

Introdução à Engenharia Química e Bioquímica

**Aula 5 Balanços Energéticos
MIEQB
ano lectivo de 2020/2021**

Sumário da aula

Balanços energéticos a sistemas não reactivos

- Operações com mudança de fase
- Calores latentes
- Balanços energéticos a sistemas envolvendo mudança de fase

Variações entálpicas associadas aos processos com interesse na indústria química

1. Variações de pressão a T e estado físico constantes
2. Variações de temperatura a P e estado físico constantes
3. Mudança de fase a p, T constantes
4. Mistura de dois líquidos ou solubilização de um gás ou sólido num líquido a T, P constantes
5. Reacção química a p, T constantes

Processos com variação da temperatura (P e estado físico constantes)

C_p : Calor específico a pressão constante

$$C_P(T) = \left(\frac{\partial \hat{H}}{\partial T} \right)_P$$

Estado de referência (p, T, estado físico): $\hat{H}_{referência} = 0$

$$\Delta \hat{H} = \int_{T_{Ref}}^T C_P(T) dT$$

ou

$$\Delta H = m \int_{T_{Ref}}^T C_P(T) dT$$

Variações entálpicas associadas aos processos com interesse na indústria química

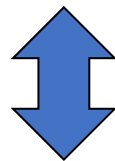
1. Variações de pressão a T e estado físico constantes
2. Variações de temperatura a P e estado físico constantes
3. Mudança de fase a p, T constantes
4. Mistura de dois líquidos ou solubilização de um gás ou sólido num líquido a T, P constantes
5. Reacção química a p, T constantes

Operações com mudança de fase

Table B.5 Properties of Saturated Steam: Temperature Table^a

$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{bar})$	$\hat{H}(\text{kJ/kg})$		
		Water	Evaporation	Steam
94	0.8145	393.8	2272	2666
96	0.8767	402.2	2267	2669
98	0.9429	410.7	2262	2673
100	1.0131	419.1	2257	2676

$$\delta (\hat{H}_{\text{vapor de água}} - \hat{H}_{\text{água líquida}})_{p,T} \equiv$$



Calor latente!

variação entálpica
associada à evaporação
de 1 kg de água!

5.14.

Alimenta-se uma mistura equimolar de benzeno (B) e tolueno (T) a uma coluna de destilação, à temperatura de 10°C e no estado líquido. Obtém-se um resíduo líquido (40% molar em B) e um destilado gasoso (68.4% molar em B) ambos à temperatura de 50°C. Desprezando efeitos de pressão e de mistura, calcule a quantidade de calor que é necessário fornecer ao sistema por mole de mistura alimentada.

Dados (C_p em $J.mol^{-1}.^{\circ}C^{-1}$):

$$C_p (B \text{ liq.}) = 62.55 + 23.4E^{-2} T \text{ (T em K)}$$

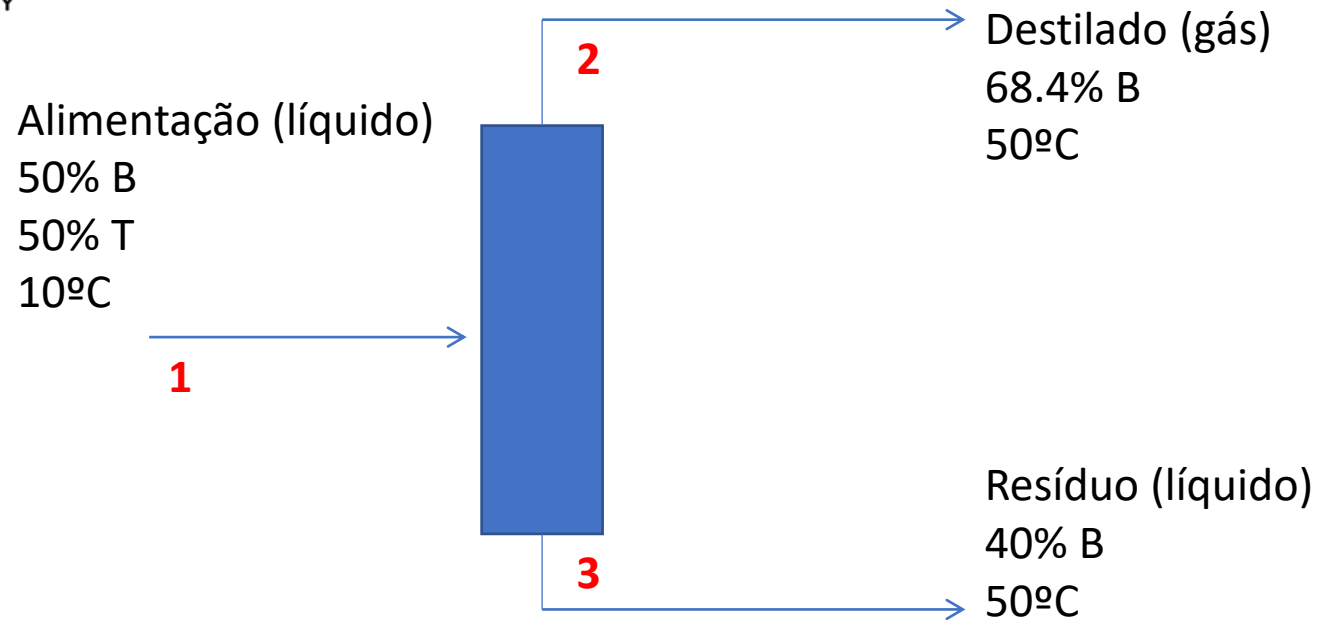
$$C_p (B \text{ gás}) = 74.06 + 32.95E^{-2} T - 25.2E^{-5} T^2 + 77.57E^{-9} T^3 \text{ (T em } ^{\circ}C)$$

$$C_p (T \text{ liq.}) = 148.8 + 32.4E^{-2} T \text{ (T em } ^{\circ}C)$$

$$C_p (T \text{ gás}) = 94.18 + 38.0E^{-2} T - 27.86E^{-5} T^2 + 80.33E^{-9} T^3 \text{ (T em } ^{\circ}C)$$

$$\Delta H_{\text{vaporização}} (B) = 30.765 \text{ kJ.mol}^{-1}, T_{eb} (B) = 80.1^{\circ}C$$

$$\Delta H_{\text{vaporização}} (T) = 37.47 \text{ kJ.mol}^{-1}, T_{eb} (T) = 110.6^{\circ}C.$$



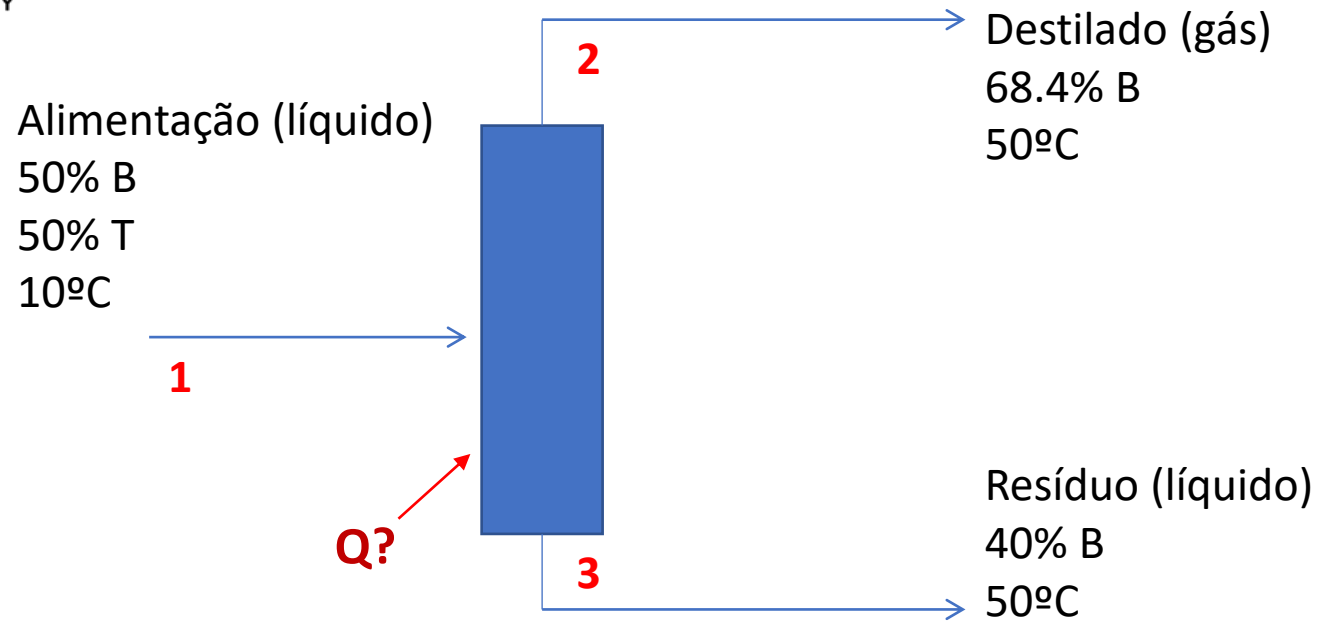
BALANÇO MATERIAL

Base de cálculo – 100 moles de alimentação

$$n_1 = n_2 + n_3$$

$$0.5 \times n_1 = 0.68 \times n_2 + 0.4 \times n_3$$

Mol	1	2	3
B	50	24.1	25.9
T	50	11.1	38.9
Total	100	35.2	64.8



BALANÇO ENTÁLPICO

Temperatura ref^a=10°C

P=1 atm

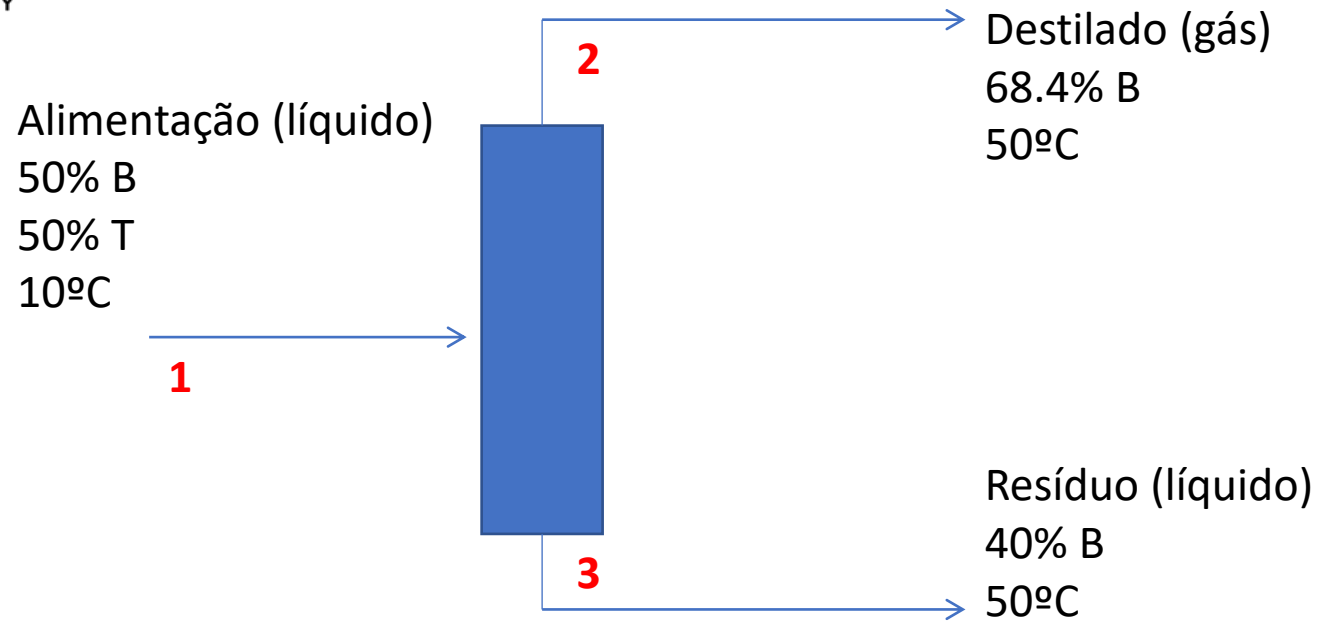
Estado - líquido

$$\Delta H_1 = 0$$

$$0 + Q = \Delta H_2 + \Delta H_3$$

Correntes 2 e 3

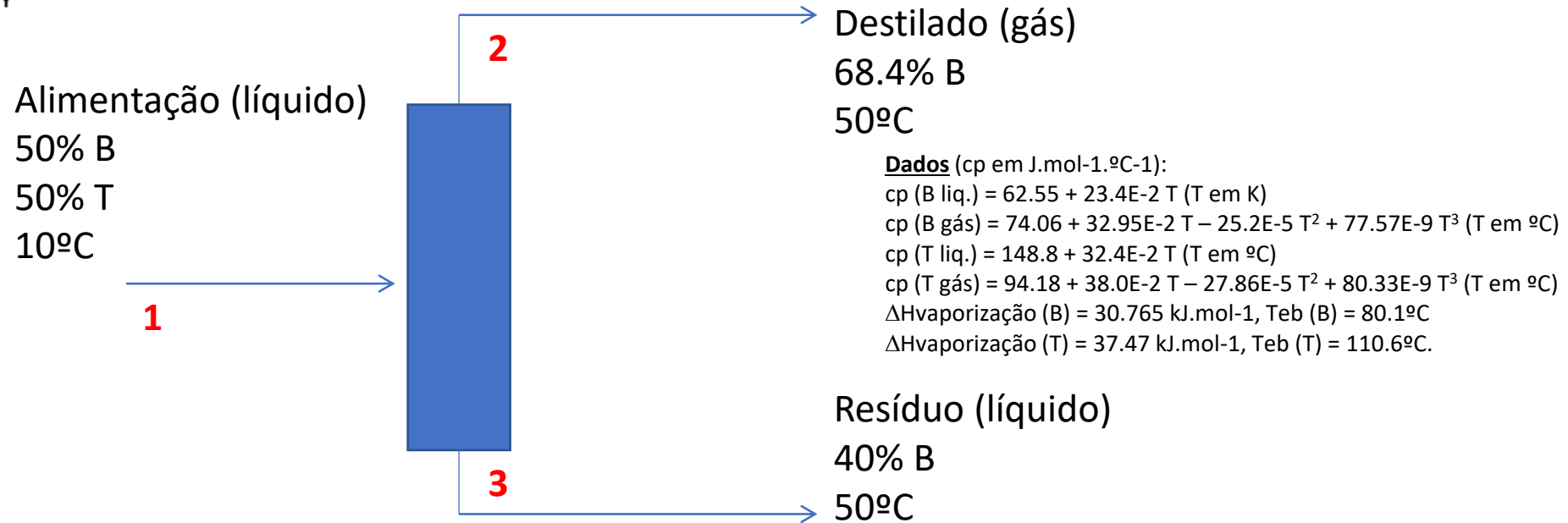
$$\Delta H_{\text{mistura}} = \sum_{i=1}^2 n_i \cdot \Delta \hat{H}_i$$



$$\Delta H_3 = \Delta H_3^{\text{benzeno, líquido}} (50^\circ \text{C}) + \Delta H_3^{\text{tolueno, líquido}} (50^\circ \text{C})$$

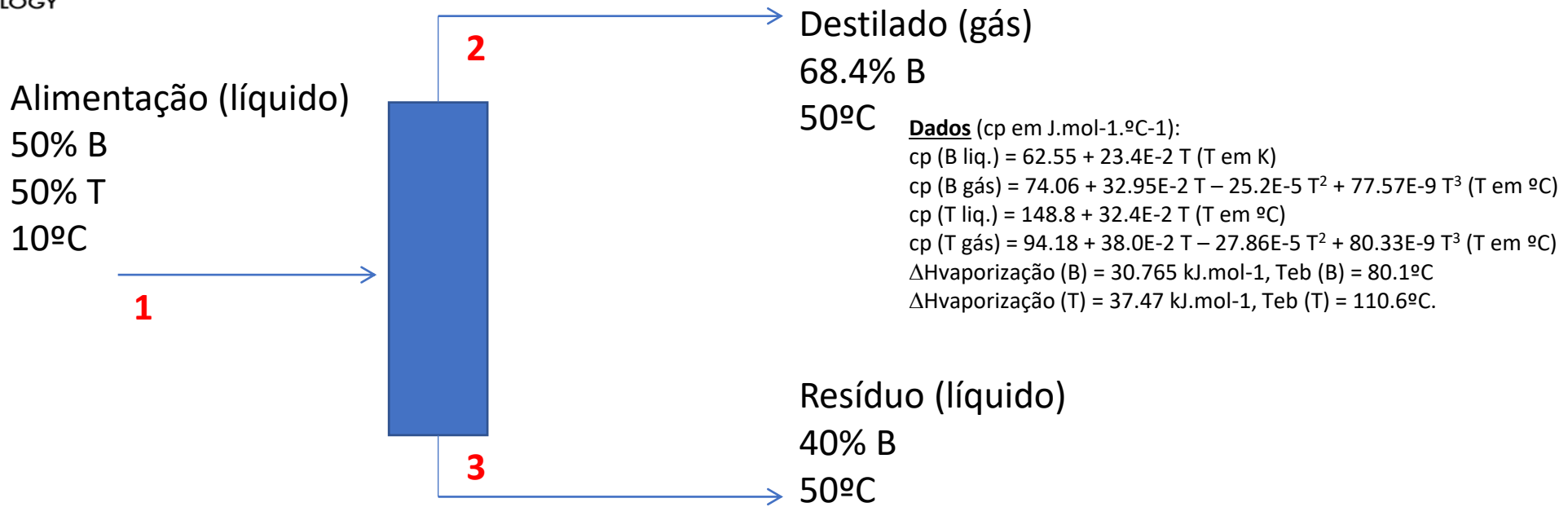
$$\Delta H_2 = \Delta H_2^{\text{benzeno, gasoso}} (50^\circ \text{C}) + \Delta H_2^{\text{tolueno, gasoso}} (50^\circ \text{C})$$

$$\int x^n = \frac{x^{n+1}}{n+1}$$



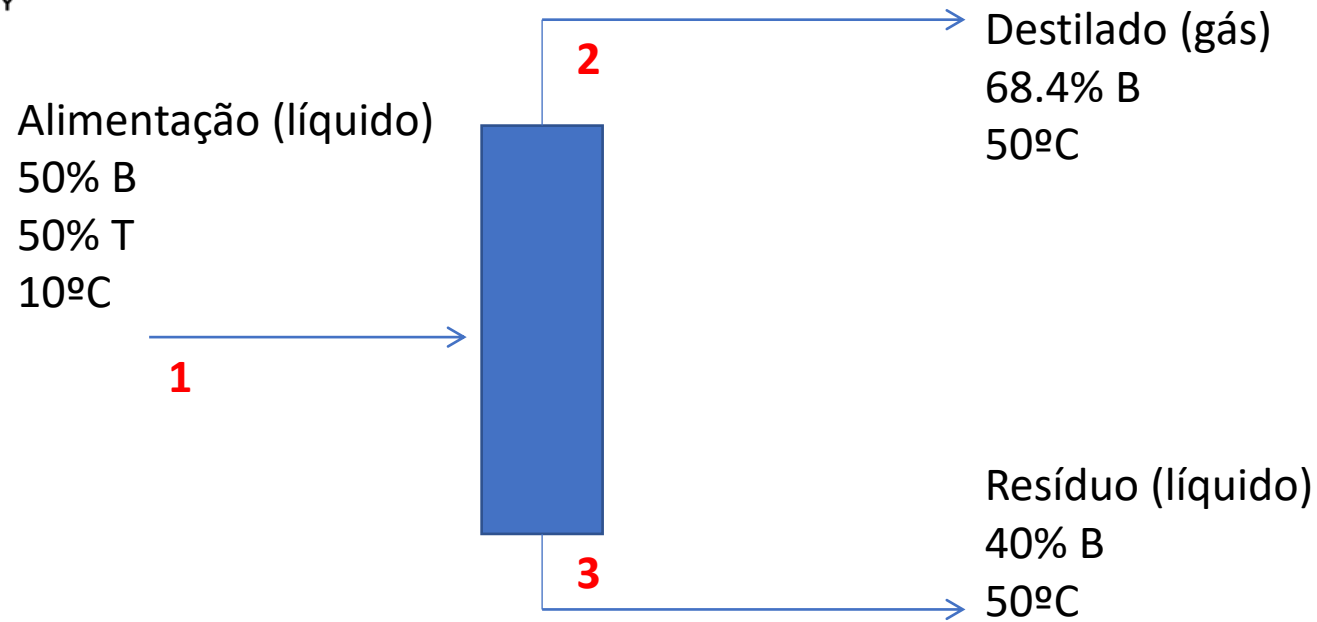
$$\Delta \hat{H}_3^{\text{benzeno, liquido}} (50^\circ \text{C}) = \int_{T_{\text{ref}}}^{50} C_{p, B \text{ liquido}} \cdot dT = 5332 \text{ J} / \text{mol}$$

$$\Delta \hat{H}_3^{\text{tolueno, liquido}} (50^\circ \text{C}) = \int_{10^\circ \text{C}}^{50^\circ \text{C}} C_{p, T \text{ liquido}} \cdot dT = 6348 \text{ J} / \text{mol}$$



$$\Delta \hat{H}_2^{\text{benzeno, gasoso}} (50^\circ \text{C}) = \int_{10^\circ \text{C}}^{80,1^\circ \text{C}} C_{p, B \text{ liquido}} \cdot dT + \Delta \hat{H}_{\text{vaporização}}^{80,1^\circ \text{C}} + \int_{80,1^\circ \text{C}}^{50^\circ \text{C}} C_{p, B \text{ gas}} \cdot dT$$

$$\Delta \hat{H}_2^{\text{benzeno, gasoso}} (50^\circ \text{C}) = 37520 \text{ J} / \text{mol}$$



$$\Delta \hat{H}_2^{tolueno, gasoso} (50^\circ C) = \int_{10^\circ C}^{110,62^\circ C} C_{p,T \text{ liquido}} .dT + \Delta \hat{H}_{vaporização}^{110,62^\circ C} + \int_{110,62^\circ C}^{50^\circ C} C_{p,T \text{ gas}} .dT$$

$$\Delta \hat{H}_2^{tolueno, gasoso} (50^\circ C) = 42930 J / mol$$

$$0 + Q = n_2 \times \Delta \hat{H}_2 + n_3 \times \Delta \hat{H}_3$$

$$\Delta \hat{H}_2^{\text{benzeno, gasoso}} (50^\circ \text{C}) = 37520 \text{ J} / \text{mol}$$

$$\Delta \hat{H}_2^{\text{tolueno, gasoso}} (50^\circ \text{C}) = 42930 \text{ J} / \text{mol}$$

$$\Delta \hat{H}_3^{\text{benzeno, líquido}} (50^\circ \text{C}) = 5332 \text{ J} / \text{mol}$$

$$\Delta \hat{H}_3^{\text{tolueno, líquido}} (50^\circ \text{C}) = 6348 \text{ J} / \text{mol}$$

	1	2	3
B	50	24.1	25.9
T	50	11.1	38.9
Total	100	35.2	64.8

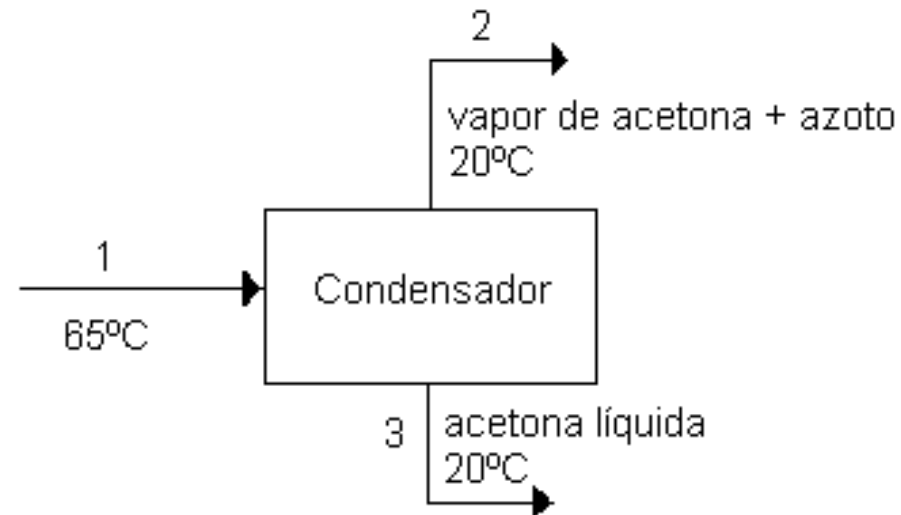
$$Q = [n_2^B \times \Delta \hat{H}_2^B + n_2^T \times \Delta \hat{H}_2^T] + [n_3^B \times \Delta \hat{H}_3^B + n_3^T \times \Delta \hat{H}_3^T]$$

$$Q = [24.1 \times 37520 + 11.1 \times 42930] + [25.9 \times 5332 + 38.9 \times 6340]$$

$$Q = 1765 \text{ kJ}$$

5.15.

Uma corrente gasosa contendo 66.9% molar de acetona (o restante é azoto) é introduzida num condensador para remoção parcial da acetona. Sabendo que 64% da quantidade de acetona presente na corrente gasosa é liquefeita no condensador (e retirada via corrente 3) calcule o calor que é necessário retirar ao processo por cada 100 moles de gás alimentado ao condensador.



Dados:

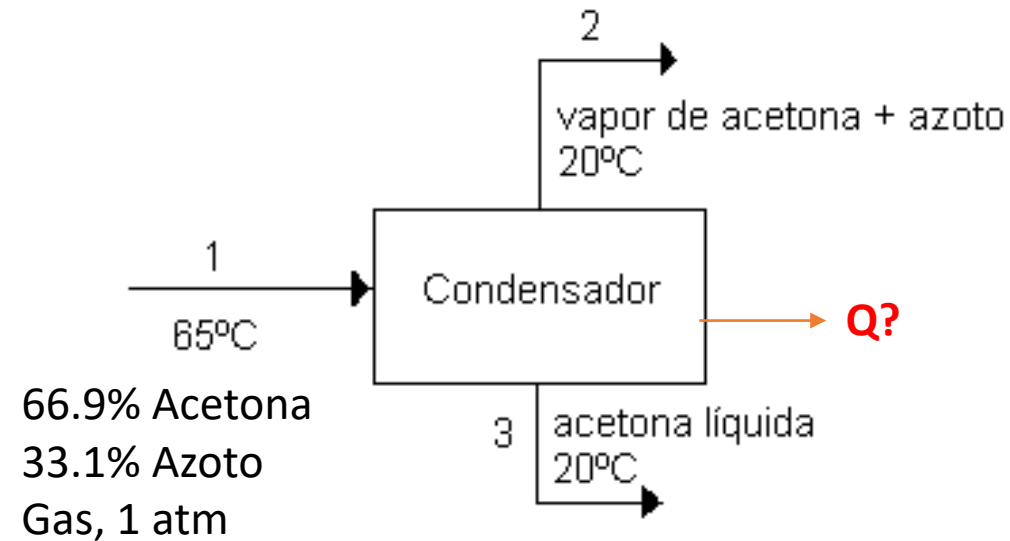
Calores específicos ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$); temperatura em $^{\circ}\text{C}$:

Acetona, gás: $0.07196 + 20.1 \times 10^{-5} T$

Acetona, líquida: $0.123 + 18.6 \times 10^{-5} T$

Azoto, gás: $0.029 + 0.22 \times 10^{-5} T$

Calor de vaporização normal da acetona a 56°C : $30.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$



	1	2	3
Acetona	66.9	24.1	42.8
inerte Azoto	33.1	33.1	-
Total	100	57.2	42.8

Base de cálculo: 100 mol corrente 1

$$n_1 = n_2 + n_3$$

$$n_{Acet3} = 0.64 \times 66.9 = 42.8$$

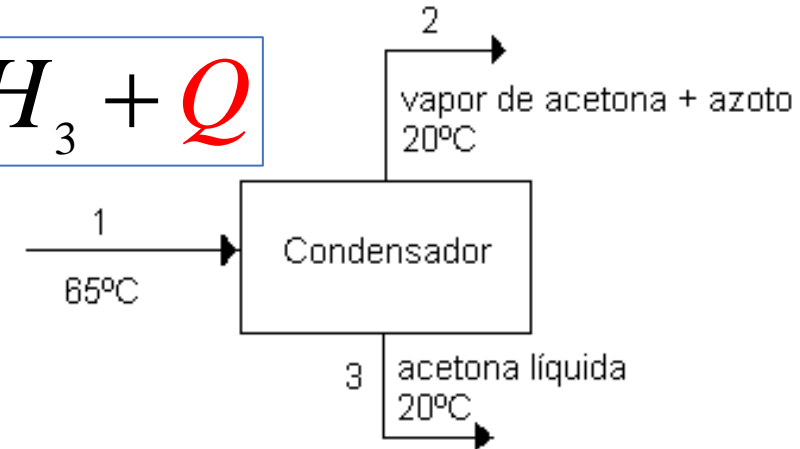
$$n_{Acet2} = 66.9 - 42.8 = 24.1$$

$$n_2 = 100 - 42.8 = 57.2$$

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H_3 + Q$$

P=1 atm
T=20°C
Estado gasoso

$$\Delta H_2 = 0 KJ$$



Dados:

Calores específicos (kJ.mol⁻¹.°C⁻¹); temperatura em °C:

Acetona, gás: 0.07196 + 20.1×10⁻⁵ T

Acetona, líquida: 0.123 + 18.6×10⁻⁵ T

Azoto, gás: 0.029 + 0.22×10⁻⁵ T

Calor de vaporização normal da acetona a 56°C: 30.2 kJ.mol⁻¹

$$\Delta H_1 = \int_{20}^{65} (66.9 \times Cp_{Acet}^g + 33.1 \times Cp_{N_2}) dT \quad \Delta H_1 = 259.8 KJ$$

$$\Delta H_3 = \left[\int_{20}^{56} Cp_{Acet}^g dT - \overbrace{\Delta H_{vap}^{56^\circ}}^{\Delta H_{condensação}} + \int_{56}^{20} Cp_{Acet}^l dT \right] \times 42.8 \quad \Delta H_3 = -1371.2 KJ$$

$$Q = 1631 KJ$$

$$\int x^n = \frac{x^{n+1}}{n+1}$$