

Propriedades de Misturas

Parte 2

Substance	Chemical Formula	M (kg/kmol)	T_c (K)	p_c (bar)	$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c}$
Acetylene	C ₂ H ₂	26.04	309	62.8	0.274
Air (equivalent)	—	28.97	133	37.7	0.284
Ammonia	NH ₃	17.03	406	112.8	0.242
Argon	Ar	39.94	151	48.6	0.290
Benzene	C ₆ H ₆	78.11	563	49.3	0.274
Butane	C ₄ H ₁₀	58.12	425	38.0	0.274
Carbon	C	12.01	—	—	—
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	304	73.9	0.276
Carbon monoxide	CO	28.01	133	35.0	0.294
Copper	Cu	63.54	—	—	—
Ethane	C ₂ H ₆	30.07	305	48.8	0.285
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.07	516	63.8	0.249
Ethylene	C ₂ H ₄	28.05	283	51.2	0.270
Helium	He	4.003	5.2	2.3	0.300
Hydrogen	H ₂	2.016	33.2	13.0	0.304
Methane	CH ₄	16.04	191	46.4	0.290
Methyl alcohol	CH ₃ OH	32.04	513	79.5	0.220
Nitrogen	N ₂	28.01	126	33.9	0.291
Octane	C ₈ H ₁₈	114.22	569	24.9	0.258
Oxygen	O ₂	32.00	154	50.5	0.290
Propane	C ₃ H ₈	44.09	370	42.7	0.276
Propylene	C ₃ H ₆	42.08	365	46.2	0.276
Refrigerant 12	CCl ₂ F ₂	120.92	385	41.2	0.278
Refrigerant 22	CHClF ₂	86.48	369	49.8	0.267
Refrigerant 134a	CF ₃ CH ₂ F	102.03	374	40.7	0.260
Sulfur dioxide	SO ₂	64.06	431	78.7	0.268
Water	H ₂ O	18.02	647.3	220.9	0.233

Exemplo: cálculo de M do ar seco

Component	Mole Fraction (%)
Nitrogen	78.08
Oxygen	20.95
Argon	0.93
Carbon dioxide	0.03
Neon, helium, methane, and others	0.01

- $$M = \sum y_i M_i \approx 0,78M_{N_2} + 0,21M_{O_2} + 0,0093M_{Ar} + 0,0003M_{CO_2} \approx 0,78.28 + 0,21.32 + 0,0093.40 + 0,0003.44 = 28,97\text{kg/kmol}$$

Exemplo

- A análise molar de um certo produto gasoso é 8% CO₂, 11% de H₂O, 7% de O₂ e 74% de N₂. Determine: (a) a massa molecular da mistura; (b) a composição em termos de frações mássicas.

- (a) $M = \sum y_i M_i \approx 0,08M_{CO_2} + 0,11M_{H_2O} + 0,07M_{O_2} + 0,74M_{N_2} = 28,46 \text{ kg/kmol}$

- (b) $n_i = \frac{m_i}{M_i} \Rightarrow m_i = n_i M_i$

$$mf_i = \frac{m_i}{m} \Rightarrow mf_i = \frac{n_i M_i}{nM} = y_i \frac{M_i}{M}$$

Exemplo (continuação)

Assim:

- $mf_{CO_2} = 12,37\%$
- $mf_{H_2O} = 6,96\%$
- $mf_{O_2} = 7,87\%$
- $mf_{N_2} = 72,80\%$

Exemplo

- Uma mistura de gases tem a seguinte composição galvométrica: 10% H₂, 60% N₂ e 30% CO₂. Determine: (a) as frações molares de cada componente; (b) a massa molecular da mistura.

- (a) $mf_i = \frac{m_i}{m} \Rightarrow m_i = mf_i \cdot m$

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} = \frac{mf_i \cdot m}{M_i}$$

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{mf_i \cdot m / M_i}{\sum(mf_i \cdot m / M_i)} = \frac{mf_i \cdot m / M_i}{m \sum(mf_i / M_i)} = \frac{mf_i / M_i}{\sum(mf_i / M_i)}$$

Exemplo (continuação)

Assim

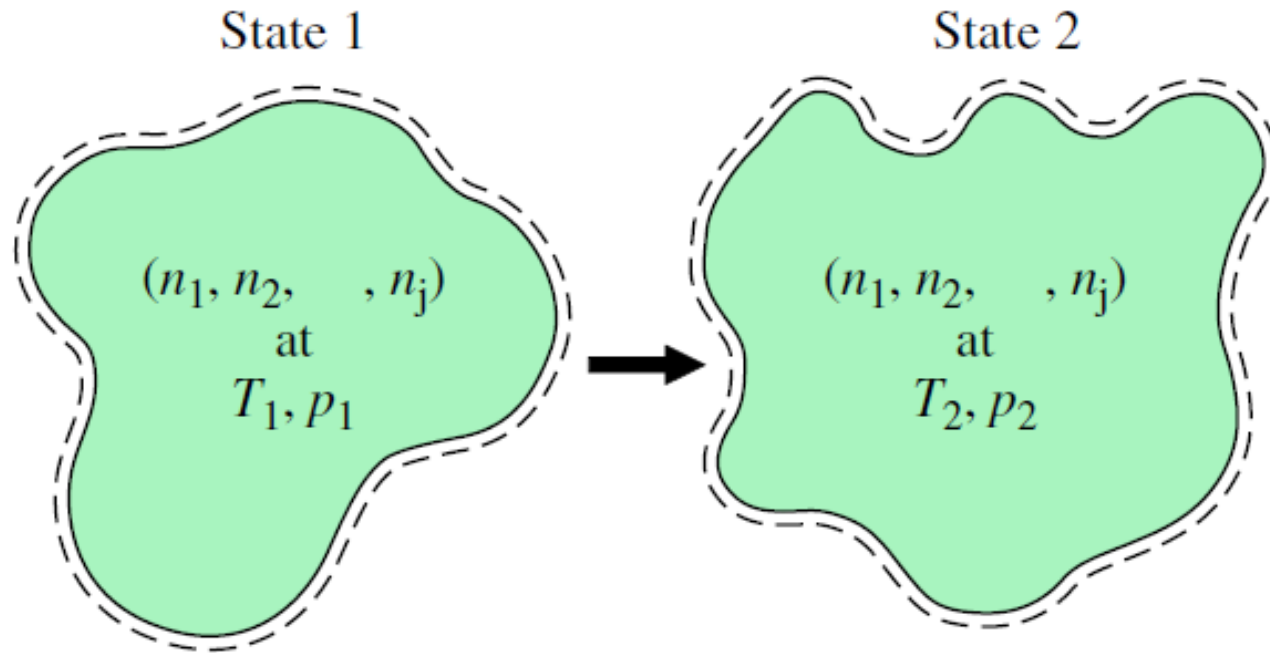
- $y_{H_2} = 63,9\%$
- $y_{N_2} = 27,4\%$
- $y_{CO_2} = 8,7\%$

- (b) $M = \sum y_i M_i = 0,639 M_{H_2} + 0,274 M_{N_2} + 0,087 M_{CO_2} = 12,79 \text{ kg/kmol}$

Avaliação de propriedades em processos

- Para poder avaliar processos termodinâmicos envolvendo misturas:
 - Transporte de massa, energia e aplicação 2ª Lei
 - Para processos não reativos, mesmos princípios
 - Diferença: é preciso avaliar propriedades da mistura com base em seus componentes

Processos com misturas a composição CTE



$$U_1 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{u}_i(T_1)$$

$$U_2 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{u}_i(T_2)$$

$$H_1 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{h}_i(T_1)$$

$$H_2 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{h}_i(T_2)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{s}_i(T_1, p_{i1})$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^j n_i \bar{s}_i(T_2, p_{i2})$$

Processos com misturas a composição CTE

$$U_2 - U_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{u}_i(T_2) - \bar{u}_i(T_1)]$$

$$H_2 - H_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{h}_i(T_2) - \bar{h}_i(T_1)]$$

$$S_2 - S_1 = \sum_{i=1}^j n_i [\bar{s}_i(T_2, p_{i2}) - \bar{s}_i(T_1, p_{i1})]$$

$$\Delta \bar{u} = \sum_{i=1}^j y_i [\bar{u}_i(T_2) - \bar{u}_i(T_1)]$$

$$\Delta \bar{h} = \sum_{i=1}^j y_i [\bar{h}_i(T_2) - \bar{h}_i(T_1)]$$

$$\Delta \bar{s} = \sum_{i=1}^j y_i [\bar{s}_i(T_2, p_{i2}) - \bar{s}_i(T_1, p_{i1})]$$

Processos com misturas a composição CTE

- Estas eqs. fornecem variações da mistura entre 1 e 2 com base na variação de cada componente
- As propriedades em 1 e 2 de cada componente podem ser obtidas de tabelas de propriedades
 - \bar{u}_i e \bar{h}_i são funções apenas de T
 - Há tabelas onde são diretamente lidas
 - \bar{s}_i é função de T e de P_i
 - Para gás perfeito:

$$\Delta \bar{s}_i = \bar{s}_i^\circ(T_2) - \bar{s}_i^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_{i2}}{P_{i1}}$$

- E como, para composição cte entre 1 e 2 $\frac{P_{i2}}{P_{i1}} = \frac{y_i P_2}{y_i P_1} = \frac{P_2}{P_1}$

$$\Delta \bar{s}_i = \bar{s}_i^\circ(T_2) - \bar{s}_i^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Processos com misturas a composição CTE

- E agora pode ser calculado a partir de dados tabelados
- Finalmente, assumindo calores específicos ctes

$$\Delta \bar{u} = \bar{c}_v (T_2 - T_1),$$

$$\Delta \bar{u}_i = \bar{c}_{v,i} (T_2 - T_1)$$

$$\Delta \bar{h} = \bar{c}_p (T_2 - T_1),$$

$$\Delta \bar{h}_i = \bar{c}_{p,i} (T_2 - T_1)$$

$$\Delta \bar{s} = \bar{c}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1},$$

$$\Delta \bar{s}_i = \bar{c}_{p,i} \ln \frac{T_2}{T_1} - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

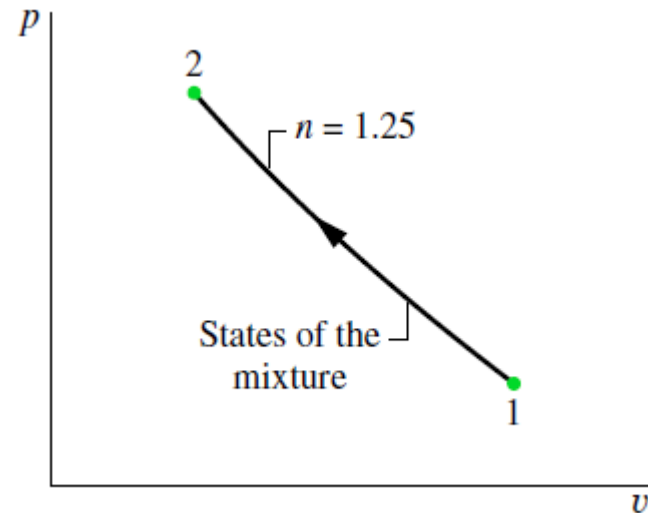
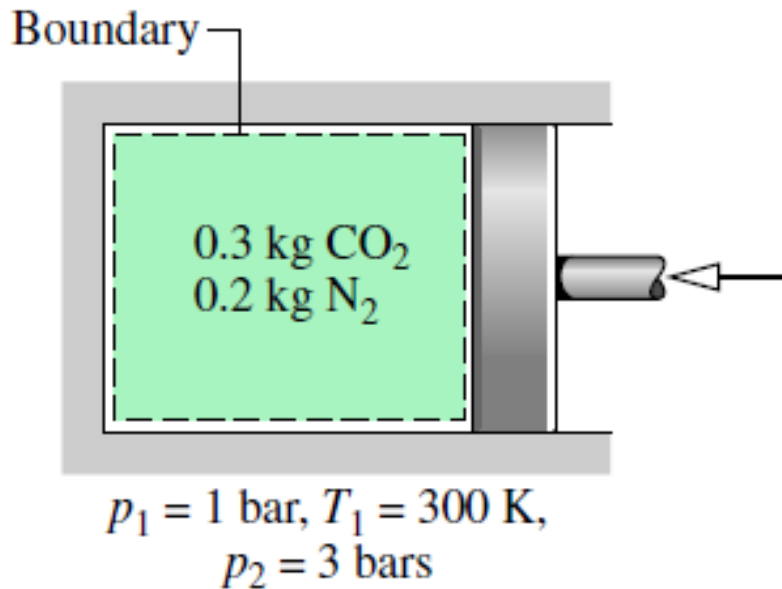
$T(\text{K}), h$ and $u(\text{kJ/kg}), s^\circ$ (kJ/kg · K)											
T	h	u	s°	when $\Delta s = 0^1$		T	h	u	s°	when $\Delta s = 0$	
				p_r	v_r					p_r	v_r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6

TABLE A-23 Ideal Gas Properties of Selected Gases

$T(\text{K}), \bar{h}$ and $\bar{u}(\text{kJ/kmol}), \bar{s}^\circ(\text{kJ/kmol} \cdot \text{K})$									
T	Carbon Dioxide, CO_2 ($\bar{h}_f^\circ = -393,520 \text{ kJ/kmol}$)			Carbon Monoxide, CO ($\bar{h}_f^\circ = -110,530 \text{ kJ/kmol}$)			Water Vapor, H_2O ($\bar{h}_f^\circ = -241,820 \text{ kJ/kmol}$)		
	\bar{h}	\bar{u}	\bar{s}°	\bar{h}	\bar{u}	\bar{s}°	\bar{h}	\bar{u}	\bar{s}°
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	6,601	4,772	202.966	6,391	4,562	188.683	7,295	5,466	178.576
230	6,938	5,026	204.464	6,683	4,771	189.980	7,628	5,715	180.054
240	7,280	5,285	205.920	6,975	4,979	191.221	7,961	5,965	181.471
250	7,627	5,548	207.337	7,266	5,188	192.411	8,294	6,215	182.831
260	7,979	5,817	208.717	7,558	5,396	193.554	8,627	6,466	184.139
270	8,335	6,091	210.062	7,849	5,604	194.654	8,961	6,716	185.399
280	8,697	6,369	211.376	8,140	5,812	195.173	9,296	6,968	186.616
290	9,063	6,651	212.660	8,432	6,020	196.735	9,631	7,219	187.791
298	9,364	6,885	213.685	8,669	6,190	197.543	9,904	7,425	188.720
300	9,431	6,939	213.915	8,723	6,229	197.723	9,966	7,472	188.928
310	9,807	7,230	215.146	9,014	6,437	198.678	10,302	7,725	190.030
320	10,186	7,526	216.351	9,306	6,645	199.603	10,639	7,978	191.098
330	10,570	7,826	217.534	9,597	6,854	200.500	10,976	8,232	192.136
340	10,959	8,131	218.694	9,889	7,062	201.371	11,314	8,487	193.144
350	11,351	8,439	219.831	10,181	7,271	202.217	11,652	8,742	194.125
360	11,748	8,752	220.948	10,473	7,480	203.040	11,992	8,998	195.081
370	12,148	9,068	222.044	10,765	7,689	203.842	12,331	9,255	196.012
380	12,552	9,392	223.122	11,058	7,899	204.622	12,672	9,513	196.920
390	12,960	9,718	224.182	11,351	8,108	205.383	13,014	9,771	197.807
400	13,372	10,046	225.225	11,644	8,319	206.125	13,356	10,030	198.673
410	13,787	10,378	226.250	11,938	8,529	206.850	13,699	10,290	199.521
420	14,206	10,714	227.258	12,232	8,740	207.549	14,043	10,551	200.350
430	14,628	11,053	228.252	12,526	8,951	208.252	14,388	10,813	201.160
440	15,054	11,393	229.230	12,821	9,163	208.929	14,734	11,075	201.955
450	15,483	11,742	230.194	13,116	9,375	209.593	15,080	11,339	202.734
460	15,916	12,091	231.144	13,412	9,587	210.243	15,428	11,603	203.497

Exemplo

- Uma mistura de 0,3 kg de CO_2 e 0,2 kg de N_2 é comprimida de 1 bar e 300 K a 3 bars seguindo um processo politrópico para o qual $n=1,25$. Determine: (a) a temperatura final; (b) o trabalho; (c) a transferência de calor; (d) a variação de entropia da mistura.



Exemplo (continuação)

Processo politrópico:

$$pV^n = \text{constant}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

- (a)
$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = 300 \left(\frac{3}{1} \right)^{0.2} = 374 \text{ K}$$

- (b)
$$W = \int_1^2 p dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} = \frac{m(\bar{R}/M)(T_2 - T_1)}{1 - n}$$

onde: $M = \frac{m}{n}$

$$m = 0.3 + 0.2 = 0.5 \text{ kg}$$

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{0.3}{44} = 0.0068 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{N}_2} = \frac{0.2}{28} = 0.0071 \text{ kmol}$$

$$\Rightarrow M = 35.97$$

Exemplo (continuação)

Finalmente:

$$W = \frac{(0.5 \text{ kg}) \left(\frac{8.314 \text{ kJ}}{35.97 \text{ kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right) (374 \text{ K} - 300 \text{ K})}{1 - 1.25} = -34.21 \text{ kJ}$$

- (c) $Q = \Delta U + W$

onde

$$\Delta U = n_{\text{CO}_2} [\bar{u}_{\text{CO}_2}(T_2) - \bar{u}_{\text{CO}_2}(T_1)] + n_{\text{N}_2} [\bar{u}_{\text{N}_2}(T_2) - \bar{u}_{\text{N}_2}(T_1)]$$

Table A-23 $\Rightarrow \Delta U = 26.3 \text{ kJ}$

$$Q = +26.3 - 34.21 = -7.91 \text{ kJ}$$

Exemplo (continuação)

- (d) $\Delta S = n_{\text{CO}_2} \Delta \bar{s}_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2} \Delta \bar{s}_{\text{N}_2}$

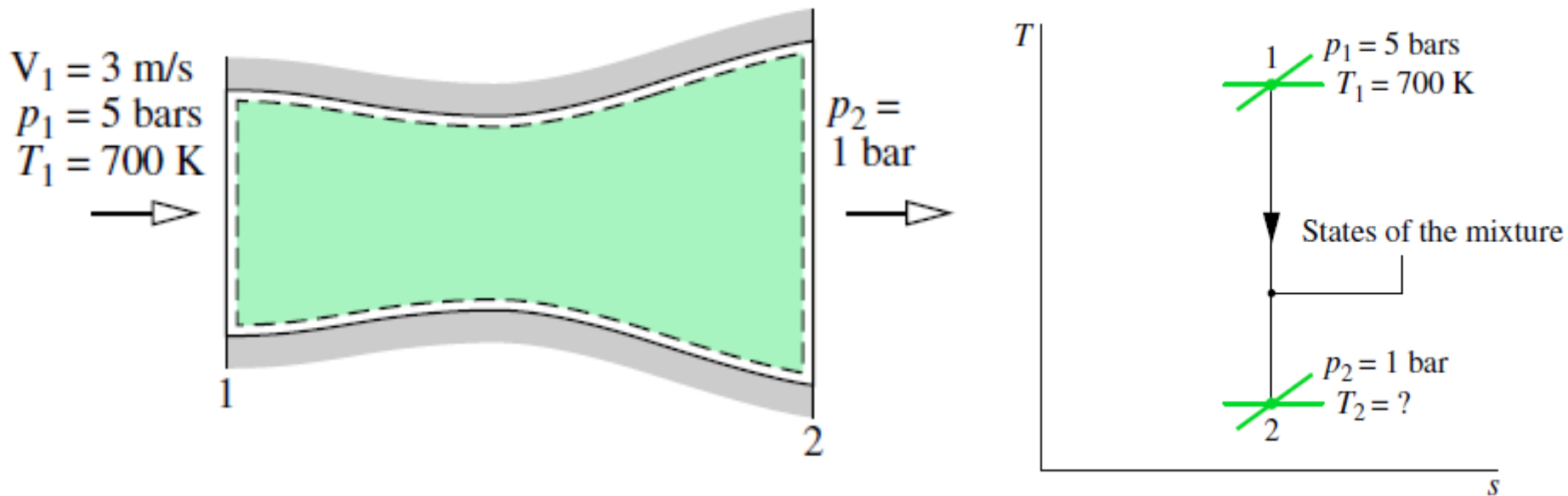
onde $\Delta \bar{s}_i = \bar{s}_i^\circ(T_2) - \bar{s}_i^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1}$

Table A-23 \Rightarrow

$$\begin{aligned} \Delta S &= 0.0068 \left(222.475 - 213.915 - 8.314 \frac{3}{1} \right) \\ &\quad + 0.0071 \left(198.105 - 191.682 - 8.314 \frac{3}{1} \right) \\ &= -.0231 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

Exemplo

- Uma mistura de CO_2 e de O_2 com frações molares 0,8 e 0,2, respectivamente, se expande isentropicamente e em regime permanente em um bocal, de 700K, 5bars e 3m/s, a uma pressão de saída de 1 bar. Determine: (a) a temperatura na saída; (b) as variações de entropia do CO_2 e do O_2 ; (c) a velocidade na saída.



Exemplo (continuação)

- (a) : isentrópico => $\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = y_{\text{O}_2} \Delta \bar{s}_{\text{O}_2} + y_{\text{CO}_2} \Delta \bar{s}_{\text{CO}_2} = 0$

$$y_{\text{O}_2} \left[\bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_2) - \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1} \right] + y_{\text{CO}_2} \left[\bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_2) - \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1} \right] = 0$$

$$y_{\text{O}_2} \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_2) + y_{\text{CO}_2} \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_2) = y_{\text{O}_2} \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_1) + y_{\text{CO}_2} \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_1) + (y_{\text{O}_2} + y_{\text{CO}_2}) \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Table A-23 Nos fornece os s° no estado 1, de forma que ficamos com:

$$0.2 \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_2) + 0.8 \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_2) = 233.42 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

E T_2 pode ser encontrado de forma iterativa, comparando LHS e RHS com Tab. A23

$$\text{at } T = 510 \text{ K: } \quad 0.2(221.206) + 0.8(235.700) = 232.80$$

$$\text{at } T = 520 \text{ K: } \quad 0.2(221.812) + 0.8(236.575) = 233.62$$

Interpolando: $T_2 = 517.6 \text{ K}$

Exemplo (continuação)

- (b)
$$\Delta \bar{s}_{\text{O}_2} = \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_2) - \bar{s}_{\text{O}_2}^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta \bar{s}_{\text{CO}_2} = \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_2) - \bar{s}_{\text{CO}_2}^\circ(T_1) - \bar{R} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Utilizando Tab. A23:

$$\Delta \bar{s}_{\text{O}_2} = 3.69 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

$$\Delta \bar{s}_{\text{CO}_2} = -0.92 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

- (c) aplicando a eq. da energia:

$$0 = h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \Rightarrow V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2(h_1 - h_2)}$$

Onde:

$$h_1 - h_2 = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{M} = \frac{1}{M} [y_{\text{O}_2}(\bar{h}_1 - \bar{h}_2)_{\text{O}_2} + y_{\text{CO}_2}(\bar{h}_1 - \bar{h}_2)_{\text{CO}_2}]$$

Exemplo (continuação)

Para M:

$$M = 0.8(44) + 0.2(32) = 41.6 \text{ kg/kmol}$$

E utilizando a Tab. A23

$$h_1 - h_2 = \frac{1}{41.6} [0.2(21,184 - 15,320) + 0.8(27,125 - 18,468)] = 194.7 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente:

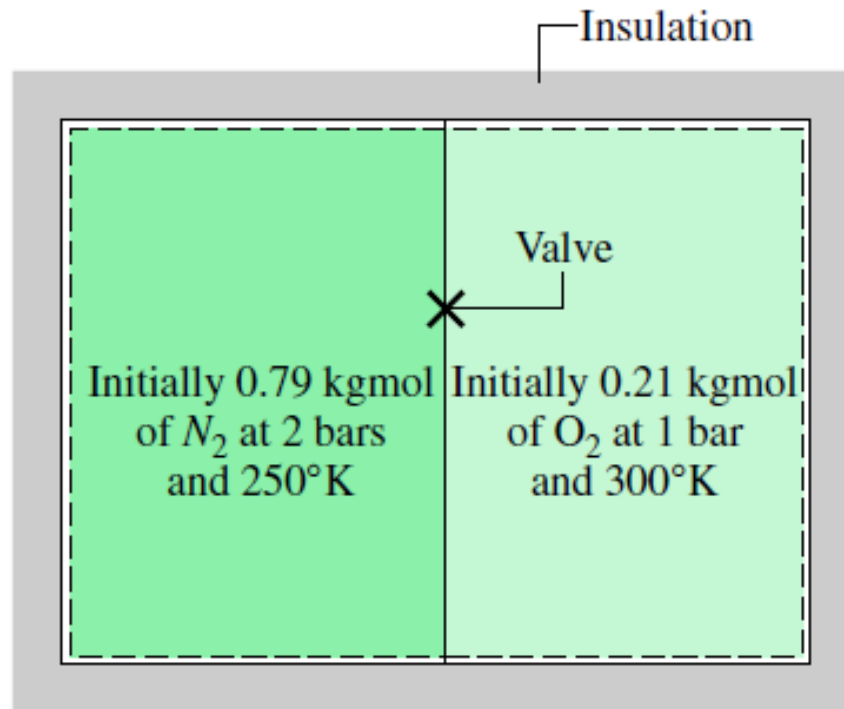
$$V_2 = \sqrt{\left(3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 2 \left(194.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \left| \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right| \left| \frac{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ kJ}} \right|} = 624 \text{ m/s}$$

Misturando gases ideais

- Gases com composição variando, porém sem reação química
- Os gases estão inicialmente separados, e são misturados
 - Esta mistura é um processo irreversível
- 3 fatores contribuem para produção de entropia:
 - Temperaturas dos gases inicialmente diferentes
 - Pressões dos gases inicialmente diferentes
 - Gases com composições iniciais distintas

Exemplo

- 2 tanques rígidos e isolados estão conectados por uma válvula. Inicialmente, tem-se 0,79 kmol de N_2 a 2 bars e 250K em um dos tanques. O outro tanque contém 0,21 kmol de O_2 a 1 bar e 300K. A válvula é aberta e um processo de mistura sem troca de calor ou trabalho com o ambiente externo ao tanque acontece, até que um estado de equilíbrio é atingido. Determine: (a) a temperatura final de mistura; (b) a pressão final da mistura; (c) a produção de entropia neste processo.



Exemplo (continuação)

- (a) Da primeira lei: $U_2 - U_1 = 0$

Onde

$$U_1 = n_{\text{N}_2} \bar{u}_{\text{N}_2}(T_{\text{N}_2}) + n_{\text{O}_2} \bar{u}_{\text{O}_2}(T_{\text{O}_2})$$

$$U_2 = n_{\text{N}_2} \bar{u}_{\text{N}_2}(T_2) + n_{\text{O}_2} \bar{u}_{\text{O}_2}(T_2)$$

Logo $n_{\text{N}_2} [\bar{u}_{\text{N}_2}(T_2) - \bar{u}_{\text{N}_2}(T_{\text{N}_2})] + n_{\text{O}_2} [\bar{u}_{\text{O}_2}(T_2) - \bar{u}_{\text{O}_2}(T_{\text{O}_2})] = 0$

E T_2 pode ser encontrado de forma iterativa. Alternativamente, podemos considerar que c_v pouco varia, Neste caso:

$$n_{\text{N}_2} \bar{c}_{v,\text{N}_2} (T_2 - T_{\text{N}_2}) + n_{\text{O}_2} \bar{c}_{v,\text{O}_2} (T_2 - T_{\text{O}_2}) = 0$$

$$T_2 = \frac{n_{\text{N}_2} \bar{c}_{v,\text{N}_2} T_{\text{N}_2} + n_{\text{O}_2} \bar{c}_{v,\text{O}_2} T_{\text{O}_2}}{n_{\text{N}_2} \bar{c}_{v,\text{N}_2} + n_{\text{O}_2} \bar{c}_{v,\text{O}_2}}$$

Avaliando c_v da Tab. A20:

$$T_2 = 261^\circ\text{K}$$

Exemplo (continuação)

- (b) observando que o volume total é o volume dos 2 tanques:

$$V = \frac{n_{\text{N}_2} \bar{R} T_{\text{N}_2}}{p_{\text{N}_2}} + \frac{n_{\text{O}_2} \bar{R} T_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}}$$

Onde, no estado inicial temos: $p_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$ $p_{\text{N}_2} = 2 \text{ atm}$

e o estado final pode ser calculado de $P_2 = nRT/V$, onde V se conserva:

$$p_2 = \frac{(n_{\text{N}_2} + n_{\text{O}_2}) T_2}{\left(\frac{n_{\text{N}_2} T_{\text{N}_2}}{p_{\text{N}_2}} + \frac{n_{\text{O}_2} T_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2}} \right)} = 1.62 \text{ bars}$$

- (c) para processo adiabático:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_b + \sigma$$

Exemplo (continuação)

Onde

$$S_1 = n_{N_2} \bar{s}_{N_2}(T_{N_2}, p_{N_2}) + n_{O_2} \bar{s}_{O_2}(T_{O_2}, p_{O_2})$$

$$S_2 = n_{N_2} \bar{s}_{N_2}(T_2, y_{N_2} p_2) + n_{O_2} \bar{s}_{O_2}(T_2, y_{O_2} p_2)$$

Logo:

$$\begin{aligned} \sigma &= n_{N_2} [\bar{s}_{N_2}(T_2, y_{N_2} p_2) - \bar{s}_{N_2}(T_{N_2}, p_{N_2})] \\ &\quad + n_{O_2} [\bar{s}_{O_2}(T_2, y_{O_2} p_2) - \bar{s}_{O_2}(T_{O_2}, p_{O_2})] \end{aligned}$$

$$\sigma = n_{N_2} \left(\bar{c}_{p, N_2} \ln \frac{T_2}{T_{N_2}} - \bar{R} \ln \frac{y_{N_2} p_2}{p_{N_2}} \right) + n_{O_2} \left(\bar{c}_{p, O_2} \ln \frac{T_2}{T_{O_2}} - \bar{R} \ln \frac{y_{O_2} p_2}{p_{O_2}} \right)$$

E podemos achar c_p : $\bar{c}_p = \bar{c}_v + \bar{R}$

$$\bar{c}_{p, N_2} = 29.13 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$\bar{c}_{p, O_2} = 29.30 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

Finalmente:

$$\sigma = 5.0 \text{ kJ/}^\circ\text{K}$$