

Introdução à Engenharia Química e Bioquímica
ENUNCIADO DOS PROBLEMAS

V. Balanços de Energia

1. Calcule a energia cinética, em joules por segundo, de uma corrente de água fluindo com um caudal de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ num tubo com 2 cm de diâmetro interno.
($1\text{N} = 1 \text{ kg m/s}^2$)
2. Bombeia-se petróleo de uma profundidade de 220 m abaixo da superfície da Terra até uma altura de 20 m acima da superfície, a um caudal de 15 kg/s. Calcule a variação de energia potencial associada a este processo. Qual a potência mínima da bomba a usar?
($1\text{N} = 1 \text{ kg m/s}^2$)
3. A energia interna e o volume molar específicos do hélio a 300K e 1 atm são 3800 J/mol e 24.63 L/mol, respectivamente. Calcule a entalpia específica do hélio nas condições anteriores.
 $0.08206 \text{ L.atm}/(\text{mol.K}) = 8.314 \text{ J}/(\text{mol.K})$
4. Uma dada cascata de água tem um caudal descendente de $417 \text{ m}^3/\text{min}$ com um desnível de 100 m. Se se colocar uma central hidroelétrica no fundo da cascata estime a potência máxima que espera obter se usar toda a massa de água descendente?
5. Uma turbina é accionada pela passagem de 500 kg/h de vapor. O vapor entra na turbina a 44 bar e 450 °C, com uma velocidade linear de 60 m/s, saindo da turbina 5 m abaixo do ponto de entrada, a 1 bar e com uma velocidade linear de 360 m/s. A turbina desenvolve uma potência de 700 kW. As perdas de calor são aproximadamente de 104 kcal/h. calcule a variação de entalpia associada ao processo.
6. Vapor a 10bar e 370 °C é alimentado a uma turbina operando adiabaticamente, a um caudal de 2000 kg/h. O efluente da turbina é vapor saturado a 1 bar. Calcule o trabalho realizado pela turbina em kW. Despreze eventuais variações de energia cinética e potencial.
 \hat{H} (vapor, 10bar, 370 °C) = 3201 kJ/kg; \hat{H} (vapor saturado, 1bar) = 2675 kJ/kg

7. Mistura-se adiabaticamente 1000 kg/h de vapor a 1bar e 100 °C com 1950 kg/h de vapor a 1 bar e 400 °C. O vapor resultante sai do misturador a 1bar e 300 °C. desprezando as variações de energia cinética e potencial calcule a entalpia da corrente de vapor final, em kJ/h.

$$\Delta \hat{H} (\text{vapor, 1bar, 100 } ^\circ\text{C}) = 2675 \text{ kJ/kg}; \Delta \hat{H} (\text{vapor, 1bar, 400 } ^\circ\text{C}) = 3278 \text{ kJ/kg}$$

8. 1 kg de uma corrente gasosa contendo butano (40% p/p) e etano (60% p/p) é aquecida a 1atm de 70°F a 220 °F. Desprezando as variações de energia cinética e potencial calcule a quantidade de calor que é necessário fornecer ao sistema

Dados:

	$\Delta \hat{H}$ (kcal/kg)	
T (°F)	Butano	Etano
70	80.17	93.67
220	117.41	132.0

9. Calcule o calor necessário para aquecer uma mole de ar de 400 a 1000°C a pressão constante (1 atm).

Dados:

$$c_p (\text{cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}) = 6.713 + 0.04697\text{E-}2 \text{ T (T em Kelvin, p=1 atm)}$$

10. 2,000 L (STP) / min de metano são aquecidos de 20 °C até uma dada temperatura. Sabendo que a quantidade de calor fornecida ao sistema pelo exterior foi de 12.9 kW, determine a temperatura de saída da corrente gasosa.

Dados:

$$c_p \text{ CH}_4 (\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}) = 19.87 + 5.021\text{E-}2 \text{ T (T em Kelvin, p=1 atm)}$$

11. Calcule o calor que é necessário fornecer a 10 g de gelo a 0°C, para o transformar em vapor a 150°C, num processo decorrendo à pressão atmosférica.

Dados:

$$c_p (\text{água líquida}) = 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C} = 18 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$c_p (\text{vapor de água}) = 8.22 + 0.15\text{E-}3 \text{ T (cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1})$$

$$\Delta H_{\text{fusão}} (\text{água, } 0^\circ\text{C, 1atm}) = 1436 \text{ cal.mol}^{-1}$$

$$\Delta H_{\text{vaporização}} (\text{água, } 100^\circ\text{C, 1atm}) = 9729 \text{ cal.mol}^{-1}$$

12. Pretende-se vaporizar 100 mol/h de n-hexano líquido, a pressão constante de 1bar. A temperatura inicial é de 25°C e a temperatura final de 300°C. Desprezando os efeitos da pressão no cálculo das entalpias calcule o calor que é necessário fornecer ao sistema.

Dados:

$$c_p (\text{hexano líquido}) = 51.6 \text{ cal/mol.}^\circ\text{C}$$

$$c_p (\text{hexano vapor}) = 1.657 + 13.19\text{E-}2 T \text{ (cal.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$$

$$\Delta H_{\text{vaporização}} (\text{hexano, } 68.7^\circ\text{C, } 1\text{ atm}) = 6921 \text{ cal.mol}^{-1}$$

13. No processo de fabrico do ácido glucónico o caldo de fermentação concentrado, com 20% em massa de ácido glucónico, é arrefecido num permutador de calor antes da sua posterior cristalização. É necessário arrefecer 2000Kg/h desse caldo desde 90°C até 6°C através da permuta de calor com 2700 Kg/h de água inicialmente a 2°C. Se a temperatura final da corrente de água for de 50°C, estime a quantidade de calor perdida pelo permutador de calor para o exterior.

Dados:

$$\Delta H (\text{água líquida a } 90^\circ\text{C}) = 376.9 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta H (\text{água líquida a } 6^\circ\text{C}) = 25.2 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta H (\text{água líquida a } 2^\circ\text{C}) = 8.4 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta H (\text{água líquida a } 50^\circ\text{C}) = 209.3 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$c_p (\text{ácido glucónico}) = 1.47 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{}^\circ\text{C}^{-1}$$

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 $\text{J.mol}^{-1}.\text{}^\circ\text{C}^{-1}$):

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

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

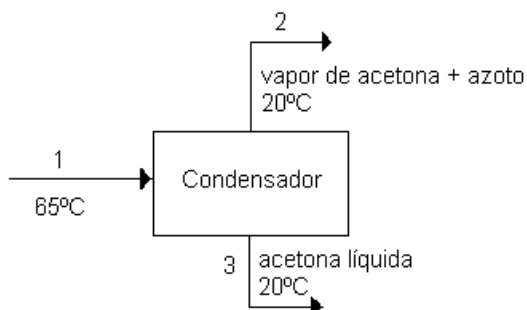
$$c_p (\text{T liq.}) = 148.8 + 32.4\text{E-}2 T \text{ (T em }^\circ\text{C)}$$

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

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

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

15. Uma corrente gasosa contendo 66.9% molar de acetona (e o restante 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 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 $^{\circ}\text{C}$:

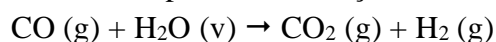
Acetona, gás: $0.07196 + 20.1 \times 10^{-5} T$

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 : $30.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

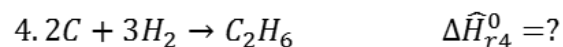
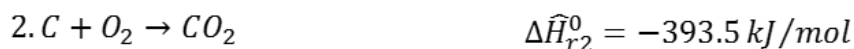
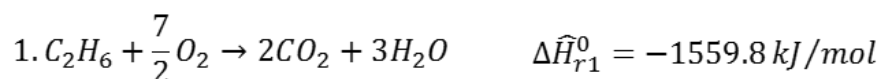
16. Usando a lei de Hess calcule o calor padrão da reacção



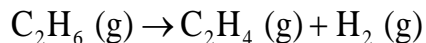
Recorra para tal aos seguintes dados:

- | | |
|--|---|
| a) $\text{CO (g)} + \text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)} + \text{H}_2 \text{ (g)}$ | $\Delta \hat{H}_r^{\circ} = +1226 \text{ Btu/lbm-mol}$ |
| $\text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O (v)}$ | $\Delta \hat{H}_r^{\circ} = +18,935 \text{ Btu/lbm-mol}$ |
| b) $\text{CO (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)}$ | $\Delta \hat{H}_r^{\circ} = -121,740 \text{ Btu/lbm-mol}$ |
| $\text{H}_2 \text{ (g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{H}_2\text{O (v)}$ | $\Delta \hat{H}_r^{\circ} = -104,040 \text{ Btu/lbm-mol}$ |

17. Através das reacções em baixo calcular o calor de reacção da reacção 4



18. Calcule o calor padrão da seguinte reacção:



- (a) Usando os calores de formação;
 (b) Usando os calores de combustão.

Dados:

	$\Delta H_f^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H_c^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
$\text{C}_2\text{H}_6 (\text{g})$	-84.67	-1559.9
$\text{C}_2\text{H}_4 (\text{g})$	+52.88	-1410.99
$\text{H}_2 (\text{g})$	0	-285.84

19. Na literatura estão tabelados os seguintes valores para o calor de formação padrão do propano,

$$\Delta \hat{H}_f^\circ = -119.8 \text{ kJ/mol para o propano líquido}$$

$$\Delta \hat{H}_f^\circ = -103.8 \text{ kJ/mol para o propano gasoso}$$

Qual o significado físico da diferença entre estes dois valores? Justifique.

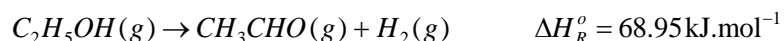
20. Calcule o calor de formação do etano gasoso com base nos seguintes valores,

$$\Delta \hat{H}_c^\circ (\text{C}_2\text{H}_6 \text{ g}) = -1559.8 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta \hat{H}_f^\circ (\text{CO}_2 \text{ g}) = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta \hat{H}_f^\circ (\text{H}_2\text{O l}) = -285.8 \text{ kJ/mol}$$

21. Num reactor adiabático produz-se acetaldeído a partir de etanol segundo a reacção:



A temperatura da alimentação é de 300 °C e a temperatura final de 112 °C. Calcule a conversão da reacção química nessas condições.

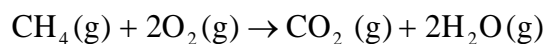
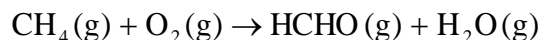
Dados: calores específicos médios, entre 25°C e 300°C

$$c_p (\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}, \text{g}) = 0.11 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$c_p (\text{H}_2, \text{g}) = 0.029 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$c_p (\text{CH}_3\text{CHO}, \text{g}) = 0.08 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

22. Num reactor contínuo produz-se formaldeído por oxidação do metano com ar. Simultaneamente dá-se a oxidação do metano:



A conversão do metano é de 30% na primeira reacção e de 10% na segunda reacção. A alimentação do reactor é feita de modo a ter uma razão molar de 1:1 entre o metano e o oxigénio. Sabe-se que o metano é alimentado a 25°C e o ar a 100°C. Calcule a quantidade de calor a fornecer ou a retirar ao sistema quando a temperatura de corrente efluente é de 150°C.

Dados: calores específicos médios, entre 25°C e T(°C)

$$c_p(\text{O}_2, 100^\circ\text{C}) = 7.083 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{N}_2, 100^\circ\text{C}) = 6.972 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{O}_2, 150^\circ\text{C}) = 7.132 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{N}_2, 150^\circ\text{C}) = 6.984 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{CH}_4, 150^\circ\text{C}) = 9.30 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{CO}_2, 150^\circ\text{C}) = 9.48 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{H}_2\text{O}, 150^\circ\text{C}) = 8.13 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$c_p(\text{HCHO}, 150^\circ\text{C}) = 9.08 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

Calores de formação padrão:

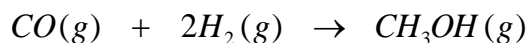
$$\Delta H_f^\circ(\text{HCHO}(\text{g})) = -27.7 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{g})) = -57.8 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

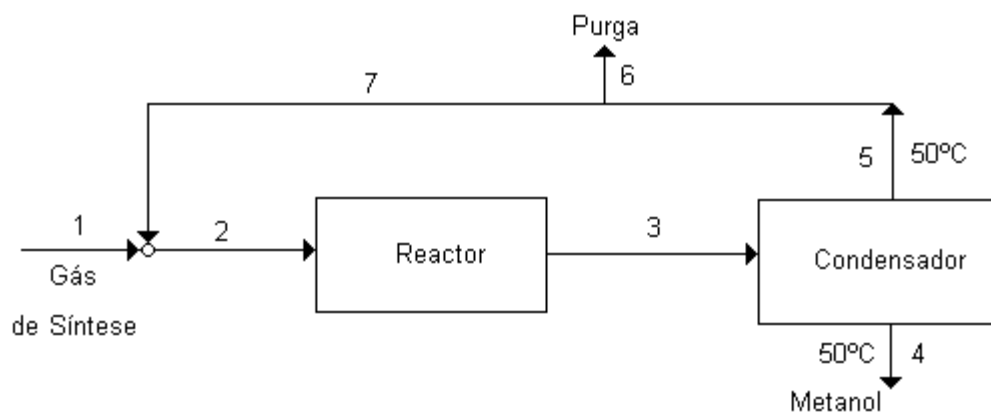
$$\Delta H_f^\circ(\text{CH}_4(\text{g})) = -17.89 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^\circ(\text{CO}_2(\text{g})) = -94.05 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

23. O gás de síntese, à temperatura de 25°C, é constituído por CO e H₂, na proporção molar de 1:2 e ainda por 1% molar de N₂, como inerte. A alimentação ao reactor é constituída pelo gás de síntese e pelo gás de reciclo, proveniente do condensador. No reactor forma-se metanol segundo a reacção:



A corrente efluente do reactor é alimentada a um condensador, obtendo-se uma corrente líquida constituída apenas por metanol e uma corrente gasosa constituída pelo CO, H₂ e N₂. A corrente gasosa é reciclada.



- Estabeleça o balanço material do processo, considerando que a purga tem 4% molar de N₂ e que a fracção de purga (i.e., ⑥/⑤) é igual a 0.25.
- Considerando o reactor adiabático, calcule a temperatura da corrente efluente do reactor.
- Calcule a quantidade de calor que o condensador troca com o exterior.

Dados:

- calores específicos médios (entre 25 e 50°C):

$$C_p \text{ H}_2 \text{ (g)} = 7.083 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$C_p \text{ CO (g)} = 7.132 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$C_p \text{ N}_2 \text{ (g)} = 6.972 \text{ cal.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$C_p \text{ CH}_3\text{OH (g)} = 42.93 \text{ J.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

$$C_p \text{ CH}_3\text{OH (líq.)} = 82.6 \text{ J.mol}^{-1}.\text{°C}^{-1}$$

- calores de formação padrão:

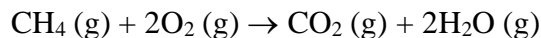
$$\Delta H_f^\circ \text{ (CH}_3\text{OH) gasoso} = -201.2 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\Delta H_f^\circ \text{ (CO) gasoso} = -110.52 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

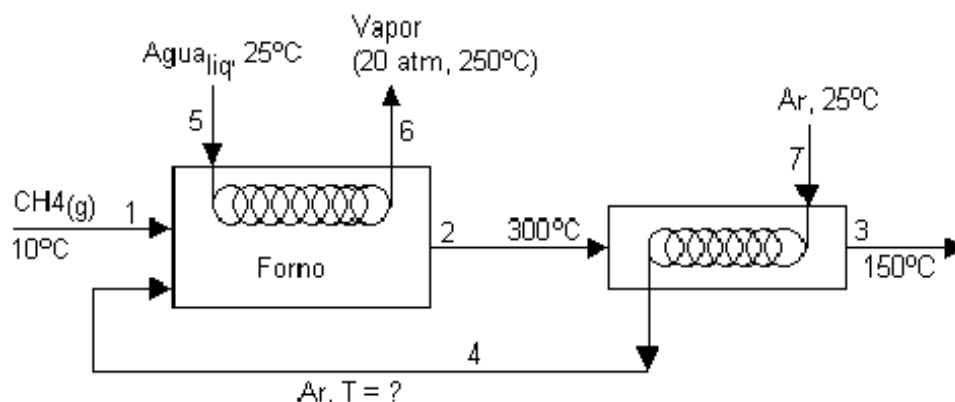
- calor de vaporização do metanol:

$$\Delta H_{\text{vap.}} \text{ a 1 atm; temp. de ebulição normal (64.7°C)} = 35.27 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

24. Numa caldeira industrial metano é completamente queimado com um excesso de O_2 (excesso de 25%). O calor assim libertado é aproveitado para a produção de vapor de água sobreaquecido.



Os gases de combustão, que saem do forno a $300^\circ C$, são alimentados a um permutador de calor para aquecer o ar alimentado ao forno da caldeira.



Sabendo que o caudal de alimentação de metano ao processo é de $45\ Kmol.h^{-1}$ calcule:

- a temperatura do ar alimentado ao forno.
- a quantidade de vapor produzido por hora.

Despreze as perdas de calor no sistema; Composição molar do ar = 79% N_2 + 21% O_2 .

Dados:

$$C_p\ CH_4(g) = 10\ cal.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_p\ O_2(g) = 7.3\ cal.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_p\ CO_2(g) = 10.1\ cal.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_p\ H_2O(l) = 18\ cal.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_p\ N_2(g) = 7.04\ cal.mol^{-1}.K^{-1}$$

$$C_p\ H_2O(g) = 0.54\ cal.g^{-1}.K^{-1}$$

$$\Delta H_{vap.}(H_2O)\ a\ 1\ atm;\ temp.\ de\ ebulição\ normal = 9.72\ Kcal.mol^{-1}$$

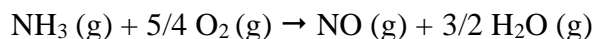
$$\Delta H_f^\circ(CH_4)\ gasoso = -17.89\ kcal.mol^{-1}$$

$$\Delta H_f^\circ(CO_2)\ gasoso = -94.05\ kcal.mol^{-1}$$

$$\Delta H_f^\circ(H_2O)\ gasoso = -57.8\ kcal.mol^{-1}$$

25. A um reactor de combustão alimentam-se 100 mol/h de NH_3 e 200 mol/h de O_2 a uma temperatura de 25 °C e à pressão atmosférica. A conversão é de 100%. Os gases efluentes do reactor estão a 300 °C.

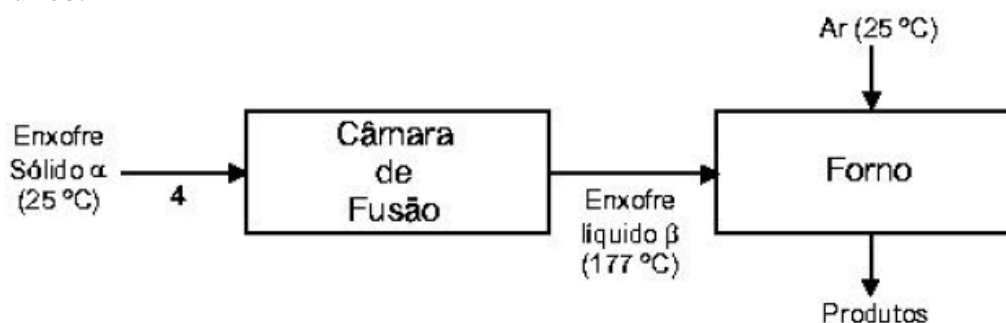
Calcule o calor que é necessário fornecer ou retirar ao sistema, assumindo a pressão como constante.



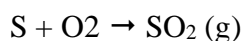
Dados:

	NH_3	O_2	NO	H_2O
ΔH°_f (kJ.mol ⁻¹)	46.19	0	90.37	-241.83
C_p (J.mol ⁻¹ K ⁻¹)	8.45	7.29	7.25	8.22

26. A figura junta representa as duas unidades iniciais do processo de produção do ácido sulfúrico.



À câmara de fusão são alimentados 100 kg/h de enxofre (sólido alfa). Depois de liquefeito o enxofre é queimado com um excesso de 50% de ar, sendo a conversão do enxofre total:



Para uma base de cálculo de 1 hora de operação, calcule:

- a) A quantidade de calor que é necessário fornecer à câmara de fusão, sabendo que se dão as seguintes mudanças de fase

sólido alfa → sólido beta a 368.6K

sólido beta → líquido a 392K

- b) a temperatura à saída do forno, considerando que a quantidade de calor perdida através das paredes do forno é de 90×10^3 kcal/h.

Dados

Calor padrão da reacção: -70.96 kcal/mol

Calores de mudança de fase, à temperatura de transição:

Sólido alfa → sólido beta: 0.088 kcal/mol

Sólido beta → líquido: 0.293 kcal/mol

Calores específicos médios do enxofre (cal/mol.K):

Sólido alfa: 3.58; sólido beta: 3.56; líquido: 5.40

Massa molecular do enxofre: 32 g/mol

Calores específicos médios (cal/mol.K)

N₂: 7.369; O₂: 7.792; SO₂: 11.84