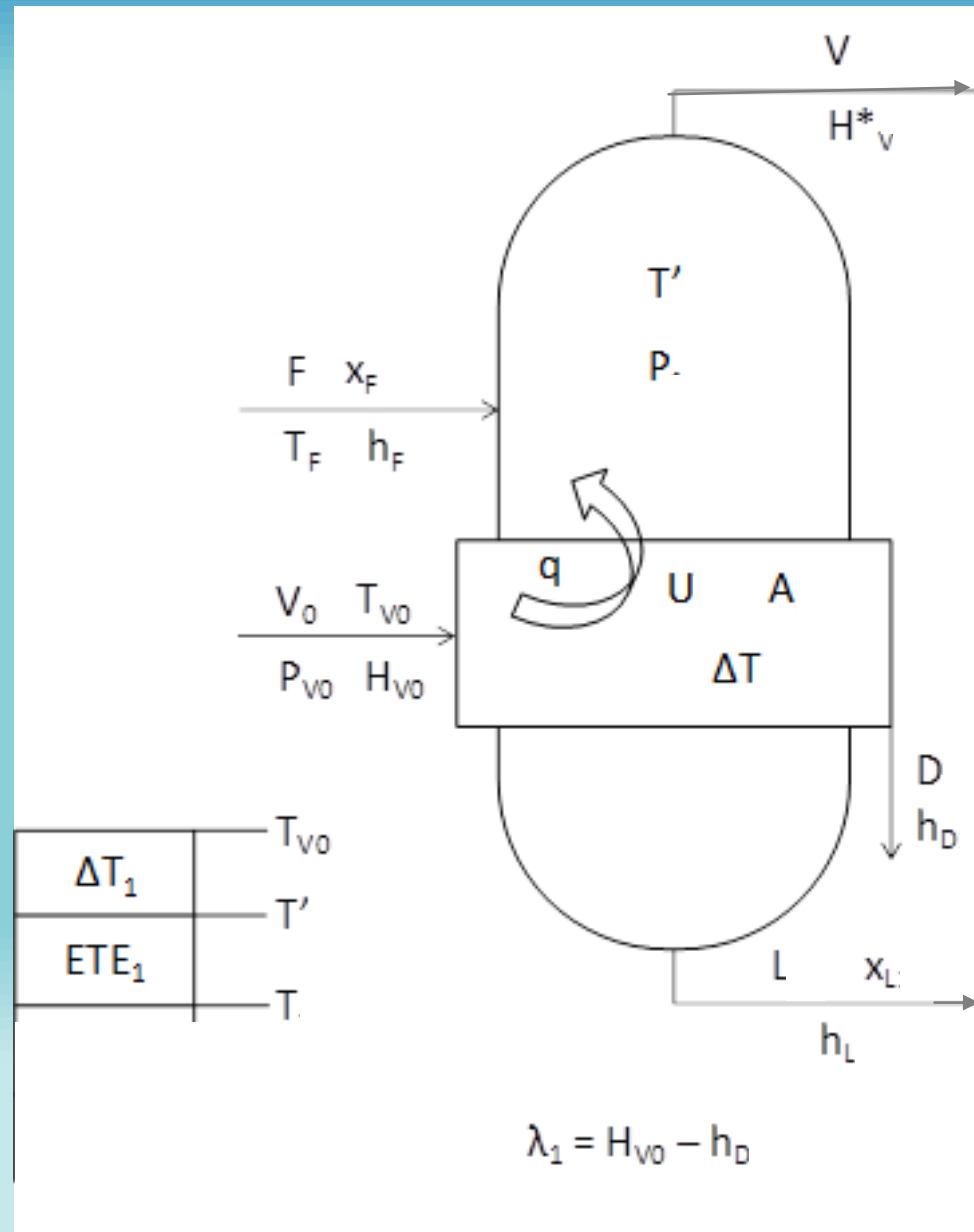


# OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

AULA - Evaporadores

# Estudo de um evaporador simples efeito



Onde:

F ... Vazão de alimentação;

L ... Vazão de saída de líquido;

V ... Vazão de saída de vapor;

$V_0$  ... Vazão de alimentação do vapor de aquecimento;

D ... Vazão de saída do condensado;

$x_F$  ... Fração mássica de soluto na solução de alimentação;

$x_L$  ... Fração mássica de soluto na solução concentrada

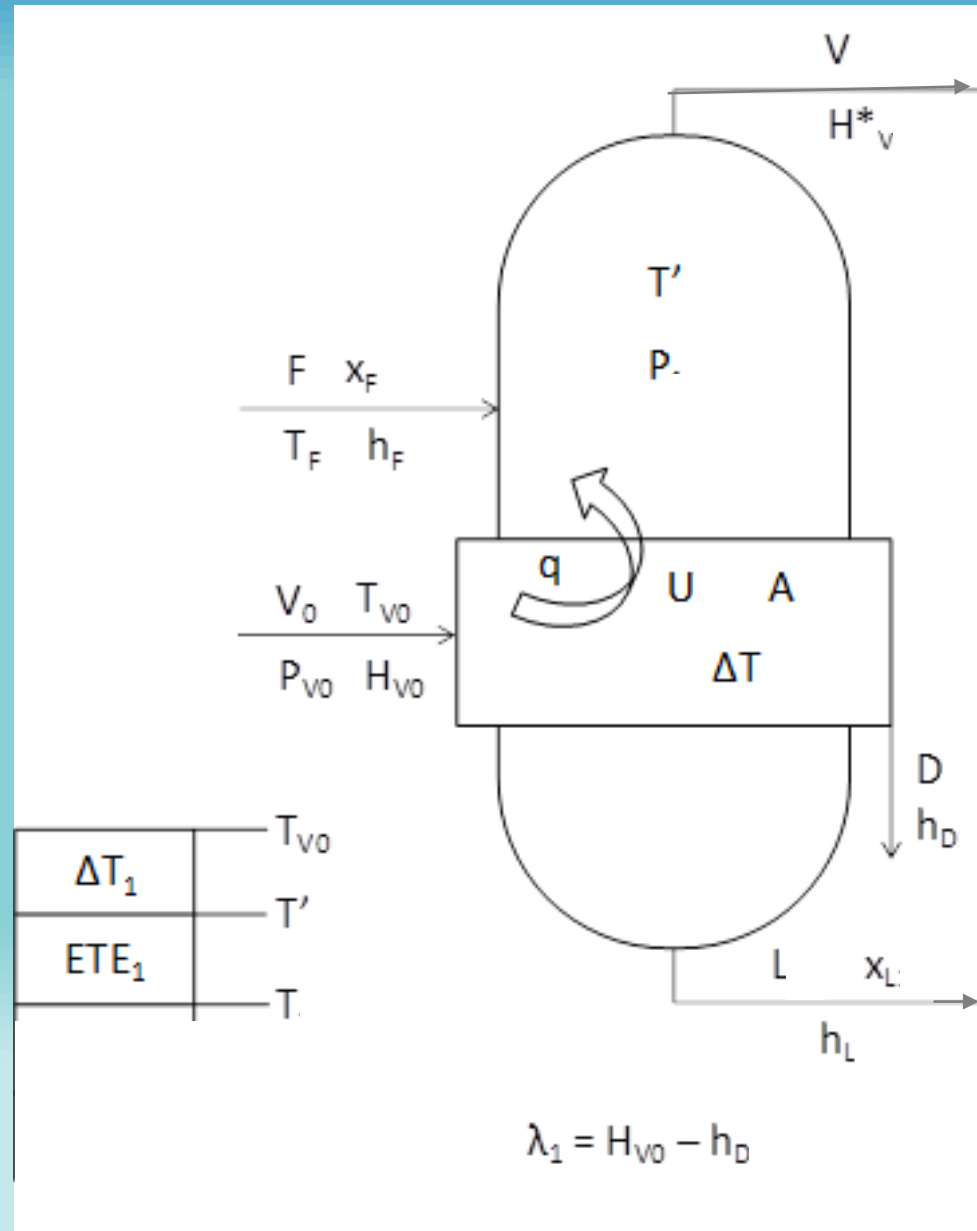
$P_{v0}$  ... Pressão na câmara de condensação;

$T_{v0}$  ... Temperatura na câmara de condensação;

P ... Pressão na câmara de evaporação;

T ... Temperatura de ebulição do solvente na pressão P

# Estudo de um evaporador simples efeito



$T'$  ... Temperatura de ebulição da solução na pressão  $P$ ;

$h_F$  ... Entalpia específica da solução de alimentação;

$h_L$  ... Entalpia específica da solução concentrada;

$H_v^*$  ... Entalpia específica do vapor produzido ;

$H_{v0}$  ... Entalpia do vapor de aquecimento;

$h_D$  ... Entalpia do condensado;

$\lambda$  ... Entalpia de condensação do vapor ( $H_{LV}$ );

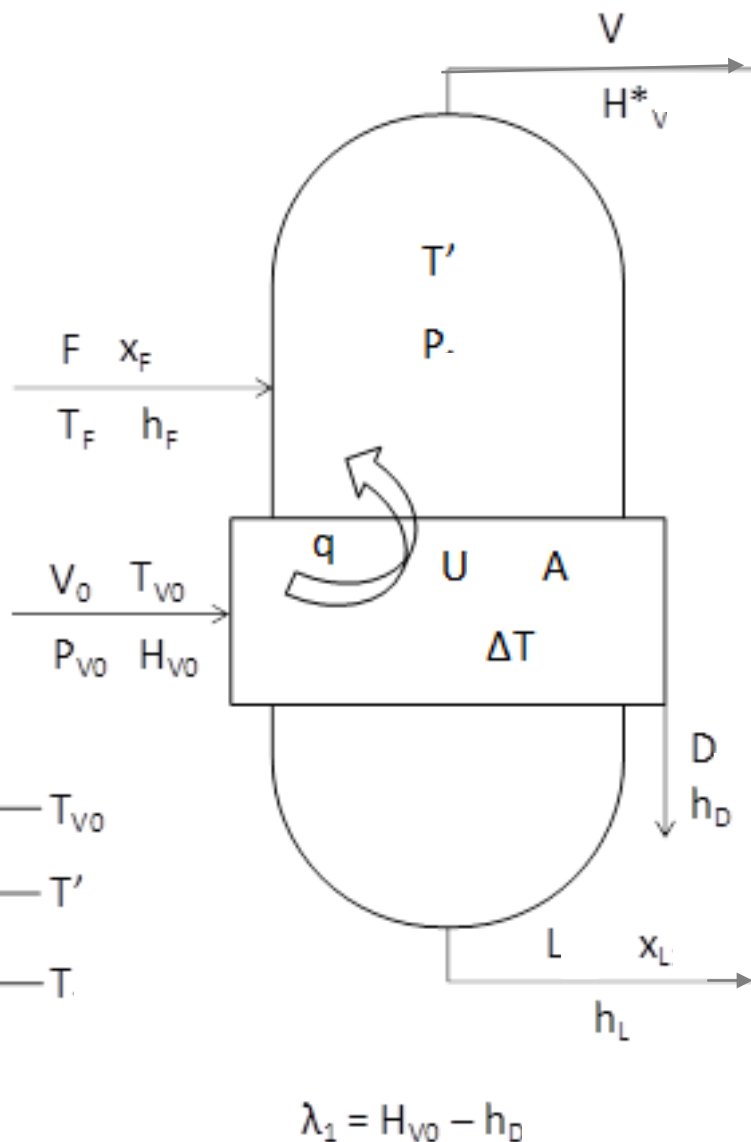
$q$  ... Calor trocado;

$U$  ... Coeficiente global de troca de calor;

$A$  ... Área da superfície de troca de calor;

$\Delta T$  ... Diferença entre as temperaturas do vapor e da solução  $\Delta T = T_{v0} - T'$ ;

$ETE = T' - T$  – Elevação da temperatura de ebulição.



### Balanço de massa:

$$F = L + V \quad (1)$$

$$F \cdot x_F = L \cdot x_L \quad (2)$$

$$V_0 = D \quad (3)$$

### Balanço de energia:

$$F \cdot h_F + V_0 \cdot H_{v0} = L \cdot h_L + V \cdot H_v^* + D \cdot h_D$$

$$V_0 \cdot H_{v0} - D \cdot h_D = L \cdot h_L + V \cdot H_v^* - F \cdot h_F = q$$

$$V_0 \cdot (H_{v0} - h_D) = L \cdot h_L + V \cdot H_v^* - F \cdot h_F$$

$$V_0 \cdot \lambda = L \cdot h_L + V \cdot H_v^* - F \cdot h_F \quad (4)$$

### Troca de calor:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$V_0 \cdot \lambda = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$A = \frac{V_0 \cdot \lambda}{U \cdot \Delta T} \quad (6)$$

### Entalpia do vapor superaquecido:

$$C_p = \left( \frac{dH}{dT} \right) \cdot P = \frac{\Delta H}{\Delta T} \rightarrow \Delta H = C_p \cdot \Delta T$$

$$H^* = H + C_p \cdot (T' - T) \rightarrow H^* = H + 0,5 \cdot (T' - T) \quad (7)$$

## Exercício:

Um evaporador simples efeito deve ser projetado para concentrar 5000  $Kg/h$  de uma solução de NaOH de 10 % em peso para 40 % em peso. A solução deverá ser alimentada a 40 °C. Deverá ser empregado vapor a 8,5  $kgf/cm^2$ . O coeficiente global de transferência de calor é  $U = 1200 \text{ kcal/h.m}^2.^{\circ}C$ . A câmara de evaporação deverá operar a 0,2031  $kgf/cm^2$ .

Determine:

- a) O consumo de vapor;
- b) A área da superfície de troca de calor.

# Solução:

$$P_{v0} = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$$

Pela tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água:

Na câmara de condensação

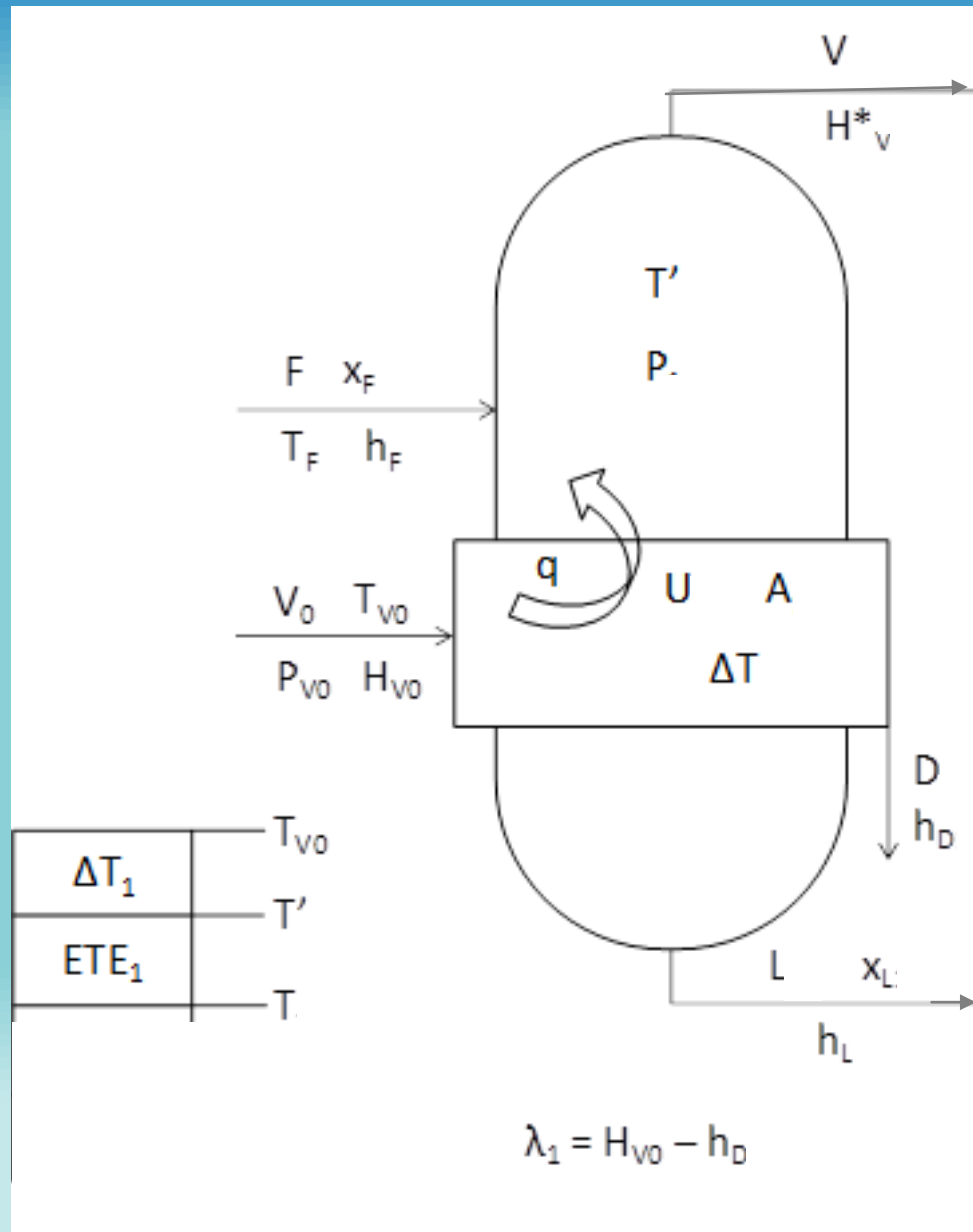
| P     | T        | $\lambda = h_{Lv}$ |
|-------|----------|--------------------|
| 8,076 | 170      | 489,2              |
| 8,5   | $T_{v0}$ | $\lambda$          |
| 9,101 | 175      | 485,2              |

$$T_{v0} = 172,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 487,5 \text{ kcal/kg}$$

Na câmara de evaporação

| P      | T  | $H_v$ |
|--------|----|-------|
| 0,2031 | 60 | 623,2 |



# Solução:

Então:

$$F = 5000 \text{ kg/h} \quad x_F = 0,10$$

$$T_F = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad x_L = 0,40$$

$$T_{v0} = 172,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P = 0,2031 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_{v0} = 8,5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\lambda = 487,5 \text{ kcal/kg}$$

$$H_v = 623,2 \text{ kcal/kg}$$

$$U = 1200 \text{ kcal/h.m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = ? \quad \Delta T = ? \quad T' = ? \quad v_0 = ?$$

- Da eq. (2):

$$F \cdot x_F = L \cdot x_L$$

$$5000 \cdot 0,1 = L \cdot 0,4$$

$$\underline{L = 1250 \text{ Kg/h}}$$

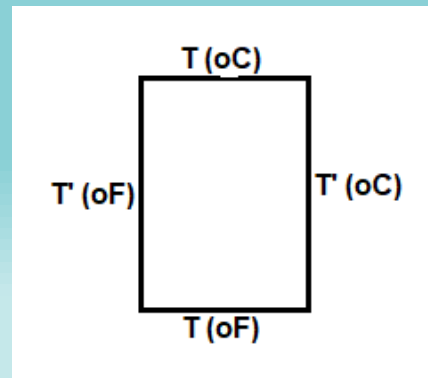
- Da eq. (1):

$$F = L + V$$

$$5000 = 1250 + V$$

$$\underline{V = 3750 \text{ Kg/h}}$$

**Pelo diagrama de Düring para sol. de NaOH:**



Para  $T(^{\circ}\text{C})$  e  $x_L = 0,4$ , temos:  
 $T' = 90^{\circ}\text{C}$

# Solução:

**Pelo diagrama de entalpia – concentração:**

Para  $T_F = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $x_F = 0,10$ , temos:

$$h_F = 37\text{ kcal/kg}$$

Para  $T' = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $x_L = 0,40$ , temos :

$$h_L = 95\text{ kcal/kg}$$

$$H_v^* = ?$$

**Da eq. (7):**

$$H_v^* = H_v + 0,5*(T' - T)$$

$$H_v^* = 623,2 + 0,5*(90 - 60)$$

$$H_v^* = 638,2\text{ kcal/kg (vapor supersaturado)}$$

**Da eq. (4):**

$$V_0^* \lambda = L^* h_L + V^* H_v^* - F^* h_F$$
$$V_0 = (1250,95 + 3750*638,2 - 5000*37) / 487,5$$

$$\text{a) } \underline{V_0 = 4773,3\text{ kg/h}}$$

**b) Da eq. (6):**

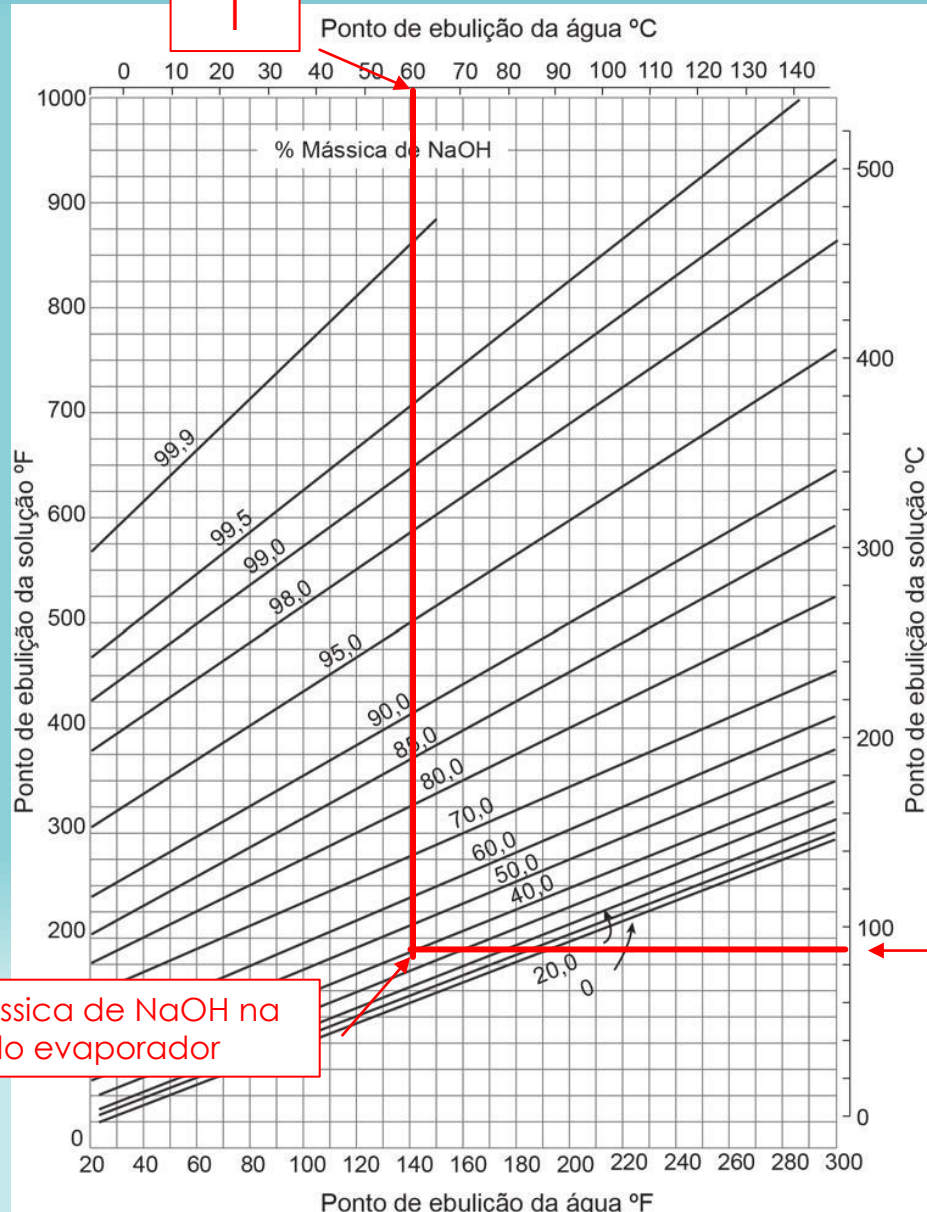
$$A = \frac{V_0 \cdot \lambda}{U \cdot \Delta T}$$
$$A = \frac{4773,3*487,5}{1200*(172,1 - 90)}$$
$$\underline{A = 23,6\text{ m}^2}$$

$$\text{Economia: } \frac{\text{vapor produzido}}{\text{vapor consumido}} = \frac{3750}{4773,3} = 0,7856 = 78,56\%$$



# Solução:

## Anexo 1: Diagrama de Dühring (para determinação de $T'$ ):



Concentração mássica de NaOH na saída do evaporador

# Solução:

Anexo 2: Diagrama entalpia-concentração para soluções de NaOH:

