

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



PME 3344

Termodinâmica Aplicada

Aula de exercícios 01

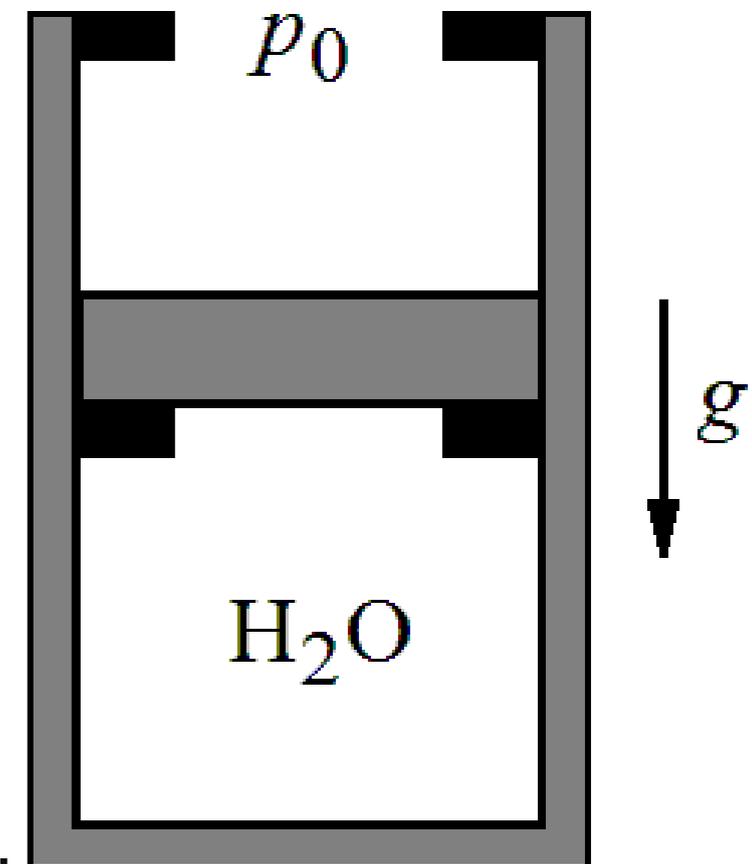


Exercício 01

Considere o conjunto mostrado na figura. O pistão pode mover-se sem atrito entre os dois conjuntos de batentes. Quando o pistão repousa sobre os batentes inferiores o volume interno é de $0,4 \text{ m}^3$, e quando encosta nos batentes superiores, o volume é de $0,6 \text{ m}^3$. A pressão ambiente exterior (p_0) e o peso do pistão são tais que uma pressão de 300 kPa é necessária para erguer o pistão. O cilindro contém água, inicialmente a 100 kPa e com título de 20% . O conjunto é aquecido até que a água atinja a condição de vapor saturado.

Pede-se para:

- determinar a massa de água no interior do conjunto;
- identificar se na condição final de vapor saturado o pistão deixará os batentes inferiores e, também, se atingirá os batentes superiores;
- determinar a pressão final no interior do cilindro;
- representar o processo em um diagrama p - v ;
- determinar o calor transferido e o trabalho realizado pela água.





Hipóteses:

- O sistema é a água no interior do cilindro
- Os estados inicial e final são estados de equilíbrio
- O processo é de quase-equilíbrio ou quase-estático
- Sistema estacionário (variação de energia cinética nula)
- A variação de energia potencial é desprezível



Exercício 01

Estado 1: $p_1 = 100 \text{ kPa}$; $x_1 = 0,2$

Analisando a tabela da água saturada temos:

Tabela B.1.2
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.
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,00	0,001049	1,27700	441,35	2060,21	2511,56	441,20	2241,05	2685,25	1,3720	5,9104	7,2812

$$\text{Como } x_1 = 0,2 \Rightarrow v_1 = x_1 v_{v1} + (1-x_1)v_{l1} = 0,3396 \text{ m}^3/\text{kg}$$
$$u_1 = x_1 u_{v1} + (1-x_1)u_{l1} = 835,08 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Tendo } v_1 \text{ e } V_1 \Rightarrow m = V_1/v_1$$

$$V_1 = 0,4 \text{ m}^3 \Rightarrow m_1 = 1,178 \text{ kg}$$



Exercício 01

Para verificar se o pistão deixa os batentes inferiores é preciso verificar se para $p_2 = 300$ kPa o volume específico do vapor saturado é maior, igual ou menor que v_1 . Voltando à tabela da água saturada agora com $p_2 = 300$ kPa temos:

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.
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918
325	136,30	0,001076	0,56201	572,88	1973,46	2546,34	573,23	2155,76	2728,99	1,7005	5,2646	6,9651
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174

Como $v_v = 0,60582$ m³/kg $>$ $v_1 \rightarrow$ condição de vapor saturado ainda não atingida

- Portanto:
- o pistão irá deixar os batentes inferiores
 - O processo a volume constante passa a ocorrer a pressão constante



Exercício 01

Estado 2: $p_2 = 300 \text{ kPa}$ e $v_2 = 0,3396 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$\rightarrow v_l = 0,001073 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ e } v_v = 0,60582 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rightarrow u_l = 561,13 \text{ kJ/kg} \text{ e } u_v = 2543,55 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Logo: } v_2 = x_2 v_{v2} + (1-x_2)v_{l2} \Rightarrow x_2 = (v_2 - v_{l2}) / (v_{v2} - v_{l2}) \Rightarrow x_2 = 0,56$$

$$u_2 = x_2 u_{v2} + (1-x_2)u_{l2} = 1671,28 \text{ kJ/kg}$$



Exercício 01

Para verificar se o pistão atinge os batentes superiores, deve-se avaliar se, para esse novo volume total V_3 e a pressão de 300 kPa, o volume específico do vapor saturado é maior, igual ou menor que $v_3 = V_3/m_3$.

Assim:

$$V_3 = 0,6 \text{ m}^3 \text{ e } m_3 = m_2 = m_1 = 1,178 \text{ kg}$$

$$\rightarrow v_3 = 0,6/1,178 = 0,5093 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Como $v_v = 0,60582 \text{ m}^3/\text{kg} > v_3 \Rightarrow$ **o pistão atinge os batentes superiores**



Exercício 01

Com o valor de v_3 podemos determinar o título e a energia interna no estado 3:

$$v_3 = x_3 v_{v3} + (1-x_3) v_{l3} \Rightarrow x_3 = (v_3 - v_{l3}) / (v_{v3} - v_{l3})$$

$$\rightarrow v_{l3} = 0,001073 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ e } v_{v3} = 0,60582 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\rightarrow u_{l3} = 561,13 \text{ kJ/kg} \text{ e } u_{v3} = 2543,55 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow x_3 = 0,84$$

$$u_3 = x_3 u_{v3} + (1-x_3) u_{l3} \Rightarrow u_3 = 2226,36 \text{ kJ/kg}$$



Exercício 01

A partir dos resultados anteriores, para o estado 4 temos que:

$$v_4 = v_3 = 0,5093 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_4 = 1 \text{ (vapor saturado)}$$

Voltando à tabela da água saturada:

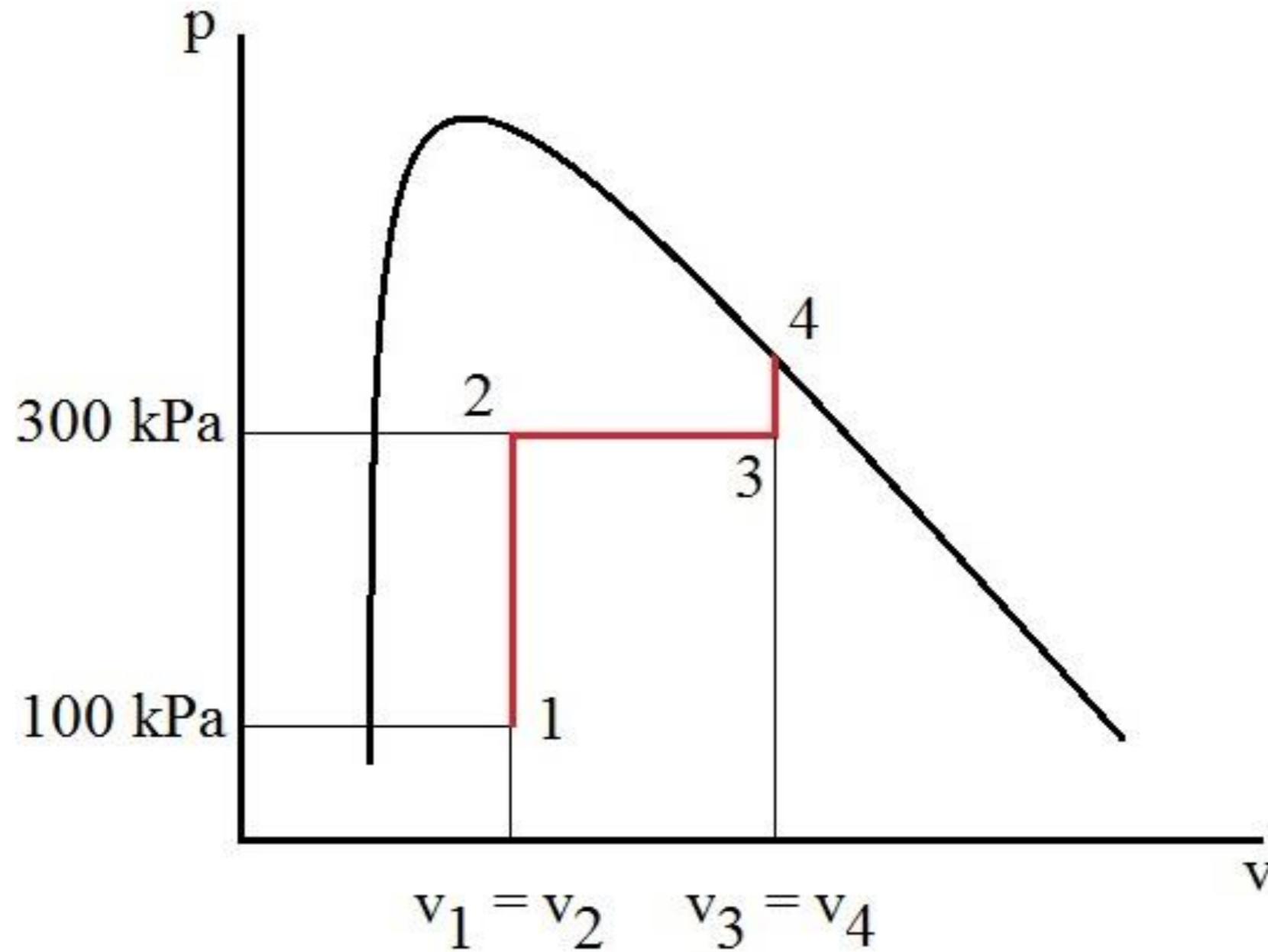
Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,41398	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565
500	151,86	0,001093	0,37489	639,66	1921,57	2561,23	640,21	2108,47	2748,67	1,8606	4,9606	6,8212

Interpolando entre as pressões de 350 e 375kPa obtemos:

$$p_4 = 361,4 \text{ kPa}$$

$$u_4 = 2550,0 \text{ kJ/kg}$$

Exercício 01

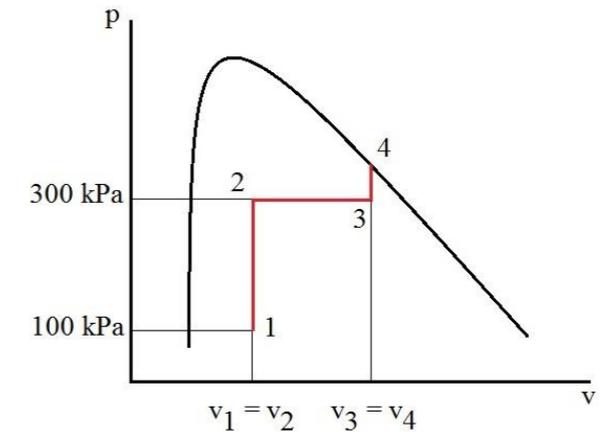




Exercício 01

Para os processos 1 a 4:

$$W_{1-4} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4}$$



Porém os processos 1-2 e 3-4 ocorrem a volume constante, logo:

$$W_{1-2} = W_{3-4} = 0 \quad \therefore \quad W_{1-4} = W_{2-3}$$

Como o processo 2-3 ocorre a pressão constante $p_2 = 300$ kPa:

$$W_{2-3} = \int_2^3 p dV = p_2 (V_3 - V_2) = 300 \times 10^3 \cdot (0,6 - 0,4) = 60 \text{ kJ}$$



Exercício 01

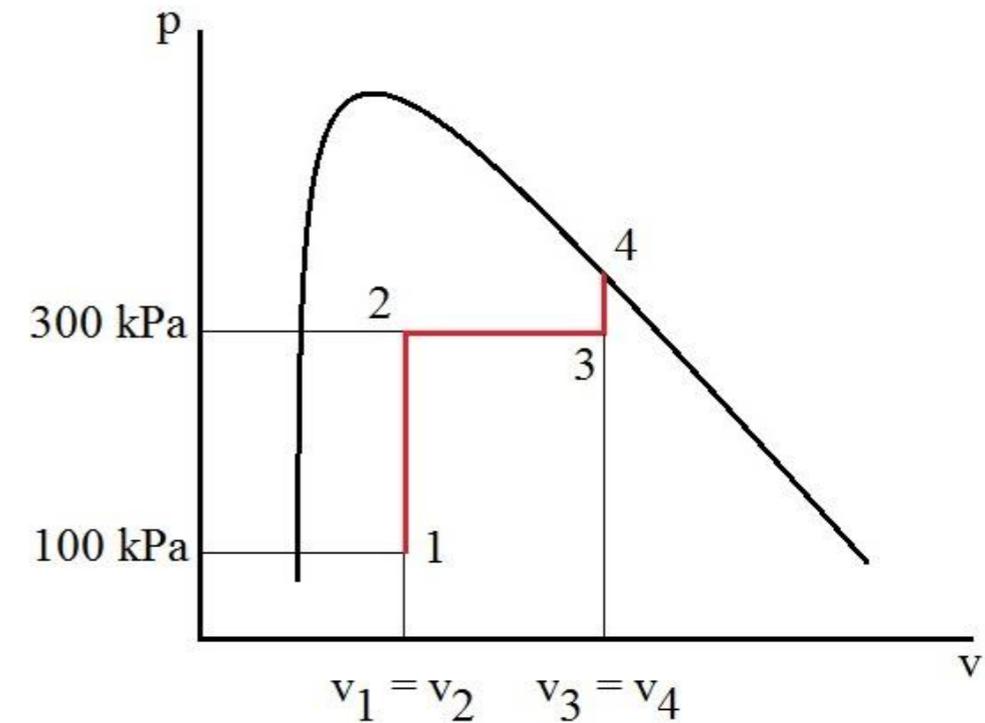
Aplicando a 1ª Lei entre os pontos 1 e 4:

$$U_4 - U_1 = Q_{1-4} - W_{1-4}$$

$$U_4 - U_1 = m(u_4 - u_1) = Q_{1-4} - W_{1-4}$$

$$Q_{1-4} = m(u_4 - u_1) + W_{1-4}$$

$$Q_{1-4} = 1,178 \cdot (2550,0 - 835,08) + 60 = 2080,18 \text{ kJ}$$





Exercício 02

Um sistema contém inicialmente 5 kg de ar a $p_1 = 10$ bar e $T_1 = 800$ K. O sistema é submetido a um ciclo motor composto pelos seguintes processos:

- Processo 1-2: expansão isotérmica até $V_2 = 2,5 \cdot V_1$;
- Processo 2-3: compressão a pressão constante;
- Processo 3-1: aquecimento a volume constante.

Admitindo modelo de gás ideal, calores específicos constantes e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial:

- (a) esboce o ciclo em um diagrama p-V,
- (b) calcule o trabalho realizado pelo sistema em cada processo,
- (c) calcule o calor trocado em cada processo;
- (d) determine o rendimento térmico do ciclo.

Se a expansão 1-2 obedecesse a relação $pV^{1,3} = \text{constante}$, o rendimento do ciclo seria maior ou menor? Explique utilizando o diagrama p-V.

Dados para o ar: $R = 0,287$ kJ/kg.K, $C_p = 1,004$ kJ/kg.K, $C_v = 0,717$ kJ/kg.K.



Exercício 02

Analisando o ciclo temos para o estado 1:

$$p_1 = 10 \text{ bar} = 1000 \text{ kPa}$$

$$T_1 = 800 \text{ K}$$

Assumindo o comportamento de gás perfeito:

$$p_1 v_1 = R_{ar} T_1 \Rightarrow v_1 = \frac{R_{ar} T}{p_1} = \frac{287 \cdot 800}{1000 \times 10^3} = 0,230 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_1 = \frac{V_1}{m_1} \Rightarrow V_1 = m_1 v_1 = 5 \cdot 0,230 = 1,15 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 2,5 \cdot V_1 = 2,5 \cdot 1,15 = 2,88 \text{ m}^3$$



Exercício 02

Para o estado 2, como $V_2 = 2,88 \text{ m}^3$ e o processo 1-2 é isotérmico ($T_1 = T_2 = 800 \text{ K}$):

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Logo:

$$1000 \times 10^3 \cdot 1,15 = p_2 \times 2,88$$

$$p_2 = \frac{(1000 \times 10^3 \cdot 1,15)}{2,88} = 399 \text{ kPa}$$

$$v_2 = V_2 / m_2 = \frac{2,88}{5} = 0,576 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

Exercício 02



Para o estado 3:

- $p_3 = p_2 = 399$ kPa (processo isobárico)
- considerando gás perfeito

$$p_2 V_2 = m_2 R_{ar} T_2 \rightarrow p_2 \frac{V_2}{m_2} = R_{ar} T_2 \rightarrow p_2 v_2 = R_{ar} T_2$$

$$p_2 v_2 = R_{ar} T_2 \quad \longrightarrow \quad \frac{T_2}{v_2} = \frac{R_{ar}}{p_2} = \textit{constante}$$

$$\frac{T_2}{v_2} = \frac{T_3}{v_3}$$



Como o processo 3-1 é um processo a volume constante:

$$\frac{T_2}{v_2} = \frac{T_3}{v_3} \Rightarrow \frac{T_2}{v_2} = \frac{T_3}{v_1}$$

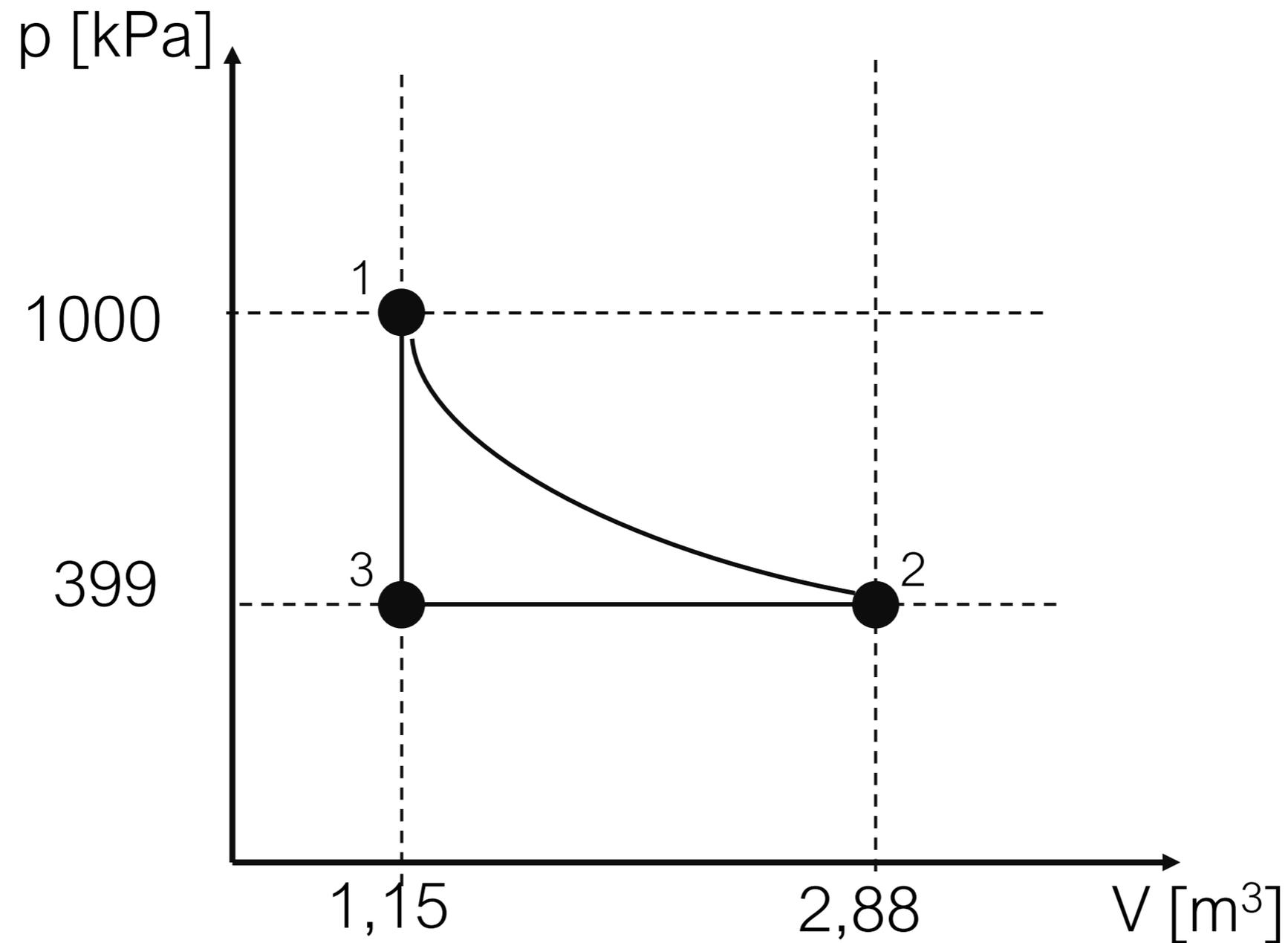
$$\rightarrow \frac{800}{0,576} = \frac{T_3}{0,230}$$

$$\rightarrow T_3 = 319K$$

Exercício 02



Ciclo em um diagrama p-V:





Exercício 02

Aplicando a 1ª Lei para a massa de ar para o processo 1-2:

$$U_2 - U_1 = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

Assumindo que o ar tem comportamento de gás perfeito e que o calor específico a volume constante é constante:

$$m_{ar}(u_2 - u_1) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

$$m_{ar}c_v(T_2 - T_1) = Q_{1-2} - W_{1-2}$$

Como o processo é isotérmico:

$$0 = Q_{1-2} - W_{1-2} \quad \longrightarrow \quad Q_{1-2} = W_{1-2}$$



Calculando o trabalho e o calor:

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dV$$

$$W_{1-2} = R_{ar} T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = 287 \cdot 800 \cdot \ln \left(\frac{2,88}{1,15} \right) = 211 \text{ kJ}$$

$$\therefore Q_{1-2} = 211 \text{ kJ}$$



Exercício 02

Aplicando a 1ª Lei para a massa de ar para o processo 2-3:

$$U_3 - U_2 = Q_{2-3} - W_{2-3}$$

Assumindo que o ar tem comportamento de gás perfeito e calor específico a volume constante é constante:

$$m_{ar}(u_3 - u_2) = Q_{2-3} - W_{2-3}$$

$$m_{ar}C_v(T_3 - T_2) = Q_{2-3} - W_{2-3}$$

Exercício 02



Calculando o trabalho e substituindo os valores:

$$W_{2-3} = \int_2^3 p dV = p_2(V_3 - V_2) = 399 \times 10^3 (1,15 - 2,88)$$

$$W_{2-3} = -690 \text{ kJ}$$

$$Q_{2-3} = m_{ar} C_v (T_3 - T_2) + W_{2-3}$$

$$Q_{2-3} = 5 \cdot 0,717 \cdot (319 - 800) - 690 = -2414 \text{ kJ}$$



Exercício 02

Aplicando a 1ª Lei para a massa de ar para o processo 3-1:

$$U_1 - U_3 = Q_{3-1} - W_{3-1}$$

Assumindo que o ar tem comportamento de gás perfeito e calor específico a volume constante é constante:

$$m_{ar}(u_1 - u_3) = Q_{3-1} - W_{3-1}$$

$$m_{ar}C_v(T_1 - T_3) = Q_{3-1} - W_{3-1}$$



Exercício 02

Como o processo 3-1 é isocórico:

$$W_{3-1} = \int_1^3 p dv = 0 \quad (V_1 = V_3 = \text{constante})$$

$$\therefore Q_{3-1} = m_{ar} C_v (T_1 - T_3) = 5 \cdot 0,717 \cdot (800 - 319)$$

$$Q_{3-1} = 1724 \text{ kJ}$$

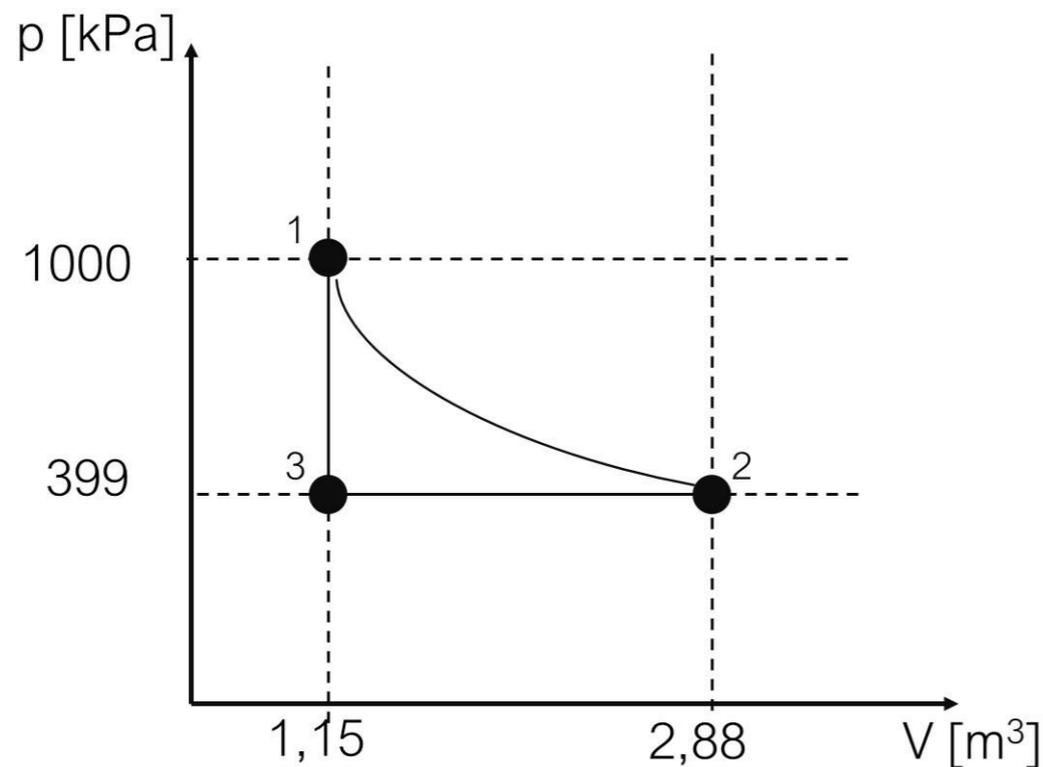


Exercício 02

Por fim, o rendimento do ciclo pode ser calculado como:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{útil}}{Q_{fornecido}}$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{1-2}}{Q_{3-1}} = \frac{211}{1724 + 211} = 0,109 \text{ (10,9\%)}$$



$$W_{1-2} = 211 \text{ kJ}$$

$$Q_{1-2} = 211 \text{ kJ}$$

$$W_{2-3} = -690 \text{ kJ}$$

$$Q_{2-3} = -2414 \text{ kJ}$$

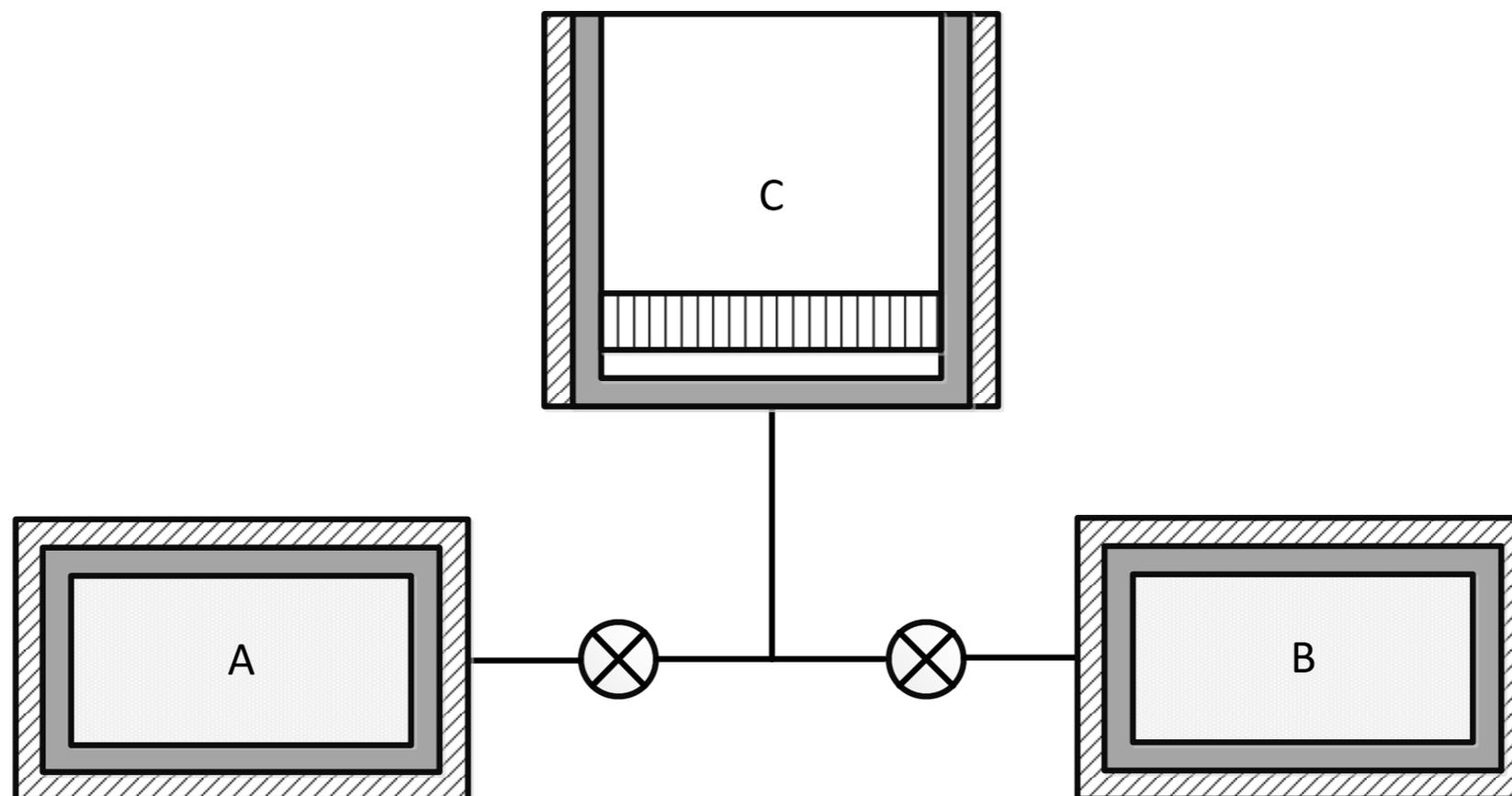
$$W_{3-1} = 0$$

$$Q_{3-1} = 1724 \text{ kJ}$$



Exercício 03

Os dois tanques da figura abaixo contém vapor d'água e estão conectados a um conjunto cilindro-pistão. A pressão atmosférica e a massa do pistão são tais que a pressão na câmara tem que ser igual a 1,4 MPa para que o pistão se mova. Inicialmente, o volume da câmara é nulo, o tanque A contém 4 kg de vapor a 8 MPa e 700°C e o tanque B contém 2 kg de vapor a 3 MPa e 350°C. As válvulas são abertas e espera-se que a água atinja um estado de equilíbrio no qual a temperatura é 400°C. Admitindo que a transferência de calor seja nula, determine o trabalho e a entropia gerada no processo.





Exercício 03

Sistema: Tanques A, B e C

Hipóteses: variações desprezíveis de energia cinética e potencial

Dados:

$$m_A = 4\text{kg}; p_{A,1} = 8\text{MPa}; T_{A,1} = 700^\circ\text{C}$$

$$m_B = 2\text{kg}; p_{A,1} = 3\text{MPa}; T_{B,1} = 350^\circ\text{C}$$

$$V_{C,1} = 0\text{m}^3; p_2 = p_{A,2} = p_{B,2} = p_{C,2} = 1,4\text{MPa}$$

$$T_2 = T_{A,2} = T_{B,2} = T_{C,2} = 400^\circ\text{C}; Q_{1-2} = 0$$

Pede-se:

$$W_{1-2} \text{ e } \Delta S_{1-2}$$



Exercício 03

Aplicando o balanço de massa no sistema:

$$m_1 = m_2 \Rightarrow m_{A,1} + m_{B,1} = m_2 \Rightarrow m_2 = 4 + 2 = 6\text{kg}$$

Aplicando a 1ª Lei para o sistema definido temos:

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

$$m_2 u_2 - (m_{A,1} u_{A,1} + m_{B,1} u_{B,1}) = -W_{1-2}$$

$$W_{1-2} = (m_{A,1} u_{A,1} + m_{B,1} u_{B,1}) - m_2 u_2$$



Exercício 03

Para o estado 1 em A:

$$p_{A,1} = 8\text{MPa}; T_{A,1} = 700^\circ\text{C} \longrightarrow \text{Vapor superaquecido}$$

Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
	$P = 5000 \text{ kPa} (263,99)$				$P = 6000 \text{ kPa} (275,64)$				$P = 8000 \text{ kPa} (295,06)$			
Sat.	0,03944	2597,12	2794,33	5,9733	0,03244	2589,69	2784,33	5,8891	0,02352	2569,79	2757,94	5,7431
300	0,04532	2697,94	2924,53	6,2083	0,03616	2667,22	2884,19	6,0673	0,02426	2590,93	2784,98	5,7905
350	0,05194	2808,67	3068,39	6,4492	0,04223	2789,61	3042,97	6,3334	0,02995	2747,67	2987,30	6,1300
400	0,05781	2906,58	3195,64	6,6458	0,04739	2892,81	3177,17	6,5407	0,03432	2863,75	3138,28	6,3633
450	0,06330	2999,64	3316,15	6,8185	0,05214	2988,90	3301,76	6,7192	0,03817	2966,66	3271,99	6,5550
500	0,06857	3090,92	3433,76	6,9758	0,05665	3082,20	3422,12	6,8802	0,04175	3064,30	3398,27	6,7239
550	0,07368	3181,82	3550,23	7,1217	0,06101	3174,57	3540,62	7,0287	0,04516	3159,76	3521,01	6,8778
600	0,07869	3273,01	3666,47	7,2588	0,06525	3266,89	3658,40	7,1676	0,04845	3254,43	3642,03	7,0205
700	0,08849	3457,67	3900,13	7,5122	0,07352	3453,15	3894,28	7,4234	0,05481	3444,00	3882,47	7,2812
800	0,09811	3646,62	4137,17	7,7440	0,08160	3643,12	4132,74	7,6566	0,06097	3636,08	4123,84	7,5173
900	0,10762	3840,71	4378,82	7,9593	0,08958	3837,84	4375,29	7,8727	0,06702	3832,08	4368,26	7,7350
1000	0,11707	4040,35	4625,69	8,1612	0,09749	4037,83	4622,74	8,0751	0,07301	4032,81	4616,87	7,9384
1100	0,12648	4245,61	4878,02	8,3519	0,10536	4243,26	4875,42	8,2661	0,07896	4238,60	4870,25	8,1299
1200	0,13587	4456,30	5135,67	8,5330	0,11321	4454,00	5133,28	8,4473	0,08489	4449,45	5128,54	8,3115
1300	0,14526	4671,96	5398,24	8,7055	0,12106	4669,64	5395,97	8,6199	0,09080	4665,02	5391,46	8,4842

$$u_{A,1} = 3444,0 \text{ kJ/kg}; s_{A,1} = 7,2812 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 03

Para o estado 1 em B:

$$p_{B,1} = 3\text{MPa}; T_{B,1} = 350^\circ\text{C} \longrightarrow \text{Vapor superaquecido}$$

Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	$P = 2500 \text{ kPa (223,99)}$				$P = 3000 \text{ kPa (233,90)}$				$P = 4000 \text{ kPa (250,40)}$			
	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
Sat.	0,07998	2603,13	2803,07	6,2574	0,06668	2604,10	2804,14	6,1869	0,04978	2602,27	2801,38	6,0700
250	0,08700	2662,55	2880,06	6,4084	0,07058	2644,00	2855,75	6,2871	-	-	-	-
300	0,09890	2761,56	3008,81	6,6437	0,08114	2750,05	2993,48	6,5389	0,05884	2725,33	2960,68	6,3614
350	0,10976	2851,84	3126,24	6,8402	0,09053	2843,66	3115,25	6,7427	0,06645	2826,65	3092,43	6,5820
400	0,12010	2939,03	3239,28	7,0147	0,09936	2932,75	3230,82	6,9211	0,07341	2919,88	3213,51	6,7689
450	0,13014	3025,43	3350,77	7,1745	0,10787	3020,38	3344,00	7,0833	0,08003	3010,13	3330,23	6,9362
500	0,13998	3112,08	3462,04	7,3233	0,11619	3107,92	3456,48	7,2337	0,08643	3099,49	3445,21	7,0900
600	0,15930	3287,99	3686,25	7,5960	0,13243	3285,03	3682,34	7,5084	0,09885	3279,06	3674,44	7,3688
700	0,17832	3468,80	3914,59	7,8435	0,14838	3466,59	3911,72	7,7571	0,11095	3462,15	3905,94	7,6198
800	0,19716	3655,30	4148,20	8,0720	0,16414	3653,58	4146,00	7,9862	0,12287	3650,11	4141,59	7,8502
900	0,21590	3847,89	4387,64	8,2853	0,17980	3846,46	4385,87	8,1999	0,13469	3843,59	4382,34	8,0647
1000	0,23458	4046,67	4633,12	8,4860	0,19541	4045,40	4631,63	8,4009	0,14645	4042,87	4628,65	8,2661
1100	0,25322	4251,52	4884,57	8,6761	0,21098	4250,33	4883,26	8,5911	0,15817	4247,96	4880,63	8,4566
1200	0,27185	4462,08	5141,70	8,8569	0,22652	4460,92	5140,49	8,7719	0,16987	4458,60	5138,07	8,6376
1300	0,29046	4677,80	5403,95	9,0291	0,24206	4676,63	5402,81	8,9442	0,18156	4674,29	5400,52	8,8099

$$u_{B,1} = 2843,66 \text{ kJ/kg}; s_{B,1} = 6,7427 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 03

Para o estado 2 em A, B e C:

$$p_2 = 1,4\text{MPa}; T_2 = 400^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \quad \text{Vapor superaquecido}$$

Tabela B.1.3 (continuação)
Vapor d'água superaquecido

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m ³ /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
	$P = 1000 \text{ kPa (179,91)}$				$P = 1200 \text{ kPa (187,99)}$				$P = 1400 \text{ kPa (195,07)}$			
Sat.	0,19444	2583,64	2778,08	6,5864	0,16333	2588,82	2784,82	6,5233	0,14084	2592,83	2790,00	6,4692
200	0,20596	2621,90	2827,86	6,6939	0,16930	2612,74	2815,90	6,5898	0,14302	2603,09	2803,32	6,4975
250	0,23268	2709,91	2942,59	6,9246	0,19235	2704,20	2935,01	6,8293	0,16350	2698,32	2927,22	6,7467
300	0,25794	2793,21	3051,15	7,1228	0,21382	2789,22	3045,80	7,0316	0,18228	2785,16	3040,35	6,9533
350	0,28247	2875,18	3157,65	7,3010	0,23452	2872,16	3153,59	7,2120	0,20026	2869,12	3149,49	7,1359
400	0,30659	2957,29	3263,88	7,4650	0,25480	2954,90	3260,66	7,3773	0,21780	2952,50	3257,42	7,3025
500	0,35411	3124,34	3478,44	7,7621	0,29463	3122,72	3476,28	7,6758	0,25215	3121,10	3474,11	7,6026
600	0,40109	3296,76	3697,85	8,0289	0,33393	3295,60	3696,32	7,9434	0,28596	3294,44	3694,78	7,8710
700	0,44779	3475,35	3923,14	8,2731	0,37294	3474,48	3922,01	8,1881	0,31947	3473,61	3920,87	8,1160
800	0,49432	3660,46	4154,78	8,4996	0,41177	3659,77	4153,90	8,4149	0,3528	3659,09	4153,03	8,3431
900	0,54075	3852,19	4392,94	8,7118	0,45051	3851,62	4392,23	8,6272	0,38606	3851,05	4391,53	8,5555
1000	0,58712	4050,49	4637,60	8,9119	0,48919	4049,98	4637,00	8,8274	0,41924	4049,47	4636,41	8,7558
1100	0,63345	4255,09	4888,55	9,1016	0,52783	4254,61	4888,02	9,0171	0,45239	4254,14	4887,49	8,9456
1200	0,67977	4465,58	5145,36	9,2821	0,56646	4465,12	5144,87	9,1977	0,48552	4464,65	5144,38	9,1262
1300	0,72608	4681,33	5407,41	9,4542	0,60507	4680,86	5406,95	9,3698	0,51864	4680,39	5406,49	9,2983

$$u_2 = 2952,50 \text{ kJ/kg}; s_2 = 7,3025 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 03

Aplicando a 1ª. Lei ao sistema definido temos:

$$m_2 u_2 - (m_{A,1} u_{A,1} + m_{B,1} u_{B,1}) = \cancel{Q_{1-2}} - W_{1-2} \quad (\text{processo adiabático})$$

$$W_{1-2} = (m_{A,1} u_{A,1} + m_{B,1} u_{B,1}) - m_2 u_2$$

$$W_{1-2} = (4 \cdot 3444,0 + 2 \cdot 2843,66) - 6 \cdot 2952,50$$

$$W_{1-2} = 1747,32 \text{ kJ}$$

Exercício 03



Aplicando a 2ª Lei para o sistema definido temos:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gerada} \quad (\text{processo adiabático})$$

$$S_{gerada} = \Delta S = m_2 s_2 - (m_{A,1} s_{A,1} + m_{B,1} s_{B,1})$$

Portanto:

$$S_{gerada} = 6 * 7,3025 - (4 * 7,2812 + 2 * 6,7427)$$

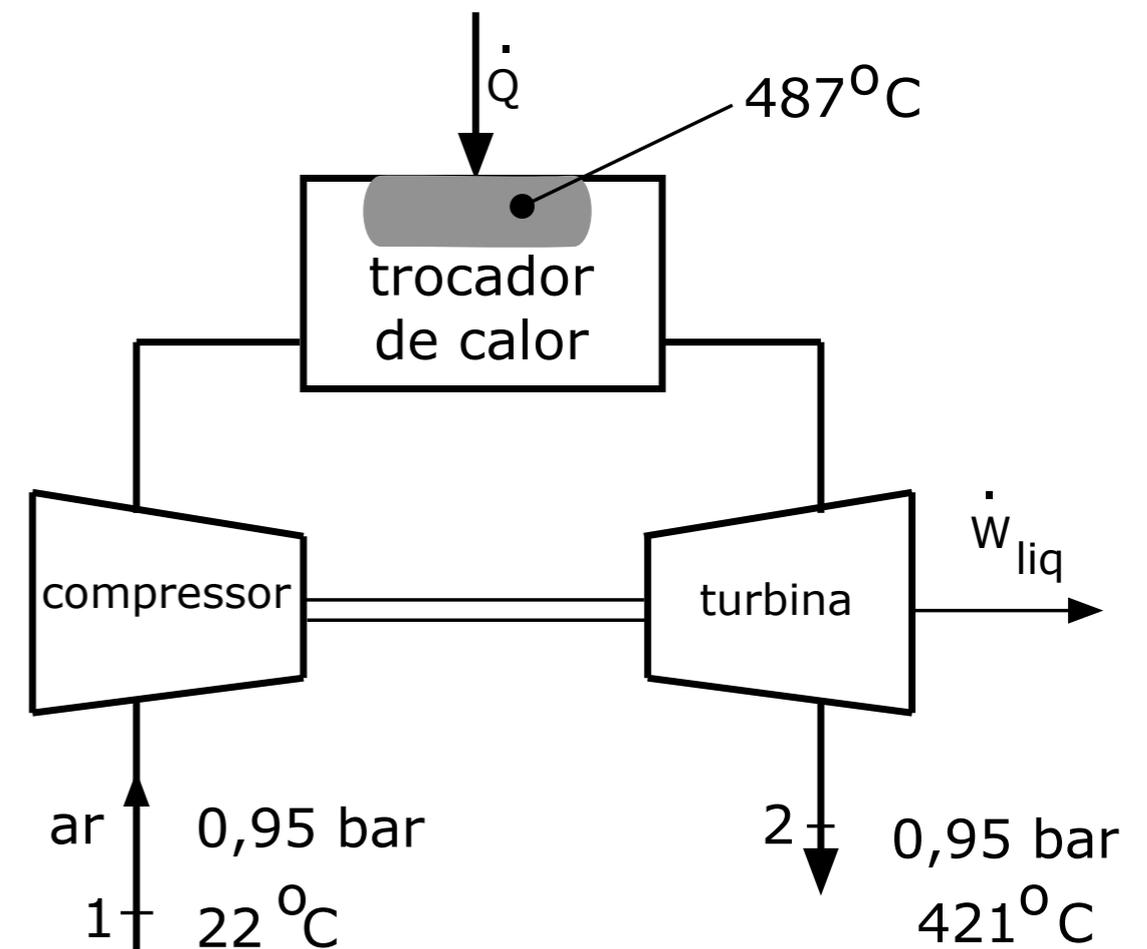
$$S_{gerada} = 1,21 \text{ kJ/kg.K}$$



Exercício 04

Na figura abaixo é mostrada uma usina térmica operando em regime permanente. O conjunto é formado por um compressor, um trocador de calor e uma turbina. O ar entra no compressor com vazão mássica de $3,9 \text{ kg/s}$ a $0,95 \text{ bar}$ e 22°C , e deixa a turbina a $0,95 \text{ bar}$ e 421°C . A transferência de calor para o ar que flui através do trocador de calor ocorre a uma temperatura média de 487°C . O compressor e a turbina operam de forma adiabática. Determine o valor teórico máximo para a potência útil que pode ser desenvolvido pela usina. Considere calores específicos constantes.

Dados (ar): $R = 0,287 \text{ kJ/kg.K}$;
 $C_p = 1,03 \text{ kJ/kg.K}$;
 $C_v = 0,743 \text{ kJ/kg.K}$;
 $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$.





Exercício 04

Hipóteses:

- Regime permanente
- Processos adiabáticos no compressor, turbina e tubulação
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial
- Ar com comportamento de gás perfeito
- Calores específicos constantes avaliados na temperatura média

Volume de controle:

- tubulação, compressor, trocador de calor e turbina

Conservação da massa:

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



Exercício 04

Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle:

$$\dot{W}_{líquido} = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q} \quad (1)$$

Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle:

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

$$\dot{Q} = \dot{m}T(s_2 - s_1) - T\dot{S}_{gerada} \quad (2)$$



Combinando as expressões (1) e (2) temos:

$$\dot{W}_{líquido} = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{m}T(s_2 - s_1) - T\dot{S}_{gerada}$$

Para que a potência seja máxima a taxa de geração de entropia deve ser nula. Logo:

$$\dot{W}_{líquido} = \dot{m}[(h_1 - h_2) + T(s_2 - s_1)]$$

Exercício 04



Como o ar é considerado gás perfeito temos:

$$\dot{W}_{líquido} = \dot{m} \left[C_p (T_1 - T_2) + T C_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]$$

Substituindo os dados fornecidos temos:

$$\dot{W}_{líquido} = 3,9 \cdot \left[1,03 \cdot (295 - 694) + 760 \cdot 0,743 \ln \left(\frac{694}{295} \right) \right]$$

$$\dot{W}_{líquido} = 1009 \text{ kW}$$