

Introdução à Engenharia Química e Bioquímica

Aula 2 Balanços Energéticos
MIEQB
ano lectivo de 2020/2021

Sumário da aula

Balancos energéticos a sistemas não reactivos

- (Balanço de energia a um sistema aberto.
Entalpia)
- Estado de referência e propriedades de estado
- Variações entálpicas associadas a processos
químicos

Equação de conservação de energia

- Os balanços de energia são equações que traduzem o princípio da conservação de energia para um determinado sistema (1º Princípio da Termodinâmica)

$$\begin{array}{ccccccc} \boxed{\begin{array}{c} \text{Transferência de} \\ \text{energia para o} \\ \text{sistema através da} \\ \text{fronteira} \end{array}} & + & \boxed{\begin{array}{c} \text{Geração de} \\ \text{energia dentro} \\ \text{do sistema} \end{array}} & - & \boxed{\begin{array}{c} \text{Transferência de} \\ \text{energia do} \\ \text{sistema através} \\ \text{da fronteira} \end{array}} & - & \\ & & & & & & \\ & - & \boxed{\begin{array}{c} \text{Consumo de} \\ \text{energia dentro} \\ \text{do sistema} \end{array}} & = & \boxed{\begin{array}{c} \text{Acumulação} \\ \text{de energia no} \\ \text{sistema} \end{array}} & & \end{array}$$

Possíveis formas de energia de um dado sistema

- Energia Cinética: $E_c = \frac{1}{2} m u^2$
- Energia Potencial: $E_p = m g h$
- Energia Interna: U
- Calor: Q (“+” quando transferido da vizinhança para o sistema)
- Trabalho: W (“+” quando feito no sistema pela vizinhança)
IUPAC
 (“+” quando feito pelo sistema à vizinhança)
FELDER E ROUSSEAU

Balanço de energia a um sistema aberto

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

i.e. a velocidade à qual a energia é transferida para o sistema (na forma de calor e/ou de trabalho) é igual à diferença entre as velocidades de transporte de energia a entrar e a sair do sistema

Balanço de energia a um sistema aberto

$$\Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

- Não existem partes móveis no sistema $\dot{W}_s = 0$
- As velocidades de todas as correntes são iguais $\Delta\dot{E}_c = 0$
- Todas as correntes entram e saem à mesma altura $\Delta\dot{E}_p = 0$



$$\Delta\dot{H} = \dot{Q}$$

Importância da entalpia, H!

Balanço de energia a um sistema aberto

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

- Não existem partes móveis no sistema $\dot{W}_s = 0$
- As velocidades de todas as correntes são iguais $\Delta \dot{E}_c = 0$
- Todas as correntes entram e saem à mesma altura $\Delta \dot{E}_p = 0$



$$\Delta \dot{H} = \dot{Q}$$

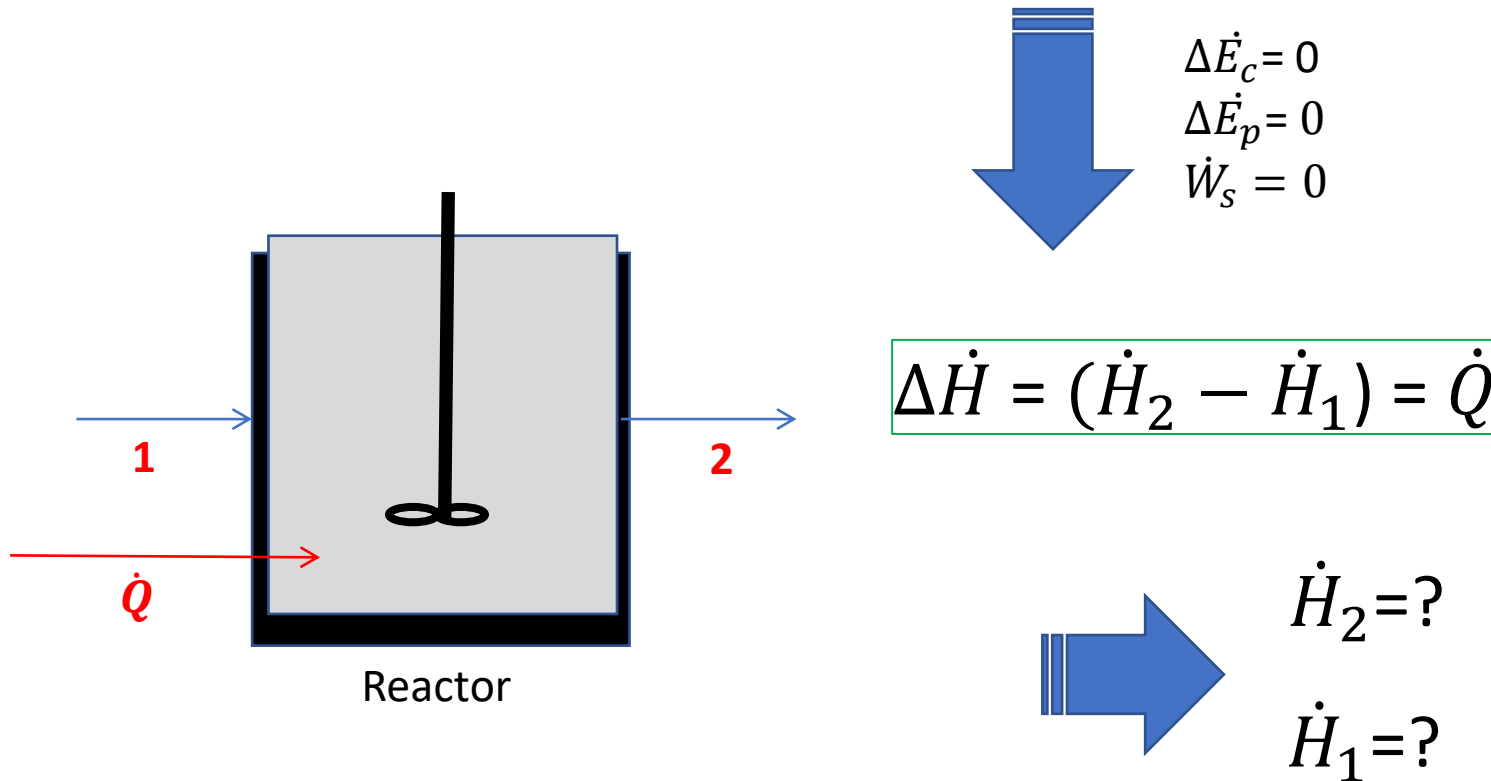
- Sistema adiabático (não há trocas de calor com o exterior) $\dot{Q} = 0$



$$\Delta \dot{H} = 0$$

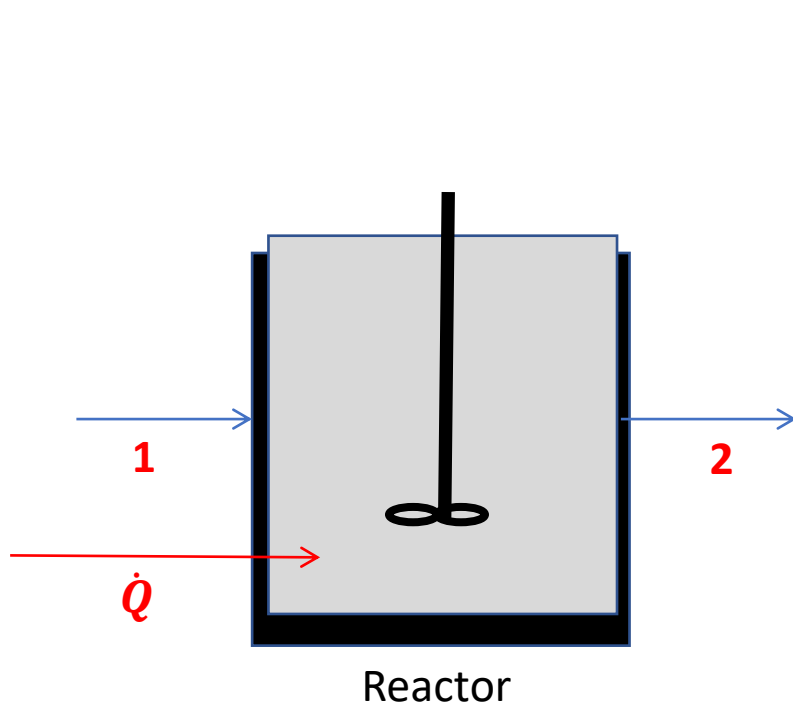
Balanço de energia a um Reactor

Energia que entra = Energia que sai



Balanço de energia a um Reactor

Energia que entra = Energia que sai



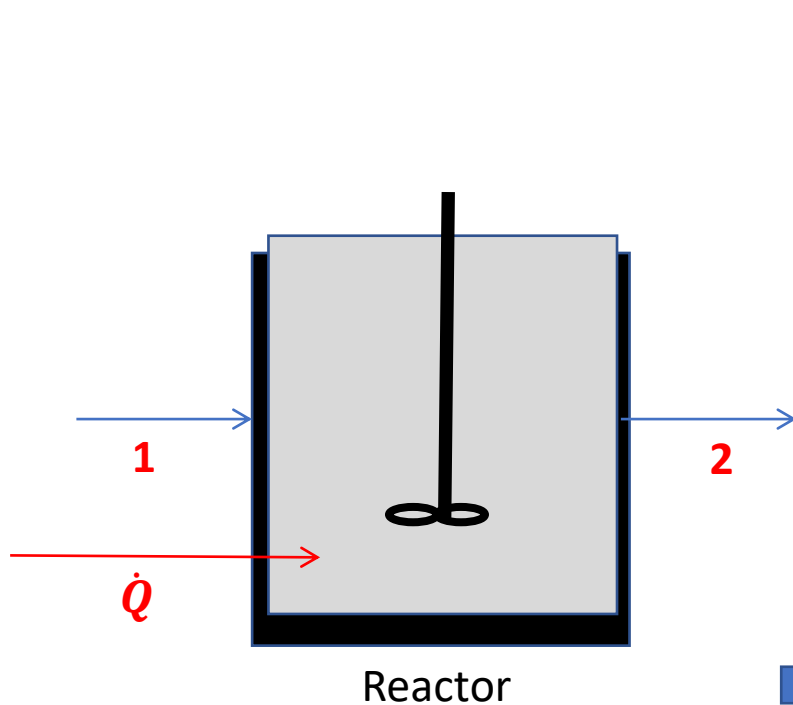
$$\Delta \dot{H} = (\dot{H}_2 - \dot{H}_1) = \dot{Q}$$

Não é possível
determinar o valor
absoluto de \dot{H}_1 e \dot{H}_2 !

O “zero” é inatingível!

Balanço de energia a um Reactor

Energia que entra = Energia que sai

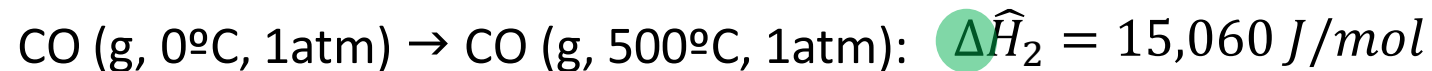
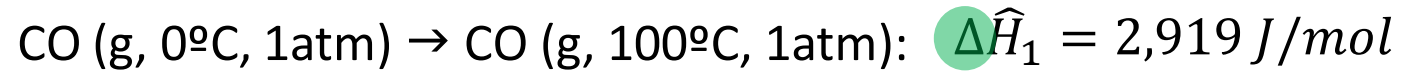


$$\Delta \dot{H} = (\dot{H}_2 - \dot{H}_1) = \dot{Q}$$

É possível determinar a variação
de \dot{H}
do estado termodinâmico 1 ao
estado termodinâmico 2

H é uma função de estado!

Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:

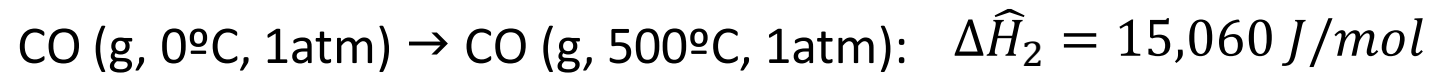
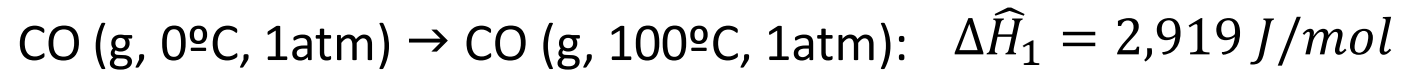


$\Delta\hat{H}_1$ e $\Delta\hat{H}_2$ não são valores absolutos!

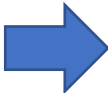
são valores relativos a um estado
de referência!

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

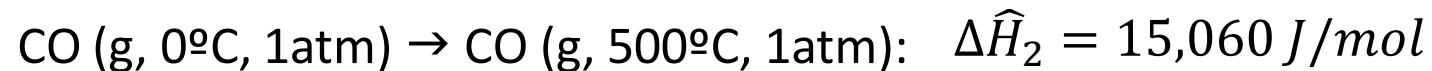
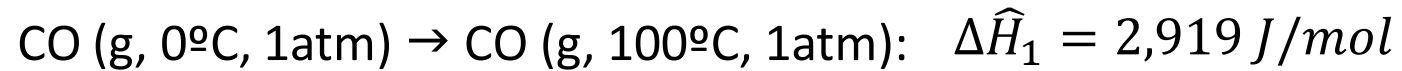
Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:



Estado de referencia “energético” do CO: $\hat{H}_0^{g, 0^\circ\text{C}, 1\text{atm}} = 0$


$$\begin{aligned}\Delta\hat{H}_1 &= \hat{H}_1 - \hat{H}_0 = \hat{H}_1 - 0 \equiv \hat{H}_1 \\ \Delta\hat{H}_2 &= \hat{H}_2 - \hat{H}_0 = \hat{H}_2 - 0 \equiv \hat{H}_2\end{aligned}$$

Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:



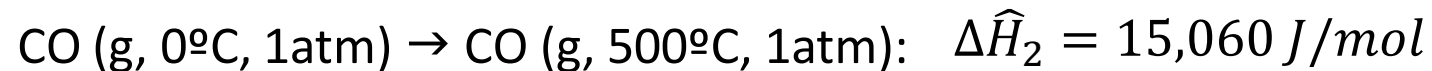
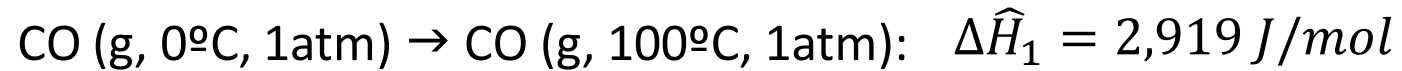
T (°C)	\hat{H} (J/mol)
0	0
100	2919
500	15060

$$\hat{H}_0^{g, 1atm, 0^\circ C} = 0$$



A entalpia do CO a 100°C e 1atm relativo ao estado de referência do CO a 0°C e 1 atm é de 2919 J/mol

Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:

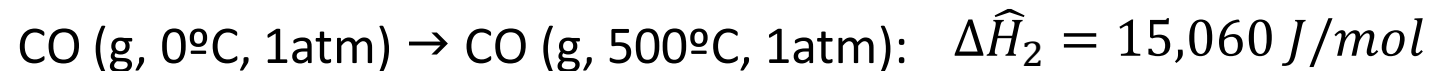
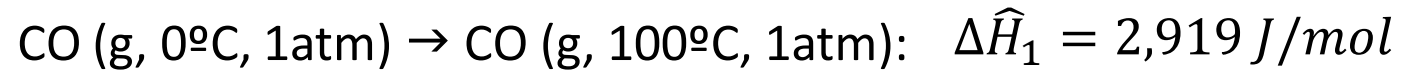


T (°C)	\hat{H} (J/mol)
0	0
100	2919
500	15060

$$\hat{H}_0^{g, 1atm, 0^\circ C} = 0$$

Mas assim os valores de entalpia dependerão sempre do estado de referencia escolhido! Ou não?

Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:

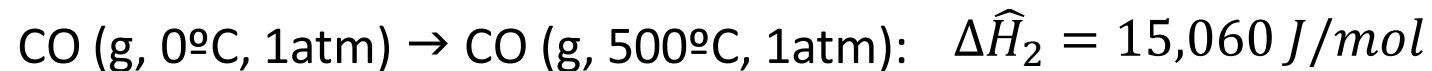
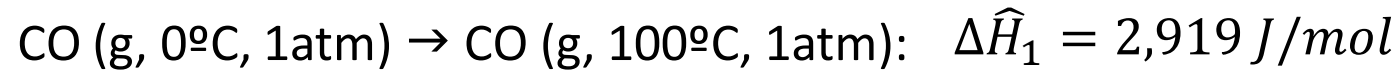


T (°C)	\hat{H} (J/mol)
0	0
100	2919
500	15060

$$\hat{H}_0^{g, 1atm, 0^\circ C} = 0$$

Na verdade, o importante em cálculos de engenharia são as variações de entalpia e não os seus valores absolutos!

Variações de entalpia associadas aos seguintes processos:



T (°C)	\hat{H} (J/mol)
0	0
100	2919
500	15060

H é uma função de estado!

$$\hat{H} = 0$$

$$\Delta\hat{H}_2 - \Delta\hat{H}_1 = (\hat{H}_2 - \hat{H}_0) - (\hat{H}_1 - \hat{H}_0) = \hat{H}_2 - \hat{H}_1 = 15,060 - 2,919 = 12,141 \text{ J/mol}$$



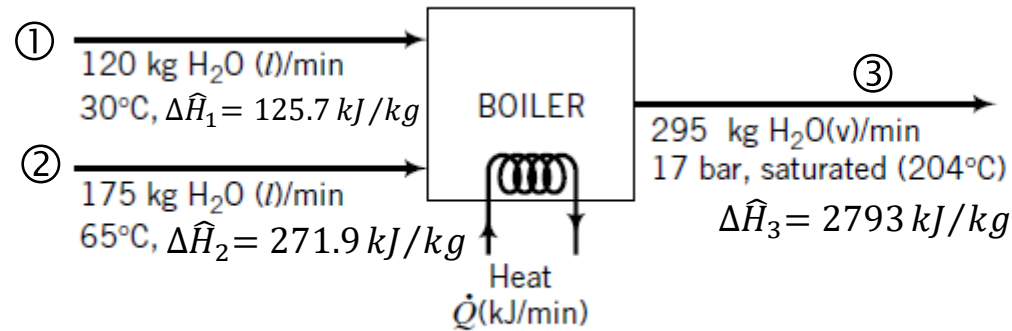
O valor final **NÃO** depende do estado de referência!

Procedimentos em balanços energéticos

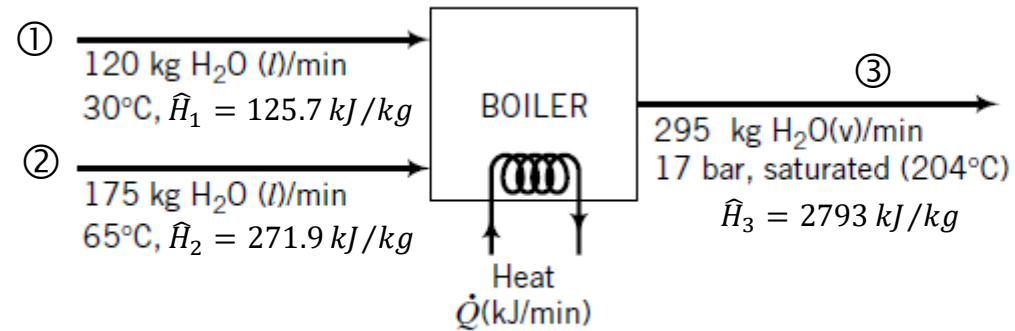
Indicar no diagrama esquemático:

- Condições de pressão e temperatura de cada corrente;
- Estado físico das substâncias em cada corrente

Balanço Energético a um sistema **não reactivo**, **um único componente**



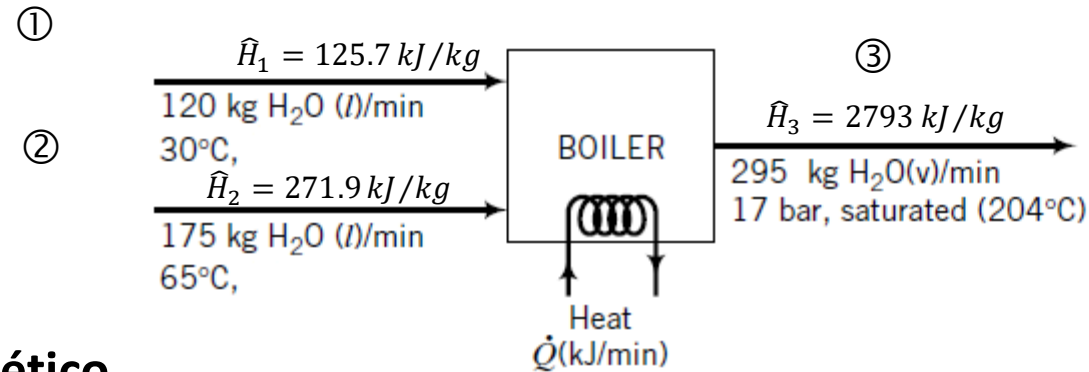
Energias cinética (E_c) e **potencial** (E_p) são normalmente desprezáveis quando comparadas com variações de entalpia associadas a processos com mudança de fase, reações químicas ou variações acentuadas de temperatura

Balanço energético a um sistema não reativo, um único componente**Balanço energético**

$$H_{entra} + Q = H_{saída}$$

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 + Q = \Delta H_3 \quad \Rightarrow \quad Q = \Delta H_3 - (\Delta H_1 + \Delta H_2)$$

Balanço energético a um sistema **não reactivo**, **um único componente**



Balanço energético

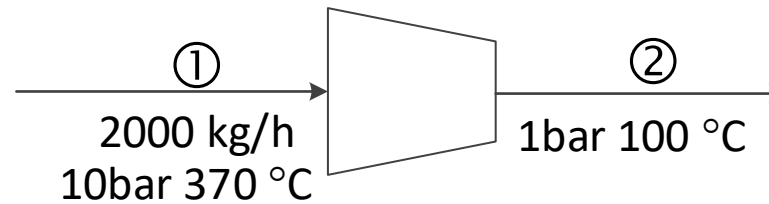
$$Q = \Delta H_3 - (\Delta H_1 + \Delta H_2)$$

$$Q = \left[295 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times 2793 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] - \left(\left[120 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times 125.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] + \left[175 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times 271.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \right)$$

$$Q = 7.61 \times 10^5 \text{ kJ / min}$$

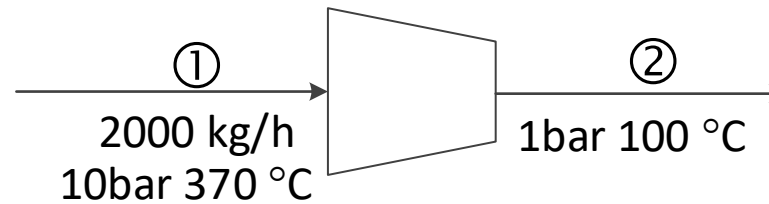
Vapor a 10bar e 370 °C é alimentado a uma turbina operando adiabaticamente, a um caudal de 2000 kg/h. O efluente da turbina é vapor saturado a 1 bar. Calcule o trabalho realizado pela turbina em kW. Despreze eventuais variações de energia cinética e energia potencial.

\hat{H} (vapor, 10bar, 370 °C) = 3201 kJ/kg; \hat{H} (vapor saturado, 1bar) = 2675 kJ/kg



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 energia potencial.

\hat{H} (vapor, 10bar, 370 °C) = 3201 kJ/kg; \hat{H} (vapor saturado, 1bar) = 2675 kJ/kg

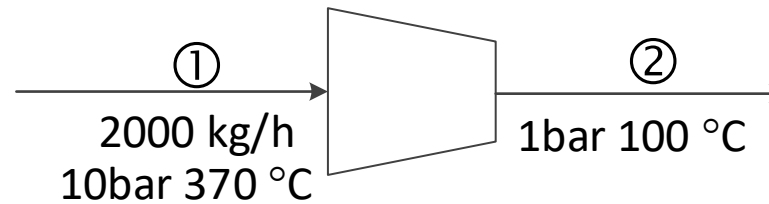


Resolução:

Estado de referência “energético” da água?

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 energia potencial.

$$\Delta\hat{H} \text{ (vapor, 10bar, 370 °C)} = 3201 \text{ kJ/kg}; \Delta\hat{H} \text{ (vapor saturado, 1bar)} = 2675 \text{ kJ/kg}$$



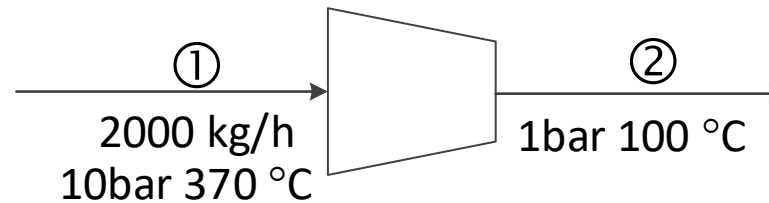
Resolução:

Estado de referencia “energético” da água: ponto triplo

$$\hat{H}_0^{l, 0.0061\text{bar}, 0.01^\circ\text{C}} = 0$$

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 energia potencial.

$$\Delta\hat{H} \text{ (vapor, 10bar, 370 °C)} = 3201 \text{ kJ/kg}; \Delta\hat{H} \text{ (vapor saturado, 1bar)} = 2675 \text{ kJ/kg}$$

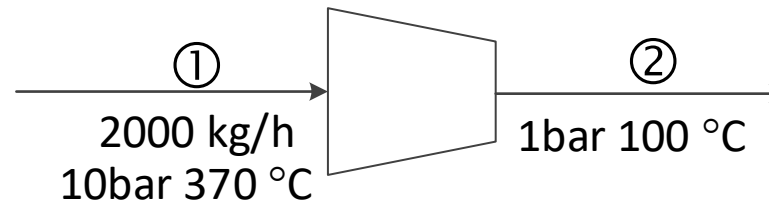


$$\Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s \Rightarrow \Delta\dot{H} = -\dot{W}_s$$

$$\Rightarrow \dot{W}_s = -(\Delta\dot{H}_2 - \Delta\dot{H}_1) = -\dot{m} \times (\Delta\hat{H}_2 - \Delta\hat{H}_1)$$

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 energia potencial.

$$\Delta\hat{H} \text{ (vapor, 10bar, 370 °C)} = 3201 \text{ kJ/kg}; \Delta\hat{H} \text{ (vapor saturado, 1bar)} = 2675 \text{ kJ/kg}$$



$$\dot{W}_s = -\dot{m} \times (\Delta\hat{H}_2 - \Delta\hat{H}_1)$$

$$\dot{W}_s = -(2000/3600)kg/s \times (2675 - 3201)kJ/kg$$

$$\dot{W}_s = 292 \text{ kJ/s} = 292 \text{ kW}$$

i.e., a turbina realiza 292 kW de trabalho para a vizinhança

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.

$\Delta\hat{H}$ (vapor, 1bar, 100 °C) = 2675 kJ/kg; $\Delta\hat{H}$ (vapor, 1bar, 400 °C) = 3278 kJ/kg; $\Delta\hat{H}$ (vapor, 1bar, 300 °C) = 3074 kJ/k



$$\Delta\dot{H} + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s \quad \Rightarrow \quad \Delta\dot{H} = 0$$

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

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.

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



$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \Delta H_3 \qquad \dot{m}_1 \Delta \hat{H}_1 + \dot{m}_2 \Delta \hat{H}_2 = \Delta H_3$$

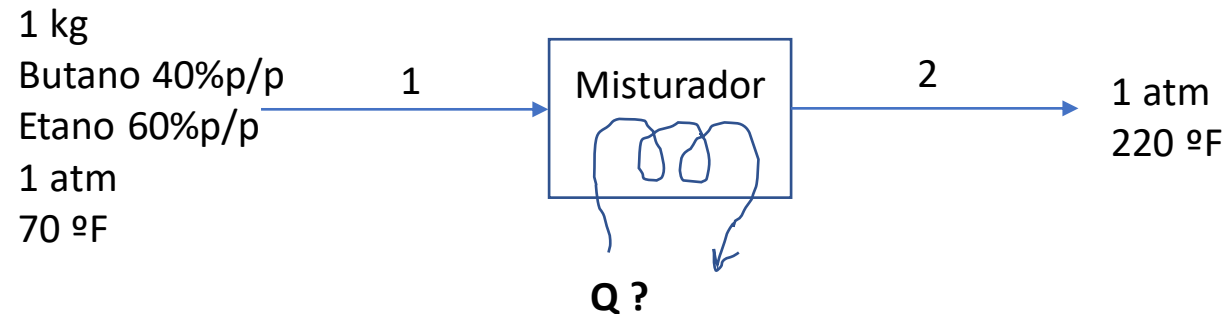
$$\left[1000 \frac{kg}{h} \times 2675 \frac{kJ}{kg} \right] + \left[1950 \frac{kg}{h} \times 3278 \frac{kJ}{kg} \right] = \Delta H_3$$

$$\Delta H_3 = 9.1 \times 10^6 kJ/h$$

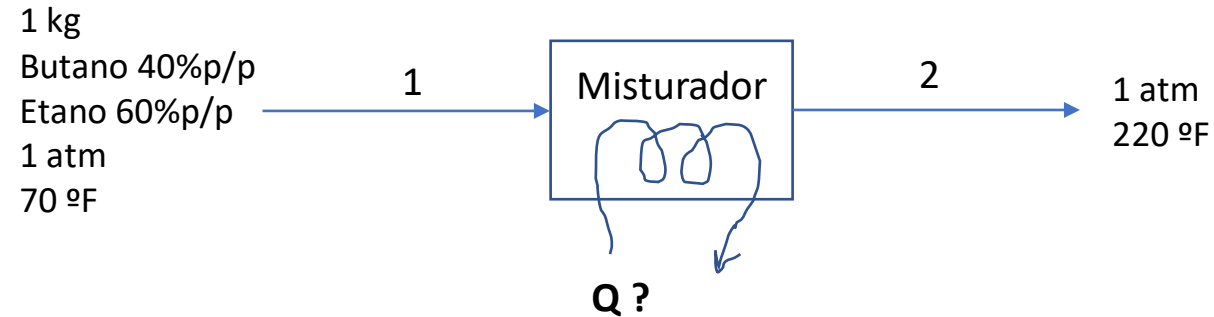
1 kg de uma corrente gasosa contendo butano (40% p/p) e etano (60% p/p) é aquecida a 1atm de 70°F a 220 °F. Desprezando as variações de energia cinética e potencial calcule a quantidade de calor que é necessário fornecer ao sistema

Dados:

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



5.8.



Base: 1 kg de mistura

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

$$Q = \Delta H_2 - \Delta H_1$$

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

$$Q = (0.4 \times 117.41 + 0.6 \times 132) - (0.4 \times 80.17 + 0.6 \times 93.67)$$

$$Q = 37.894 \text{ kcal}$$

É necessário fornecer 37.894 kcal por cada 1 kg de mistura