

# Introdução à Engenharia Química e Bioquímica

**Aula 4 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  $P, T$  constantes
5. Reacção química a  $P, T$  constantes


## 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  $P, T$  constantes
5. Reacção química a  $P, T$  constantes

## 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)


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

$C_P$ : Calor específico a pressão constante

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

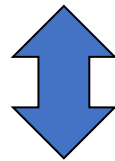
1. Variações de pressão a  $T$  e estado físico constantes
2. Variações de temperatura a  $P$  e estado físico constantes
3. Mudança de fase a  $p, T$  constantes
4. Mistura de dois líquidos ou solubilização de um gás ou sólido num líquido a  $T, P$  constantes
5. Reacção química a  $p, T$  constantes

## Operações com mudança de fase

**Table B.5** Properties of Saturated Steam: Temperature Table<sup>a</sup>

| $T(^{\circ}\text{C})$ | $P(\text{bar})$ | $\hat{H}(\text{kJ/kg})$ |             |       |
|-----------------------|-----------------|-------------------------|-------------|-------|
|                       |                 | 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!



Calor latente – variação de entalpia associada à transição de uma substância de uma fase para outra, a  $p, T$  constantes.

Calor latente de vaporização da água a 1atm e 100°C:

$$2676 \text{ kJ/kg} - 419.1 \text{ kJ/kg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

Condensação  Vaporização

Sendo a entalpia uma função de estado:

$$\begin{aligned}\text{Entalpia de condensação} &= - \text{entalpia de vaporização} \\ &= - 2257 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

**5.11.**

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:

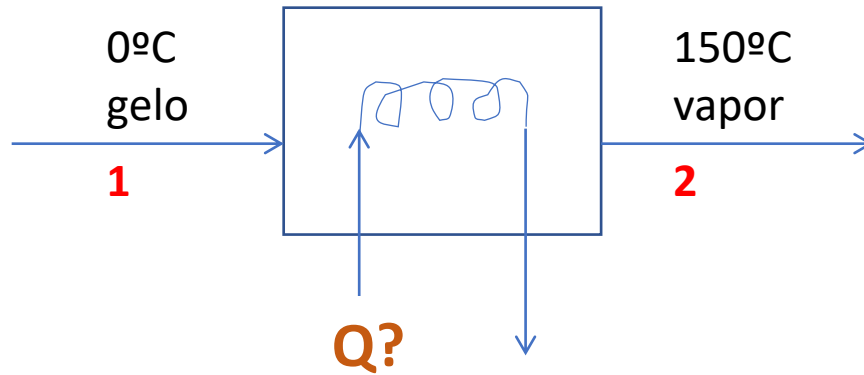
$$c_p (\text{água líquida}) = 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C} = 18 \text{ cal.mol}^{-1}.^\circ\text{C}^{-1}$$

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

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

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

$$10 \text{ g}_{\text{água}} \rightleftharpoons \frac{10\text{g}}{18\text{g/mol}} = 0.56 \text{ mol}_{\text{água}}$$



BALANÇO ENERGÉTICO

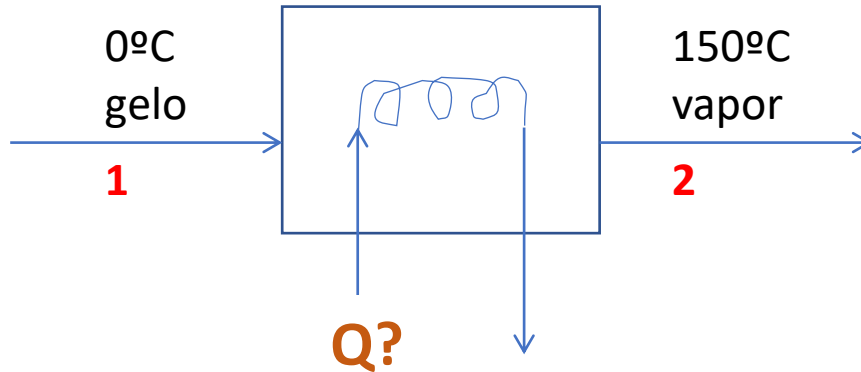
$$\Delta H_1 + Q = \Delta H_2$$

Estado de referência:  $T=0^\circ\text{C}$ ;  $P=1\text{ atm}$ ; estado físico: sólido

$$\Delta H_1 = 0 \quad \longrightarrow \quad Q = \Delta H_2$$

O gelo vai passar a estado líquido (fusão), depois vai passar a vapor

$$\Delta \hat{H}_2 = \Delta \hat{H}_{\text{fusão}}^{0^\circ\text{C}} + \int_{0^\circ\text{C}}^{100^\circ\text{C}} C_{p,\text{líquido}} \cdot dT + \Delta \hat{H}_{\text{vaporização}}^{100^\circ\text{C}} + \int_{100^\circ\text{C}}^{150^\circ\text{C}} C_{p,\text{gas}} \cdot dT$$



Dados:

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

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

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

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

$$Q = \Delta H_2$$

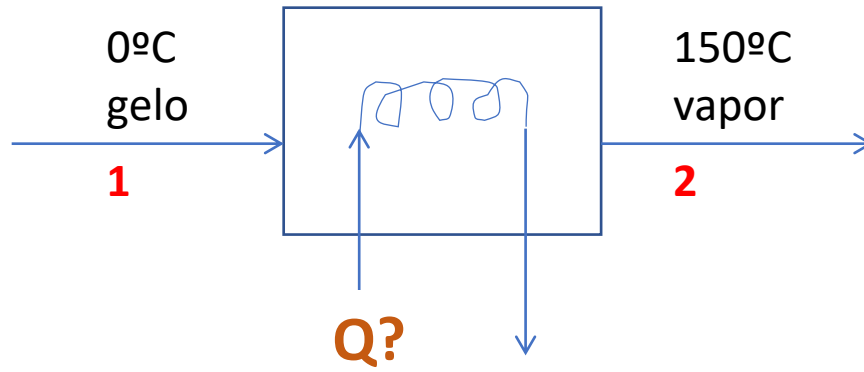
$$\Delta \hat{H}_2 = \Delta \hat{H}_{\text{fusão}}^{0^\circ\text{C}} + \int_0^{100} C_{p,\text{liquido}} \cdot dT + \Delta \hat{H}_{\text{vaporização}}^{100^\circ\text{C}} + \int_{373}^{423} C_{p,\text{gas}} \cdot dT$$

$$\Delta \hat{H}_2 = 1436 + 18 \times (100 - 0) + 9729 + 8.22 \times (423 - 373) + \frac{1}{2} \times 0.15 \times 10^{-3} \times (423^2 - 373^2)$$

$$\Delta \hat{H}_2 = 13.39 \times 10^3 \text{ cal/mol}$$

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

$$C_{p_{\text{vapor água}}} (\text{cal} / \text{mol.K}) = 8.22 + 0.15 \times 10^{-3} T$$



$$Q = \Delta H_2$$

$$Q = n_2 \times \Delta \hat{H}_2$$

$$Q = 0.56 \text{ mol} \times 13.39 \times 10^3 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$Q = 7.5 \text{ kcal}$$

**5.12.**

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.

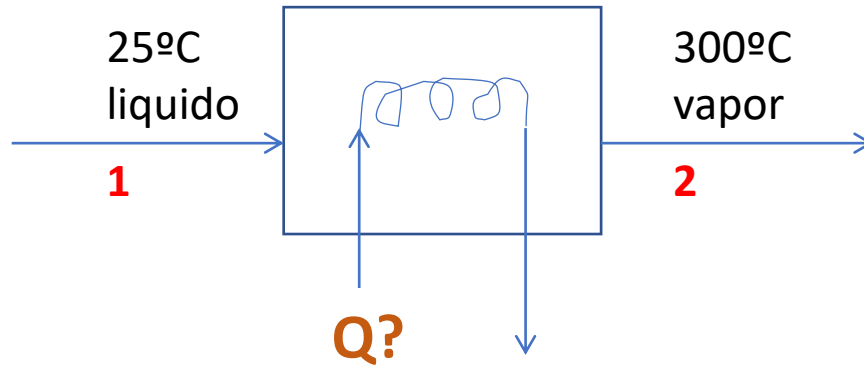
Dados:

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

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

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

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.



BALANÇO ENERGÉTICO

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

Estado de referência: T=25°C; P=1 atm; estado físico: líquido

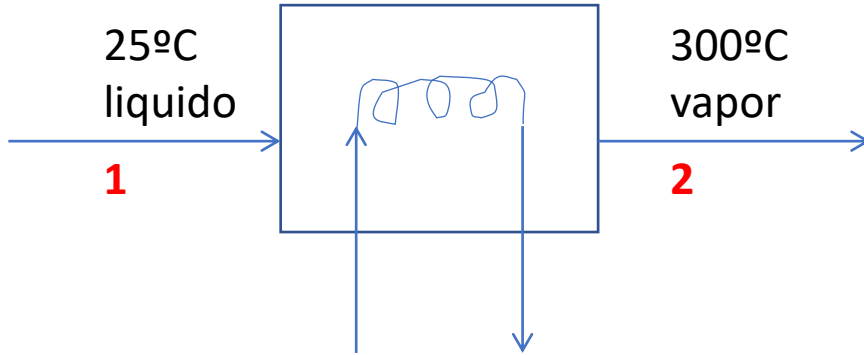
$$\Delta H_1 = 0 \quad \longrightarrow \quad Q = \Delta H_2$$

O hexano líquido evapora a 68.7°C a 1atm; depois, aquece na forma de vapor até 300°C

$$\Delta \hat{H}_2 = \int_{25^{\circ}\text{C}}^{68.7^{\circ}\text{C}} C_{p,\text{liquido}} \cdot dT + \Delta \hat{H}_{\text{vaporização}}^{68.7^{\circ}\text{C}} + \int_{68.7^{\circ}\text{C}}^{300^{\circ}\text{C}} C_{p,\text{gas}} \cdot dT$$



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.



$$\begin{aligned} c_p (\text{hexano líquido}) &= 51.6 \text{ cal/mol.}^\circ\text{C} \\ c_p (\text{hexano vapor}) &= 1.657 + 13.19\text{E}^{-2} T \text{ (cal.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)} \\ \Delta H_{\text{vaporização}} (\text{hexano, } 68.7^\circ\text{C, } 1\text{atm}) &= 6921 \text{ cal.mol}^{-1} \end{aligned}$$

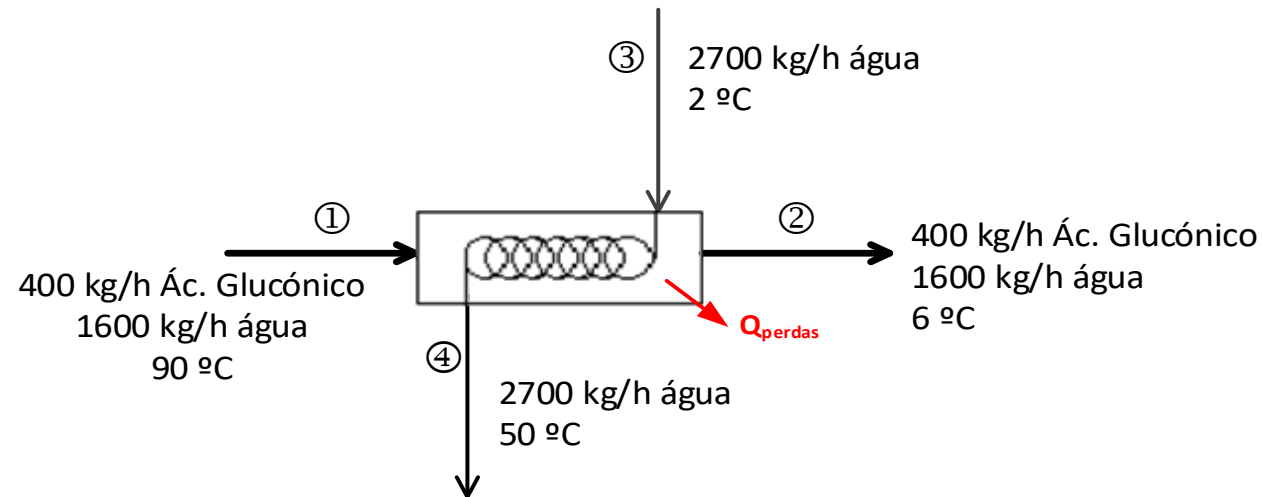
$$\Delta \hat{H}_2 = \int_{25^\circ\text{C}}^{68.7^\circ\text{C}} C_{p,\text{liquido}} .dT + \Delta \hat{H}_{\text{vaporização}}^{68.7^\circ\text{C}} + \int_{68.7^\circ\text{C}}^{300^\circ\text{C}} C_{p,\text{gas}} .dT$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{H}_2 &= 51.6 \times (68.7 - 25) + 6921 + 1.657 \times (573 - 341.7) + \\ &\quad + \frac{1}{2} \times 13.19 \times 10^{-2} \times (573^2 - 341.7^2) \end{aligned}$$

$$\Delta \hat{H}_2 = 2.04 \times 10^4 \text{ cal/mol}$$

$$\Delta H_2 = 100 \text{ mol/h} \times 2.04 \times 10^4 \text{ cal/mol} = 2.04 \times 10^6 \text{ cal/h}$$

**5.13.** 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.



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

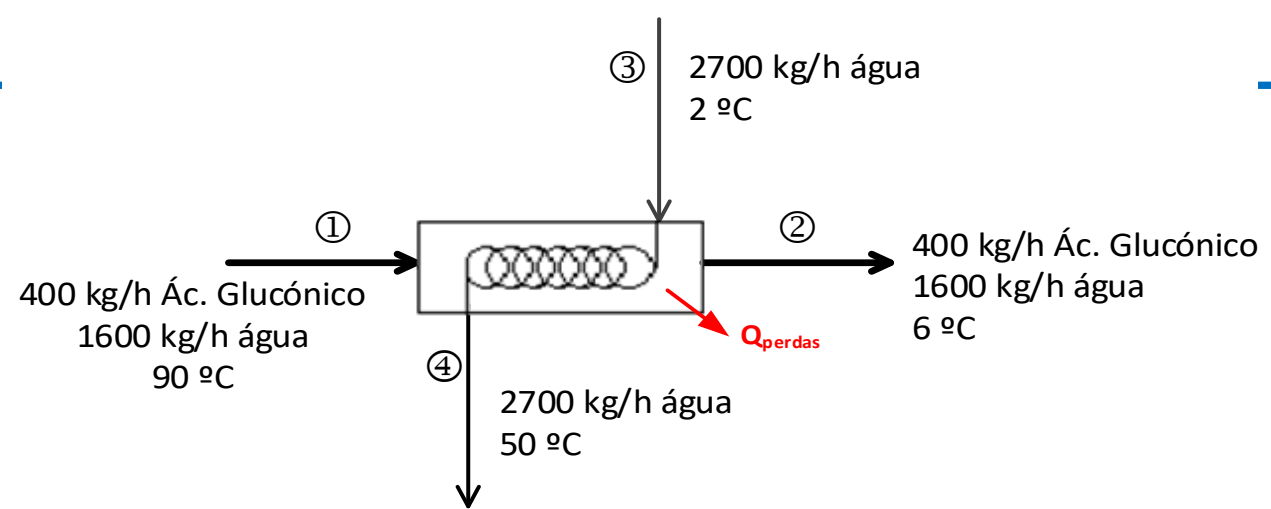
$$\Delta \hat{H} \text{ (água líquida a } 6^{\circ}\text{C)} = 25.2 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

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

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

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

BE ao permutador:

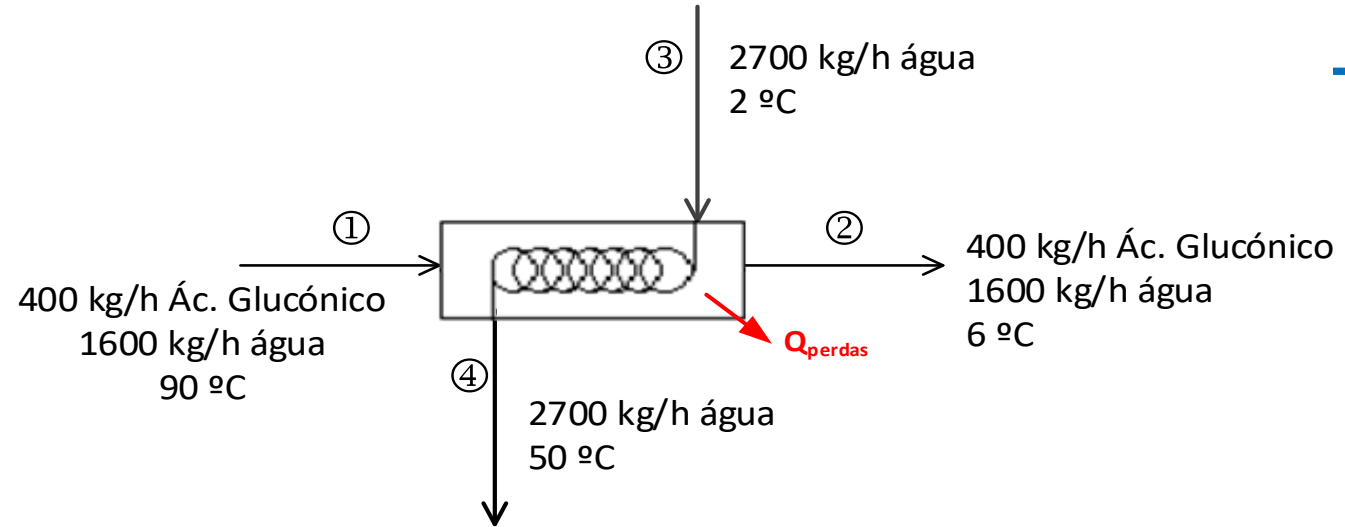


$$\Delta H_1 + \Delta H_3 = \Delta H_2 + \Delta H_4 + Q_{perdas}$$

$$Q_{perdas} = \Delta H_1 + \Delta H_3 - \Delta H_2 - \Delta H_4$$

$$Q_{perdas} = (\Delta H_1 - \Delta H_2) + (\Delta H_3 - \Delta H_4)$$

BE ao permutador:



$$Q_{perdas} = (\Delta H_1 - \Delta H_2) + (\Delta H_3 - \Delta H_4)$$

$$(\Delta H_3 - \Delta H_4) = 2700 \text{ kg/h} \times (8.4 - 209.3) \text{ kJ/kg} = -5.42 \text{ E}+5 \text{ kJ/h}$$

$$(\Delta H_1 - \Delta H_2)_{\text{Ác. Gluc.}} = 400 \text{ kg/h} \times 1.47 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times (90 - 6) ^\circ\text{C} = 4.94 \text{ E}4 \text{ kJ/h}$$

$$(\Delta H_1 - \Delta H_2)_{\text{água}} = 1600 \text{ kg/h} \times (376.9 - 25.2) \text{ kJ/kg} = 5.63 \text{ E}+5 \text{ kJ/h}$$



$$Q_{perdas} = 7.04 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

quantidade de calor perdida pelo  
permutador de calor para o exterior

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

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

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

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

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