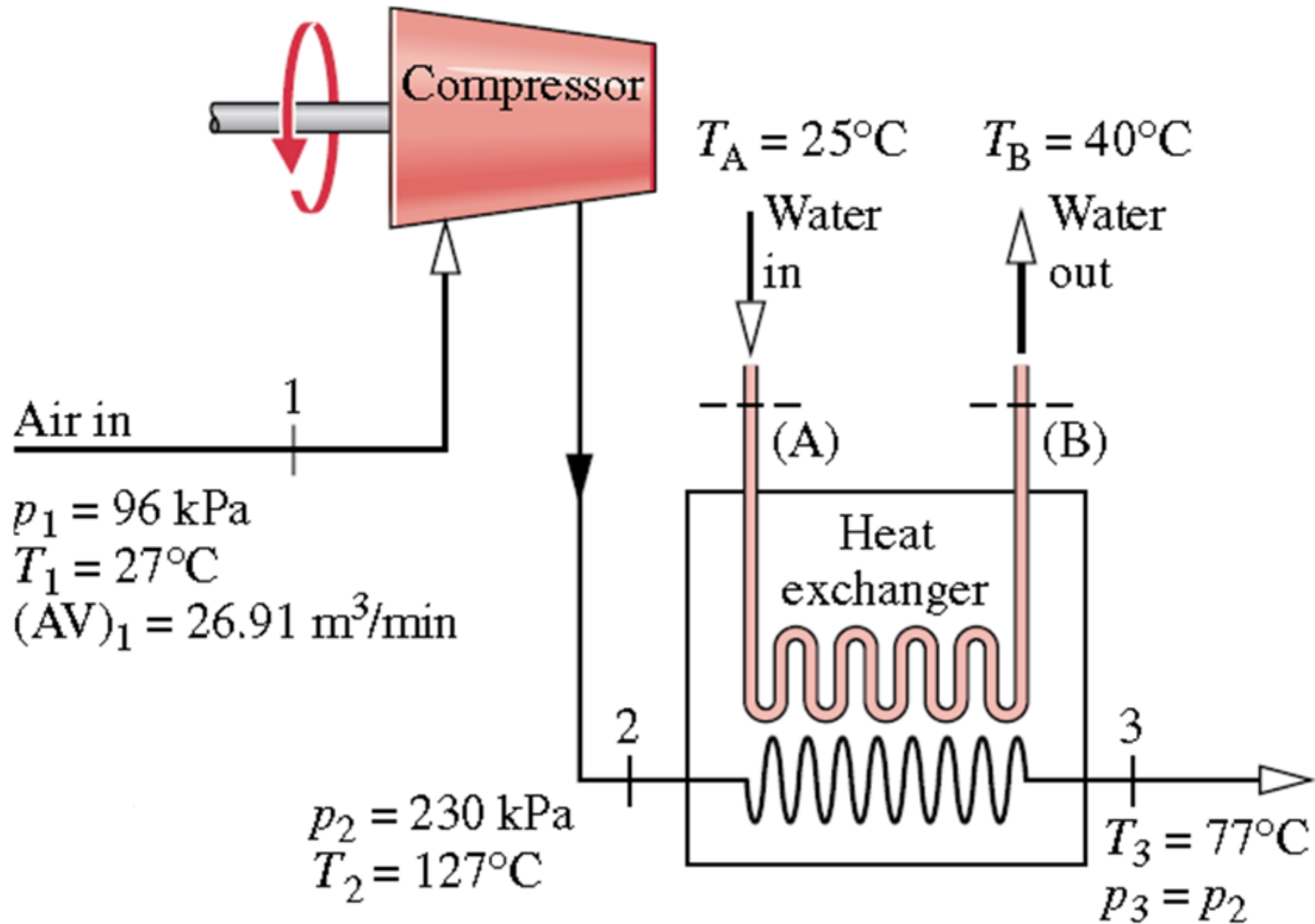
Exercício 04

Ar considerado como gás ideal escoia através do compressor e do trocador mostrado abaixo. Uma corrente separada de água líquida também escoia no trocador de calor. Os dados fornecidos são para a operação em regime permanente. A troca de calor com a vizinhança pode ser desprezada, bem como variações de energia cinética e potencial. Determine:

- a) A potência do compressor, em kW e a vazão mássica de água de resfriamento, em kg/s
- b) As taxas de geração de entropia, em kW/K, para o compressor e o trocador de calor



Exercício 04





Exercício 04

Hipóteses:

- Regime permanente
- Perdas de calor desprezíveis
- Não há trabalho realizado/fornecido no trocador
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial
- Ar considerado gás perfeito

Aplicando o balanço de massa para o volume de controle definido pelo compressor:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\therefore \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ar}$$



Exercício 04

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pelo compressor:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático})$$

Logo: $0 = \dot{m}_{ar} (h_1 - h_2) - \dot{W}_{compressor} \Rightarrow \dot{W}_{compressor} = \dot{m}_{ar} (h_1 - h_2)$

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{ar} &= \rho_{ar} V_{ar} A_{ar} = \frac{V_{ar} A_{ar}}{v_{ar}} \\ p_{ar} v_{ar} &= R_{ar} T_{ar} \Rightarrow v_{ar} = \frac{R_{ar} T_{ar}}{p_{ar}} \end{aligned} \right\} \dot{m}_{ar} = \frac{p_{ar} V_{ar} A_{ar}}{R_{ar} T_{ar}} =$$
$$= \frac{96 \times 10^3 * \left(\frac{26,91}{60} \right)}{287 * (27 + 273)} = 0,50 \text{ kg/s}$$



Exercício 04

Utilizando a tabela A.7:

$$h_1 (T_1 = 300K) = 300,47kJ / kg; h_2 (T_2 = 400K) = 401,30kJ / kg$$

$$\dot{W}_{compressor} = \dot{m}_{ar} (h_1 - h_2) = 0,50 * (300,47 - 401,30) = -50,4kW$$

Aplicando o balanço de massa para o volume de controle definido pelo trocador:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\therefore \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ar}$$

$$\therefore \dot{m}_A = \dot{m}_B = \dot{m}_{\acute{a}gua}$$



Exercício 04

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pelo trocador:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático}) \quad \dot{W}_{vc} = 0$$

$$0 = \dot{m}_{ar} (h_2 - h_3) + \dot{m}_{\acute{a}gua} (h_A - h_B) \Rightarrow \dot{m}_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{ar} \frac{(h_2 - h_3)}{(h_B - h_A)}$$

Para líquidos: $h = C_p T$. Admitindo $C_{p,\acute{a}gua} = \text{constante} = 4184 \text{ J/kg.K}$

$$\text{Utilizando a tabela A.7: } h_3 (T_1 = 350 \text{ K}) = 350,78 \text{ kJ / kg}$$



Exercício 04

$$\dot{m}_{\text{água}} = \dot{m}_{\text{ar}} \frac{(h_2 - h_3)}{(h_B - h_A)} = 0,50 * \frac{(401,30 - 350,78)}{4,184 * (40 - 25)} = 0,403 \text{ kg/s}$$

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle definido pelo compressor:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ar} \\ \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático}) \end{aligned} \right\}$$

$$0 = \dot{m}_{ar} (s_1 - s_2) + \dot{S}_{gerada,compressor}$$

$$\dot{S}_{gerada,compressor} = \dot{m}_{ar} (s_2 - s_1)$$

Exercício 04



Para gás perfeito:

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = s_{400}^0 - s_{300}^0 - 0,287 * \ln \frac{230}{96} = \\ &= 7,1593 - 6,8693 - 0,2508 = 0,0392 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned}$$

$$\dot{S}_{gerada,compressor} = \dot{m}_{ar} (s_2 - s_1) = 0,5 * 0,0392 = 0,0196 \text{ kW/K}$$



Exercício 04

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle definido pelo trocador:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dS_{vc}}{dt} = 0 \text{ (Regime permanente)} \\ \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ar} \\ \dot{m}_A = \dot{m}_B = \dot{m}_{\acute{a}gua} \\ \dot{Q}_{vc} = 0 \text{ (Processo adiabático)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = \dot{m}_{ar} (s_2 - s_3) + \dot{m}_{\acute{a}gua} (s_A - s_B) + \dot{S}_{gerada, trocador} \\ \dot{S}_{gerada, trocador} = \dot{m}_{ar} (s_3 - s_2) + \dot{m}_{\acute{a}gua} (s_B - s_A) \end{array}$$



Exercício 04

$$s_3 - s_2 = s_{350}^0 - s_{400}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = (7,0240 - 7,1593) - 0,287 * \ln \left(\frac{230}{230} \right)$$

$$s_3 - s_2 = -0,1353 \text{ kJ/kg.K}$$

$$s_B - s_A = s_{\text{líquido}, T=40^\circ\text{C}} - s_{\text{líquido}, T=25^\circ\text{C}} = 0,5724 - 0,3673 = 0,2051 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{gerada, trocador}} &= \dot{m}_{\text{ar}} (s_3 - s_2) + \dot{m}_{\text{água}} (s_B - s_A) = \\ &= 0,5 * (-0,1353) + 0,403 * (0,2051) = 0,0150 \text{ kW/K} \end{aligned}$$



Exercício 05

Ar entra em uma turbina de 3600 kW operando em regime permanente com uma vazão mássica de 18kg/s a 800°C, 0,3 MPa e velocidade de 100m/s. O ar se expande adiabaticamente na turbina e sai a uma velocidade de 150 m/s. O ar entra em um difusor onde é desacelerado isoentropicamente até uma velocidade de 10 m/s e uma pressão de 0,1 MPa. Assumindo que o ar se comporta como gás perfeito, determine:

- A pressão e a temperatura do ar na saída da turbina, em MPa e °C, respectivamente;
- A taxa de geração de entropia na turbina, em kW/K;
- Mostre o processo em um diagrama T-s.



Exercício 05

Hipóteses:

- Regime permanente
- Processo na turbina: adiabático
- Processo no difusor: isoentrópico

Dados:

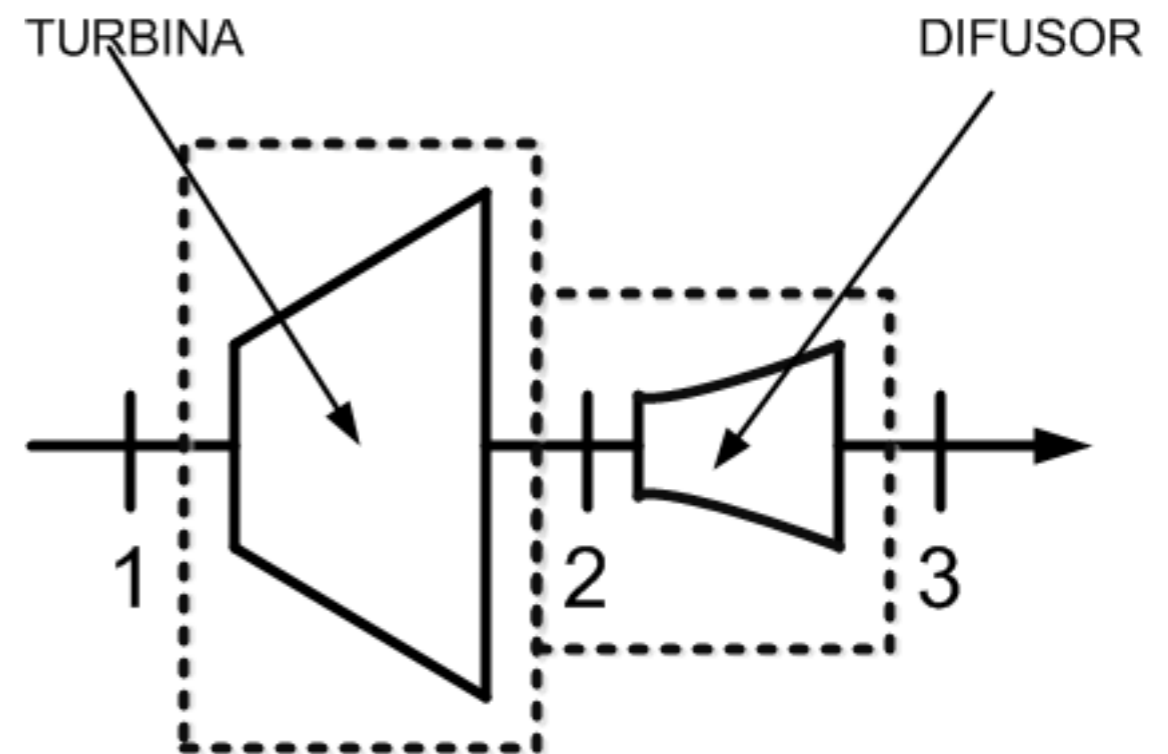
$$p_1 = 0,3\text{MPa} \quad V_2 = 150\text{m/s}$$

$$\dot{m}_1 = 18\text{kg/s} \quad V_3 = 10\text{m/s}$$

$$V_1 = 100\text{m/s} \quad p_3 = 0,1\text{MPa}$$

$$T_1 = 800^\circ\text{C} \quad \dot{W}_{turbina} = 3.600\text{kW}$$

Pede-se: $p_2; T_2; \dot{S}_{gerada,turbina}$





Exercício 05

Para gás perfeito define-se: $p_r = \frac{p}{P_{crítica}}$

Sendo: p = pressão no estado desejado; $P_{crítica}$ = pressão crítica do fluido

Além disso: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{P_{r2}(T_2)}{P_{r1}(T_1)}$

TABELA A.7

Propriedades termodinâmicas do ar (gás ideal; pressão de referência para a entropia é 0,1 MPa ou 1 bar)

T [K]	u kJ/kg	h kJ/kg	s_T^0 kJ/kg \times K	P_r	v_r
200	142,77	200,17	6,46260	0,2703	493,47
220	157,07	220,22	6,55812	0,3770	389,15
240	171,38	240,27	6,64535	0,5109	313,27
260	185,70	260,32	6,72562	0,6757	256,58
280	200,02	280,39	6,79998	0,8756	213,26
290	207,02	290,43	6,83521	0,9899	195,36
298,15	213,04	298,62	6,86305	1,0907	182,29
300	214,36	300,47	6,86926	1,1146	179,49



Exercício 05

Aplicando o balanço de massa para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\therefore \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ar}$$

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático})$$



Exercício 05

$$0 = \dot{m}_{ar} \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) - \dot{W}_{vc} \Rightarrow h_2 = h_1 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} - \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}_{ar}}$$

$$h_2 = 1130,02 + \frac{(100)^2 - (150)^2}{2} - \frac{3600}{18} = 923,77 \text{ kJ/kg}$$

Pela Tabela A.7: $h_2 = 923,77 \text{ kJ/kg} \rightarrow pr_2 = 72,4$; $T_2 = 891,59 \text{ K} = 618,59^\circ\text{C}$

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pelo difusor:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \text{ (Regime permanente)} \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \text{ (Processo adiabático)} \quad \dot{W}_{vc} = 0$$



Exercício 05

$$0 = \dot{m}_{ar} \left(h_3 - h_2 + \frac{V_3^2 - V_2^2}{2} \right) \Rightarrow h_3 = h_2 + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2}$$

$$h_3 = 923,77 + \frac{(150)^2 - (10)^2}{2} = 934,97 \text{ kJ/kg}$$

Pela Tabela A.7: $h_3 = 934,97 \text{ kJ/kg} \rightarrow p_{r3} = 75,9$

$$\text{Como: } \frac{p_2}{p_3} = \frac{p_{r2}}{p_{r3}} \Rightarrow p_2 = p_3 \frac{p_{r2}}{p_{r3}} = 0,1 * \frac{72,6}{75,9} = 0,096 \text{ MPa}$$



Exercício 05

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático})$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ar} \quad 0 = \dot{m}_{ar} (s_1 - s_2) + \dot{S}_{gerada,turbina} \Rightarrow \dot{S}_{gerada,turbina} = \dot{m}_{ar} (s_2 - s_1)$$

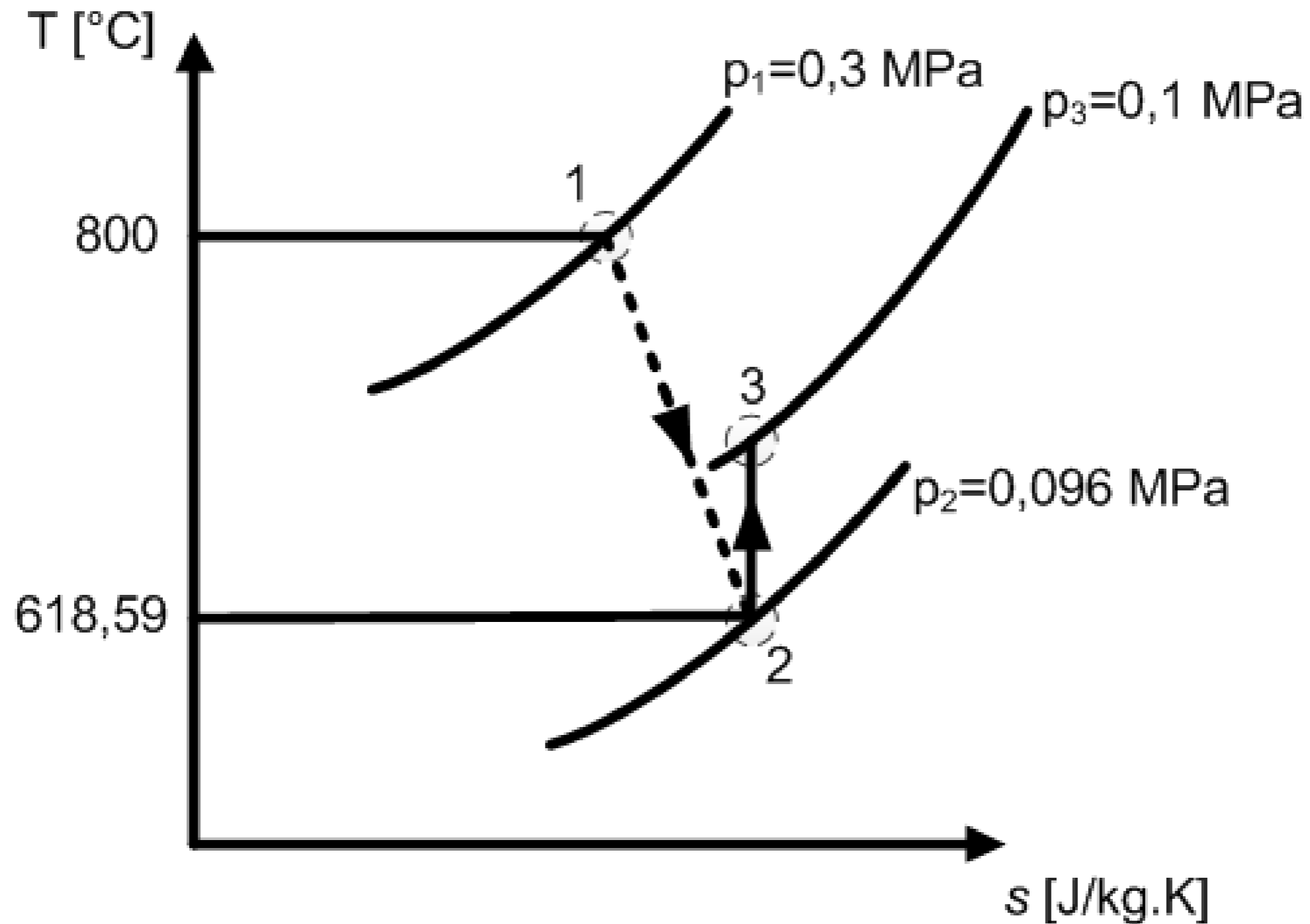
$$s_2 - s_1 = s_{891,59K}^0 - s_{1073K}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} =$$

$$= (8,0051 - 8,2155) - 0,287 * \ln \left(\frac{0,096}{0,30} \right)$$

$$s_2 - s_1 = 0,1166 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\dot{S}_{gerada,turbina} = \dot{m}_{ar} (s_2 - s_1) = 18 * 0,1166 = 2,10 \text{ kW/K}$$

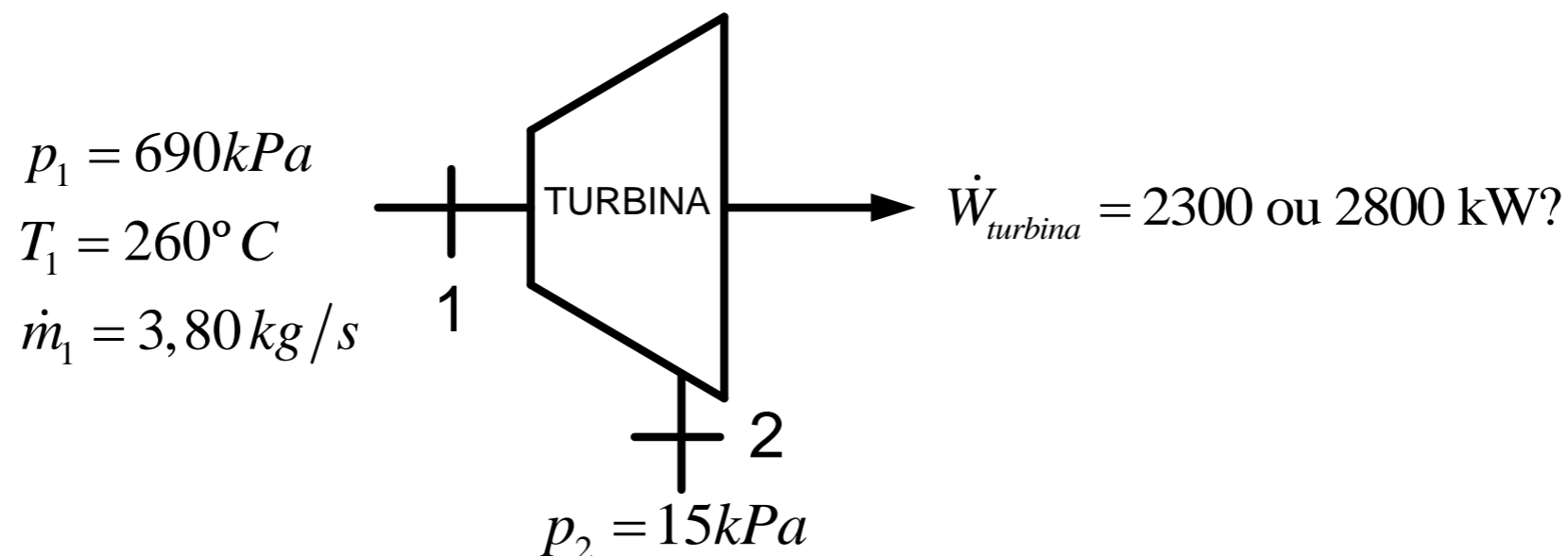
Exercício 05





Exercício 06

A figura abaixo estabelece valores de teste em regime permanente para uma turbina a vapor operando com transferência de calor desprezível para sua vizinhança e variações desprezíveis de energia cinética e potencial. Uma cópia mal feita da folha de dados indica que a potência é 2300 kW ou 2800 kW. Determine se algum ou ambos os valores de potência podem ser corretos.



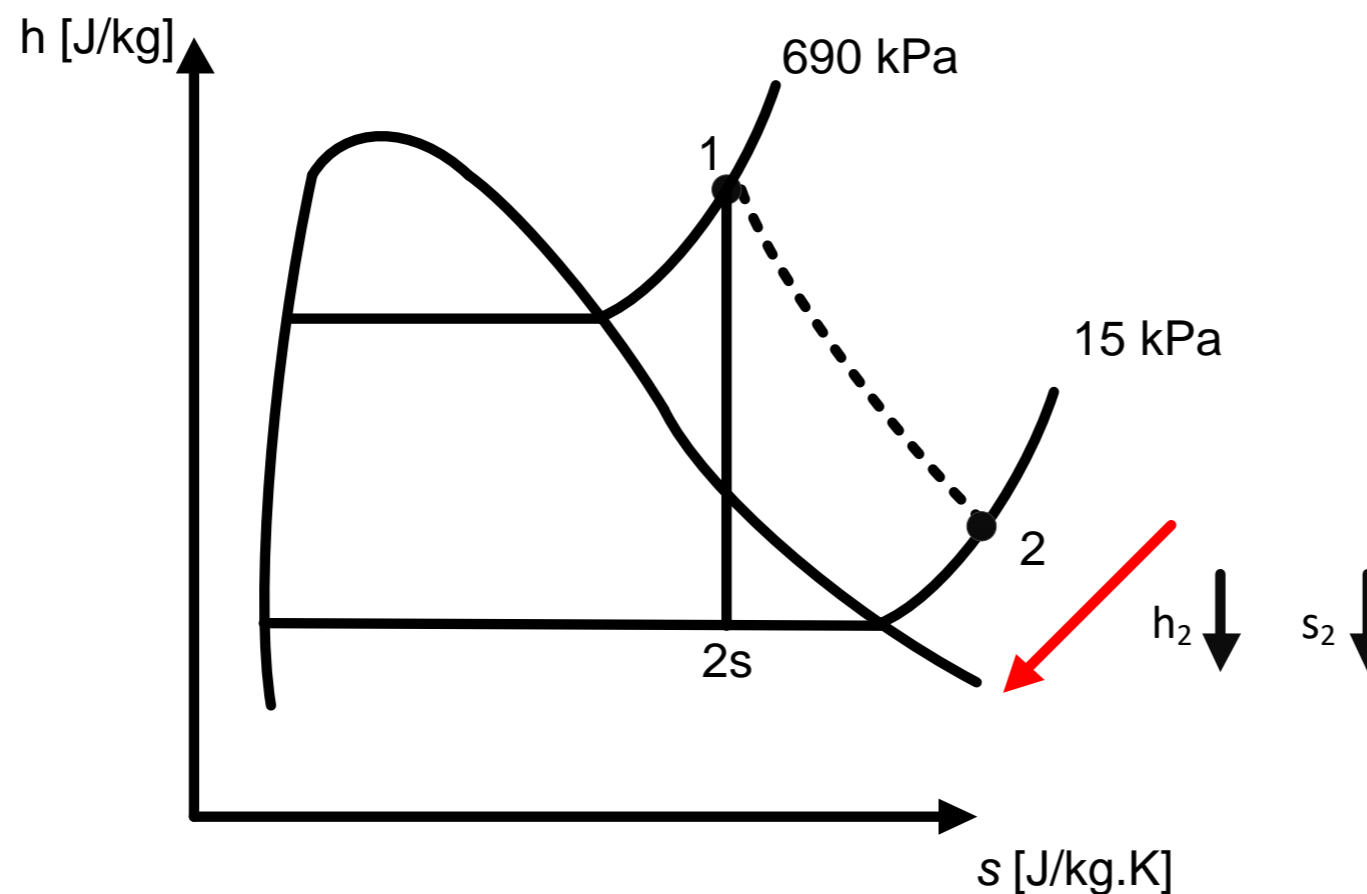


Exercício 06

Solução (1)

Hipóteses:

- Regime permanente
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial
- Processo adiabático





Exercício 06

Aplicando o balanço de massa para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente})$$

$$\therefore \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático})$$



Exercício 06

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{vc}}{T} + \dot{S}_{gerada}$$

$$\frac{dS_{vc}}{dt} = 0 \quad (\text{Regime permanente}) \quad \dot{Q}_{vc} = 0 \quad (\text{Processo adiabático})$$

$$\dot{S}_{gerada} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

$$\dot{W}_{vc, \text{máximo}} \Rightarrow h_{2, \text{mínimo}} \rightarrow s_{2, \text{mínimo}} \Rightarrow \dot{S}_{gerada} = 0 \Rightarrow s_2 = s_1 \quad (\text{Processo isoentrópico})$$



Exercício 06

Para o estado 1: $h_1=2967,01$ kJ/kg; $s_1=7,1411$ kJ/kg.K \rightarrow vapor superaquecido

Para o estado 2: $s_{2s}=s_1=7,1411$ kJ/kg.K ; $p_2=15$ kPa \rightarrow mistura líquido/vapor \rightarrow
 $s_{l,2s}=0,7548$ kJ/kg.K e $s_{v,2s}=8,0084$ kJ/kg.K
 $h_{l,2s}=225,91$ kJ/kg e $h_{v,2s}=2599,06$ kJ/kg

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s_{l,2s}}{s_{v,2s} - s_{l,2s}} = \frac{(7,1411 - 0,7548)}{(8,0084 - 0,7548)} = 0,88$$

Logo:

$$\begin{aligned} h_{2s} &= x_{2s} h_{v,2s} + (1 - x_{2s}) h_{l,2s} = \\ &= 0,88 * 2599,06 + (1 - 0,88) * 225,91 = 2314,28 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$



Portanto:

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) = 3,80 * (2967,01 - 2314,28) = 2480,4kW$$

Conclusão: o valor de 2800 kW não pode ser atingido e portanto o valor correto é 2300 kW

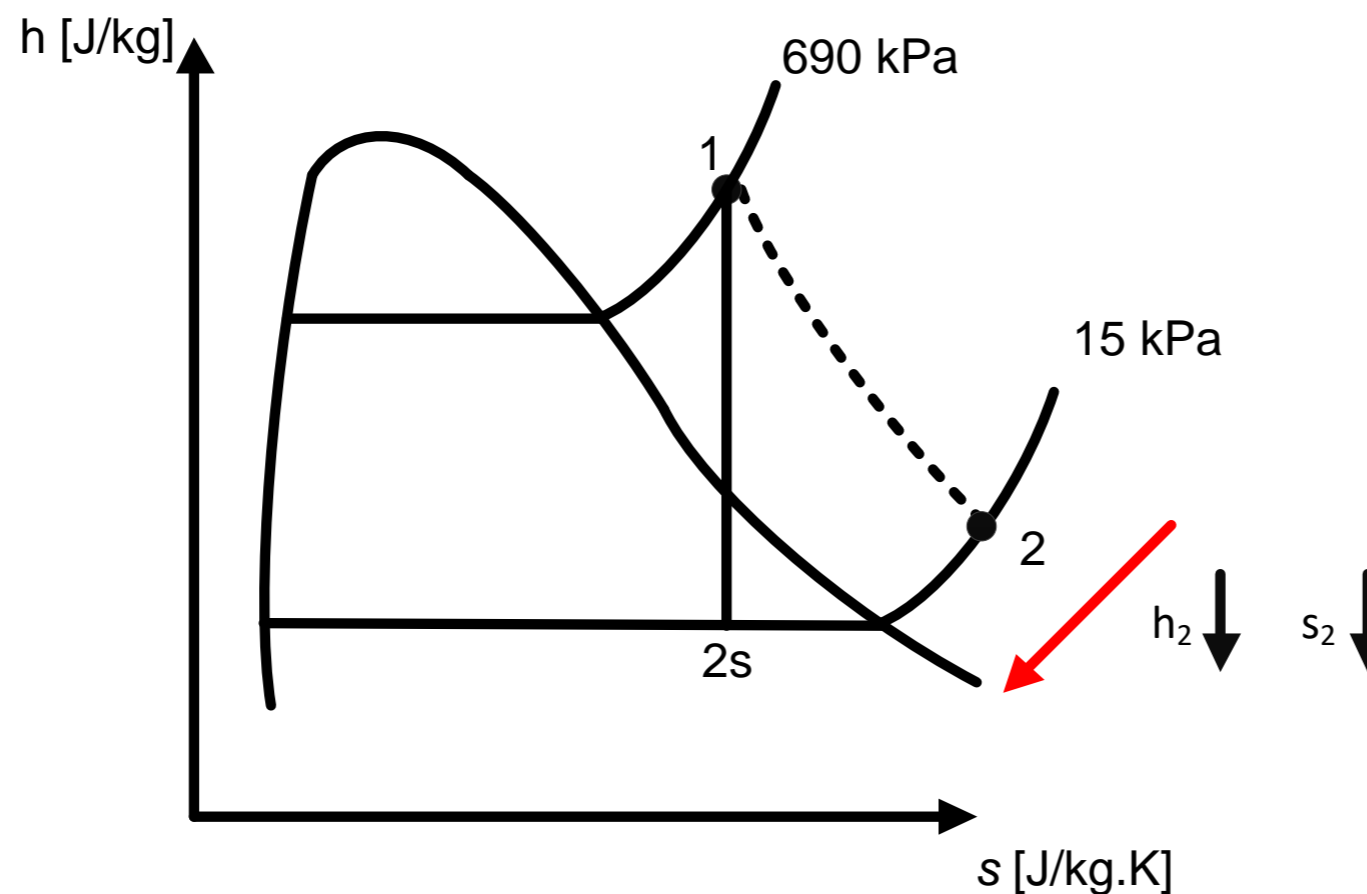


Exercício 06

Solução (2)

Hipóteses:

- Regime permanente
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial
- Processo adiabático





Exercício 06

Aplicando o balanço de massa para o volume de controle definido pela turbina:

$$\therefore \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle definido pela turbina:

$$\dot{S}_{gerada} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

Definindo que:

$$\dot{W}_{vc} = 2300kW \Rightarrow h_2 = h_1 - \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = 2967,01 - \frac{2300}{3,8} = 2361,75kJ / kg$$

Exercício 06



Para o estado 2: $h_2=2361,75$ kJ/kg ; $p_2=15$ kPa \rightarrow mistura líquido/vapor

$$s_{l,2s}=0,7548 \text{ kJ/kg.K} \text{ e } s_{v,2s}=8,0084 \text{ kJ/kg.K}$$

$$h_{l,2s}=225,91 \text{ kJ/kg} \text{ e } h_{v,2s}=2599,06 \text{ kJ/kg}$$

$$x_{2s} = \frac{h_2 - h_{l,2s}}{h_{v,2s} - h_{l,2s}} = \frac{(2361,75 - 225,91)}{(2599,06 - 225,91)} = 0,90$$

Logo:

$$\begin{aligned} s_2 &= x_2 s_{v,2} + (1 - x_2) s_{l,2} = \\ &= 0,90 * 8,0084 + (1 - 0,90) * 0,7548 = 7,2830 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned}$$



Exercício 06

Como:

$$\dot{S}_{gerada} = \dot{m}(s_2 - s_1) = 3,8 * (7,2830 - 7,1411) = 0,53922 \text{ kJ/kg.K} \geq 0$$

O valor de 2300 kW não viola a 2ª Lei da Termodinâmica → O processo é possível

Definindo que:

$$\dot{W}_{vc} = 2800 \text{ kW} \Rightarrow h_2 = h_1 - \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} = 2967,01 - \frac{2800}{3,8} = 2230,17 \text{ kJ / kg}$$

$$x_{2s} = \frac{h_2 - h_{1,2}}{h_{v,2} - h_{1,2}} = \frac{(2230,17 - 225,91)}{(2599,06 - 225,91)} = 0,85$$

Exercício 06



Logo:

$$\begin{aligned} s_2 &= x_2 s_{v,2} + (1 - x_2) h_{1,2} = \\ &= 0,85 * 8,0084 + (1 - 0,85) * 0,7548 = 6,9204 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned}$$

Como:

$$\dot{S}_{gerada} = \dot{m} (s_2 - s_1) = 3,8 * (6,9204 - 7,1411) = -0,8387 \text{ kJ/kg.K} \leq 0$$

O valor de 2800 kW viola a 2ª Lei da Termodinâmica → O processo não é possível