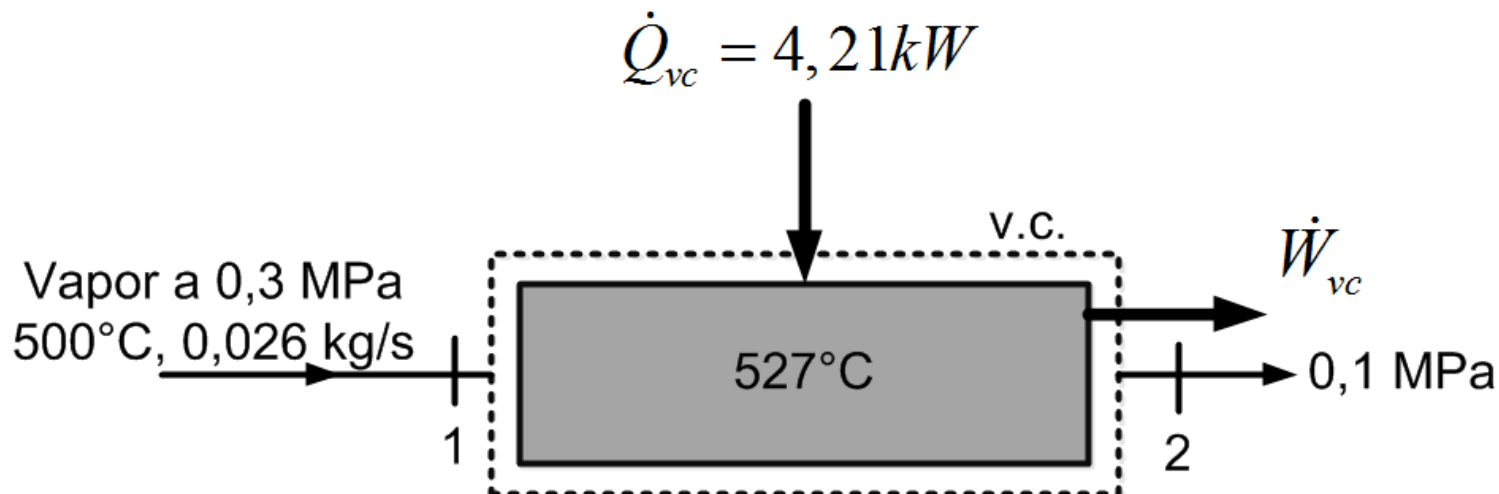


Exercício #1

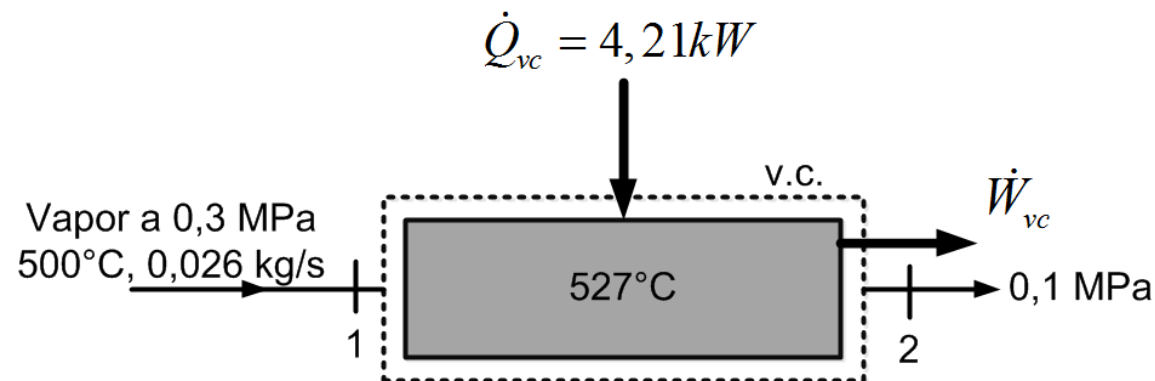


A figura abaixo mostra uma proposta de um equipamento para produzir potência utilizando energia sob a forma de calor proveniente de um processo industrial a alta temperatura em conjunto com uma entrada de vapor. A figura fornece dados para a operação em regime permanente. Todas as superfícies são bem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





Balanço de massa:
$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \therefore \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$

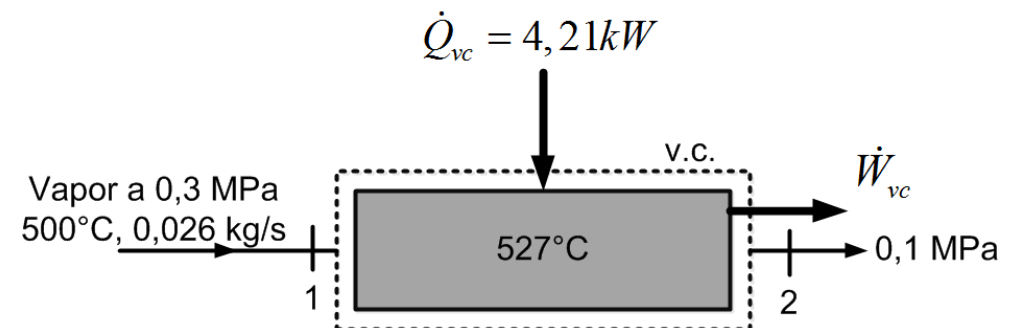




Aplicando a 1ª Lei para o volume de controle:

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

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q}_{vc} \quad \dot{W}_{vc} \uparrow \quad h_2 \downarrow$$



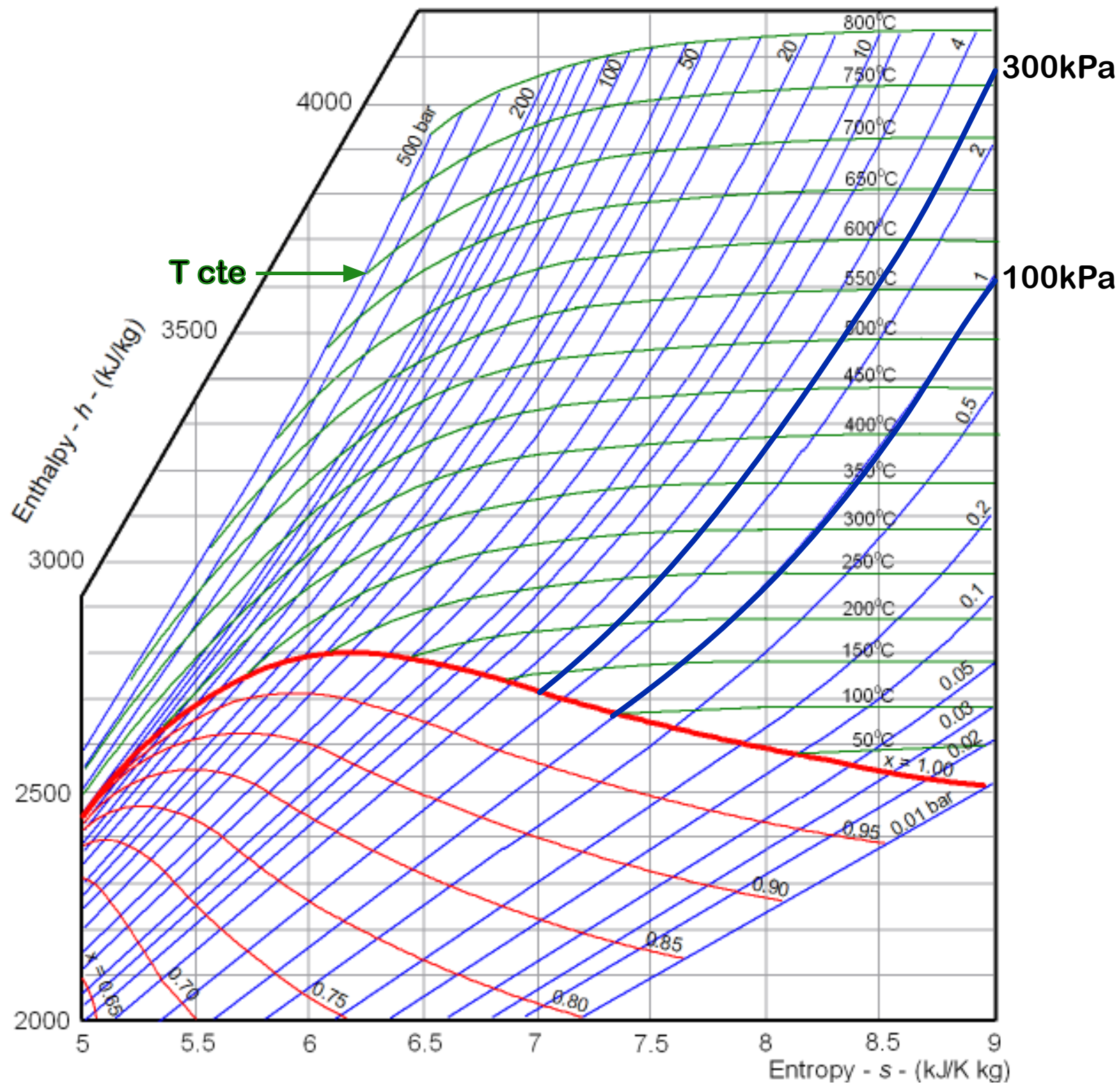


Aplicando a 2ª Lei para o volume de controle:

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

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

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





Como queremos reduzir o trabalho: $\dot{W}_{vc} \uparrow h_2 \downarrow$

Observando o diagrama $h \times s$: $h_2 \downarrow s_2 \downarrow$

Logo:

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

Determinação do estado 1



Para o estado 1: vapor a $P_1=0,3 \text{ MPa}$ e $T_1=500^\circ\text{C} \rightarrow$ vapor superaquecido

T	v (m^3/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				
Sat.	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918
150	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778
200	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115
250	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165
300	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022
400	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329
500	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250
600	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892
700	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319
800	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575

$$s_1 = 8,3250 \text{ kJ/kg.K}$$

$$h_1 = 3485,96 \text{ kJ/kg}$$

Determinação do estado 2



Para o estado 2: vapor a 0,1 MPa e $s_{2,\text{mínimo}}$

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

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$				
Sat.	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	-	-	-	-
100	-	-	-	-
150	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652

$$P_1 = 0,1 \text{ MPa e } s_2 = 8,5274 \text{ kJ/kg.K}$$

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



$$\dot{W}_{vc,\max} = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q}_{vc}$$

$$\dot{W}_{vc,\max} = 0,026 \cdot (3485,96 - 3268,16) + 4,21 = 9,87 kW$$

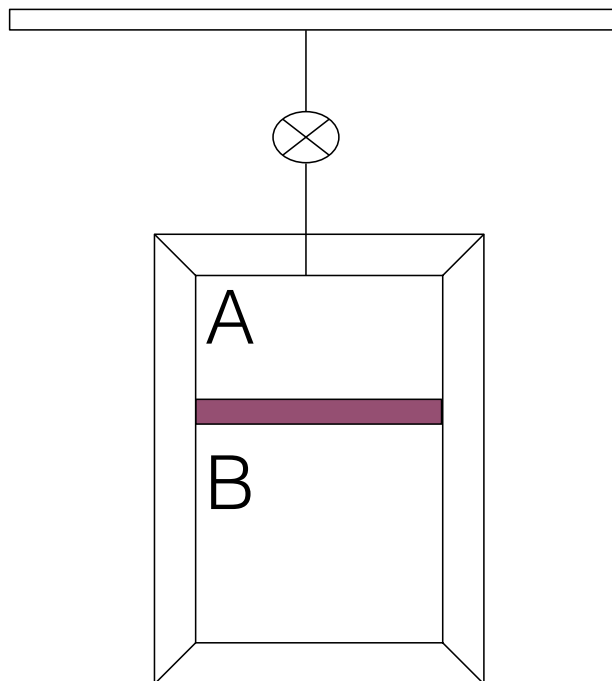


- Volume de controle: equipamento (delimitado pelo linha pontilhada);
- Estados 1 e 2 são estados de equilíbrio;
- Regime permanente;
- Processo reversível;
- Variações desprezíveis de energia cinética e potencial;
- Transferência de calor ocorre através da superfície a 527°C .

Exercício #2



Uma ampola cilíndrica vertical termicamente isolada é carregada na sua parte superior com nitrogênio proveniente de uma linha a $P_e = 1$ MPa e $T_e = 300$ K. A ampola possui duas câmaras separadas por um êmbolo ideal de material isolante térmico, sendo capaz de deslizar sem atrito. Inicialmente a câmara superior (A), com volume $V_{A1} = 20$ litros, contém nitrogênio a $P_{A1} = 100$ kPa e $T_{A1} = 300$ K, enquanto a câmara inferior (B), com volume $V_{B1} = 40$ litros, contém oxigênio a $T_{B1} = 300$ K. Admitindo o carregamento lento da ampola, pela abertura suave da válvula, e calores específicos constantes para os gases, calcular a massa que entra, as pressões, as temperaturas e os volumes finais, e a variação líquida de entropia.

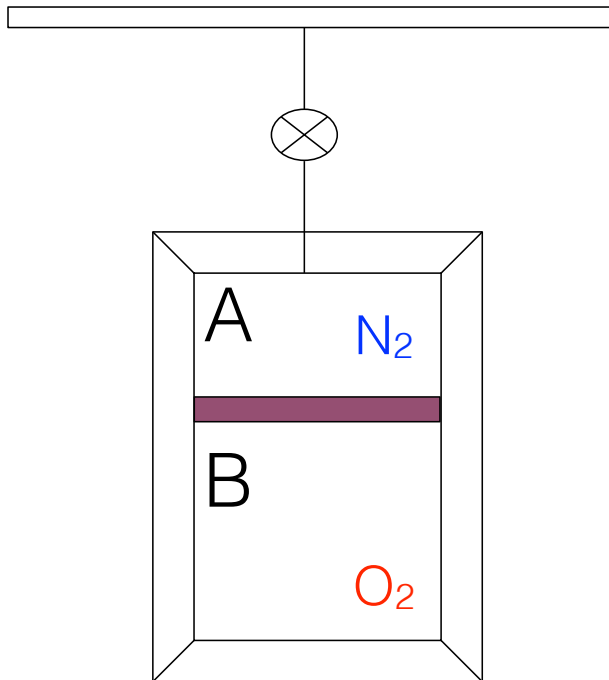


$$\begin{array}{l} \text{N}_2 \\ c_{p0} = 1,042 \text{ kJ/kgK} \\ c_{v0} = 0,745 \text{ kJ/kgK} \\ R = 0,2968 \text{ kJ/kgK} \\ k = 1,4 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{O}_2 \\ c_{p0} = 0,9216 \text{ kJ/kgK} \\ c_{v0} = 0,662 \text{ kJ/kgK} \\ R = 0,2598 \text{ kJ/kgK} \\ k = 1,393 \end{array}$$



$$P_e = 1 \text{ MPa e } T_e = 300 \text{ K}$$



Estado A1: $V_{A1} = 20$ litros

$$P_{A1} = 100 \text{ kPa}$$

$$T_{A1} = 300 \text{ K}$$

Estado B1: $V_{B1} = 40$ litros

$$T_{B1} = 300 \text{ K}$$

$$m_{A1} = 0,02246 \text{ kg}$$

$$m_B = 0,05132 \text{ kg}$$

Estado A2:

Estado B2:

2a Lei para B



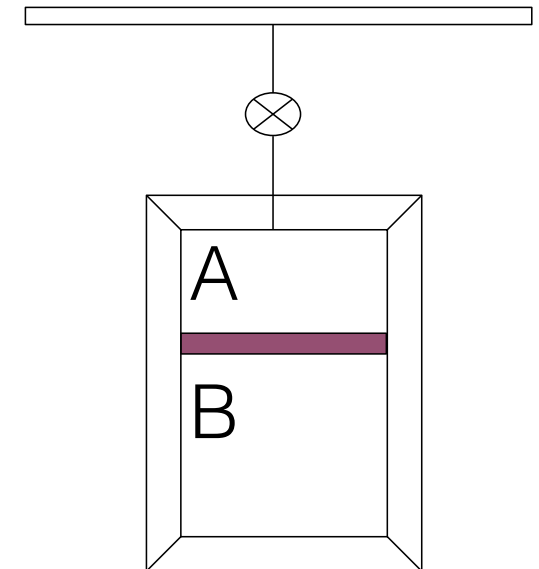
Podemos facilmente determinar o estado final em B, assumindo uma compressão adiabática reversível, portanto, isentrópica:

$$\frac{P_{B2}}{P_{B1}} = \left(\frac{V_{B1}}{V_{B2}} \right)^{k_{O_2}}$$

Isolando V_{B2} (ou v_{B2}) e assumindo que o peso do pistão é desprezível:

$$V_{B2} = V_{B1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/k_{O_2}} \Rightarrow V_{B2} = 7,659 \text{ L}$$

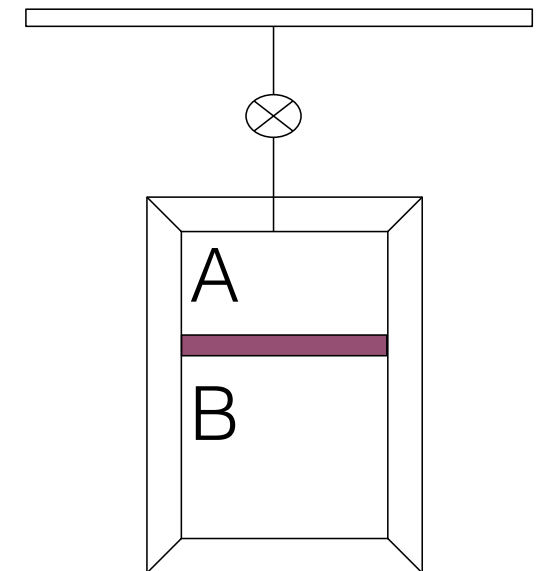
$$\frac{P_1 V_{B1}}{T_{B1}} = \frac{P_2 V_{B2}}{T_{B2}} \Rightarrow T_{B2} = 574,4 \text{ K}$$



Vamos considerar como volume de controle o conjunto, incluindo a válvula e aplicar a conservação da massa e a 1ª lei para determinarmos o estado final:

$$(m_2 - m_1)_{VC} = \cancel{\sum m_e} - \cancel{\sum m_s} \rightarrow m_{2A} - m_{1A} = m_e$$

$$E_2 - E_1 = \cancel{\sum_e m_e \left(h_e + \cancel{\frac{V_e^2}{2}} + \cancel{gz_e} \right)} - \cancel{\sum_s m_s \left(h_s + \cancel{\frac{V_s^2}{2}} + \cancel{gz_s} \right)} + \cancel{Q_{vc}} - \cancel{W_{vc}}$$



$$\rightarrow U_2 - U_1 = (m_{A2} - m_{A1}) h_e$$

1ª Lei para Regime Uniforme



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

$$m_{2A} - m_{1A} = m_e$$

$$U_2 - U_1 = m_e h_e$$

$$m_{A2}u_{A2} + m_{B2}u_{B2} - m_{A1}u_{A1} - m_{B1}u_{B1} = m_e h_e$$

$$m_{A2}u_{A2} - m_{A1}u_{A1} + m_B(u_{B2} - u_{B1}) = m_e h_e$$

$$m_{A2}c_{v,N_2}.T_{A2} - m_{A1}c_{v,N_2}.T_{A1} + m_B.c_{v,O_2}(T_{B2} - T_{B1}) = m_e c_{p,N_2}.T_e$$

$$m_{A2} = \frac{P_2 \forall_{A2}}{R_{N_2} T_{A2}}$$

1ª Lei para Regime Uniforme



$$m_{A2}c_{v,N_2}.T_{A2} - m_{A1}c_{v,N_2}.T_{A1} + m_B.c_{v,O_2}(T_{B2} - T_{B1}) = m_e c_{p,N_2}.T_e$$

$$m_{A1} = 0,02246 \text{ kg}$$

$$m_{A2} = \frac{P_2 \forall_{A2}}{R_{N_2} T_{A2}}$$

$$m_B = 0,05132 \text{ kg}$$

$$\forall_{A2} = 60 - 7,659 = 52,34 \text{ L}$$

$$P_2 \forall_{A2} c_{v,N_2} / R_{N_2} - m_{A1} c_{v,N_2}.T_{A1} + m_B.c_{v,O_2}(T_{B2} - T_{B1}) = m_e c_{p,N_2}.T_e$$

$$m_e = 0,4493 \text{ kg}$$

$$\therefore m_{A2} = 0,4717 \text{ kg}$$

$$T_{A2} = 373,8 \text{ K}$$

Variação Líquida de Entropia



A variação de entropia é igual à entropia gerada no processo. Aplicando a 2ª lei para um volume de controle que inclui a válvula e A:

$$S_2 - S_1 = \cancel{\sum \left(\frac{Q_{1-2}}{T} \right)} + \sum m_e s_e - \cancel{\sum m_s s_s} + S_{ger}$$

$$m_{A2} s_{A2} - m_{A1} s_{A1} = m_e s_e + S_{ger,1-2}$$

$$S_{ger,1-2} = m_{A2} s_{A2} - m_{A1} s_{A1} - m_e s_e$$

$$S_{ger,1-2} = m_{A2}(s_{A2} - s_e) + m_{A1}(s_e - s_{A1})$$



$$S_{\text{ger},1-2} = m_{A2}(s_{A2} - s_e) + m_{A1}(s_e - s_{A1})$$

Usando a relação: $s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

$$S_{\text{ger},1-2} = 0,1235 \text{ kJ/kgK}$$

- Sistema gás em B: processo de compressão adiabático reversível;
- Gás perfeito;
- Calores específicos constantes;
- Volume de controle tanque + válvula: regime uniforme;
- Processo adiabático;
- Variações de energia cinética e potencial desprezíveis;
- Estados inicial e final de equilíbrio.