



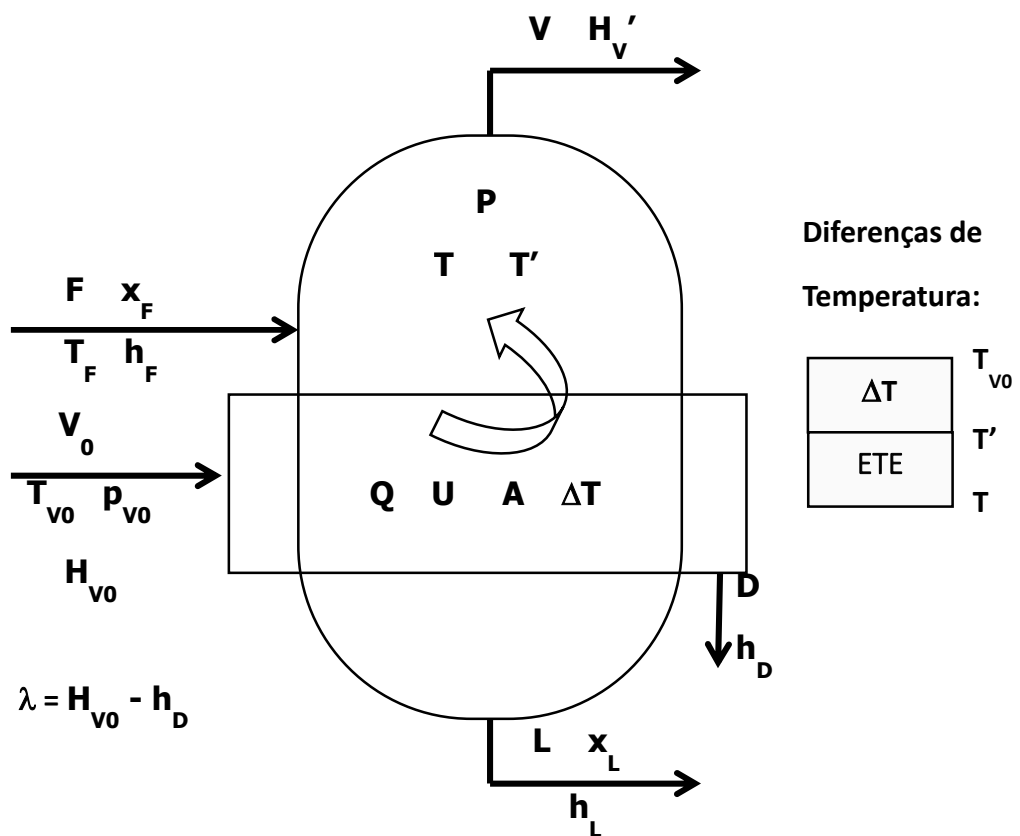
OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

Prof. Antonio Carlos da Silva

CÁLCULO DE EVAPORADOR SIMPLES EFEITO

Exercícios

Em um Evaporador de Simples Efeito tem-se os seguintes parâmetros (conforme Apresentação e Videoaulas postadas):



As equações de Balanço de Massa e de Energia são:

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

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

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

$$Q = V_0 \cdot \lambda = L \cdot h_L + V \cdot H_V' - F \cdot h_F \quad (4)$$

A troca de calor é dada pela relação:  $Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$

**Observações:**

1) O vapor produzido pela evaporação do solvente da solução (fluxo V) é superaquecido, pois o solvente puro entra em ebulição na temperatura T, mas a solução entra em ebulição na temperatura T' (ebuliometria). O equilíbrio líquido-vapor da solução se dá na temperatura T', mas o vapor, ao deixar a câmara de evaporação, é puro e assim será superaquecido.

2) Para o cálculo de evaporadores, serão utilizados os diagramas e tabelas:

- Tabelas de vapor saturado

*Para obtenção de valores de entalpia específica de água e vapor d'água.*

- Diagrama de Dühring para solução de aquosa de hidróxido de sódio

*Diagrama para obtenção da temperatura de ebulição da solução de NaOH em função da temperatura de ebulição da água pura (na pressão de operação da câmara de evaporação) e da concentração da solução.*

- Diagrama entalpia-concentração para soluções aquosas de hidróxido de sódio

*Diagrama para determinação de entalpia específica de soluções de NaOH em função da temperatura e da concentração da solução*

Os diagramas e tabelas constam do arquivo "Diagramas e tabelas – evaporação" também postado.

Exemplos de utilização:

- Uma solução é evaporada à pressão de 0,3931 kgf/cm<sup>2</sup>; determine a temperatura da evaporação da água pura e a entalpia de vapor d'água:

*na tabela de propriedades termodinâmicas da água, encontramos para a pressão dada (3ª coluna) a temperatura de saturação (temperatura de ebulição da água pura) igual a **75°C** (1ª coluna) ou **348,15 K** (2ª coluna) e a entalpia específica de vapor de **629,3 kcal/kg** na coluna h<sub>v</sub> (8ª coluna) – quando necessário, interpolar.*

- Na pressão de 0,3931 kgf/cm<sup>2</sup>, determine a temperatura de evaporação de uma solução de NaOH a 20% em peso de soluto:

*no diagrama de Dühring, para 75°C (temperatura de ebulição da água, no eixo horizontal, escala superior), na reta correspondente a 20% em peso, rebatendo no eixo vertical, escala da direita, encontra-se a temperatura de **90°C**.*

- Para uma solução a 20% em peso de NaOH, evaporando a 0,3931 kgm/cm<sup>2</sup>, determine a entalpia específica:

*Convertendo a temperatura de 75°C para a escala Fahrenheit, obtemos:*

$$(100 - 75)/(100-0) = (212-T)/(212-32) \therefore 25/100 = (212-T)/180 \therefore T = 167^{\circ}\text{F}$$

*no diagrama Entalpia-Concentração para soluções de NaOH, para 167°F e 20%, encontra-se no eixo vertical, escala da direita: **72 kcal/kg***

Pode-se converter a temperatura pela expressão:  **$T_c = 5/9.(T_f - 32)$**

Os Diagramas para soluções de NaOH são facilmente encontrados na literatura (livros de Operações Unitárias, Transferência de Calor e Manuais de Engenharia Química). Isso se deve ao fato de que a operação de evaporação encontra sua maior aplicação no processo de produção eletrolítico de NaOH (processo que produz Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e solução de NaOH diluída, entre 5% e 10%).

3) Se a solução em evaporação não for aquosa, é necessário ter as tabelas de vapor correspondentes ao solvente e dados para cálculo das propriedades da solução (temperatura de ebulição e entalpia específica). Utilizaremos somente soluções aquosas com os diagramas e tabelas apresentados.

4) Se o soluto não for NaOH, é necessário conhecer relações para cálculo de temperatura de evaporação da solução e entalpia específica.

5) Para o cálculo da Entalpia de vapor superaquecido do vapor produzido ( $H_V'$ ) usa-se a referência do calor específico a pressão constante,  $C_p$ :

$$C_p = \left( \frac{\delta H}{\delta T} \right)_{p \text{ cte}}$$

Que pode ser aproximada por:

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

Considerando o estado 1: na temperatura de saturação do solvente, à temperatura  $T$  e entalpia  $H_V$

Considerando o estado 2: na saída do vapor, à temperatura  $T'$  e a entalpia  $H_V'$

$$\begin{aligned}\Delta H &= C_p \cdot \Delta T \\ H_V' - H_V &= C_p \cdot (T' - T) \\ H_V' &= H_V + C_p \cdot (ETE)\end{aligned}$$

**EXEMPLO**

Em um evaporador de simples efeito, uma solução de NaOH a 10% em peso é evaporada até 50% em peso. A solução é alimentada a 32°C, com vazão de 3.600 kg/h. O coeficiente global de troca de calor é 1.200 kcal/h.m<sup>2</sup>.°C. Dispõe-se de vapor para aquecimento a 8,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Na câmara de evaporação, a pressão é mantida a 0,285 kgf/cm<sup>2</sup>. Determinar a área de troca de calor necessária

Tabela para lançamento dos parâmetros calculados:

Parâmetro	Valor	Unidades
<b>F</b>		kg/h
<b>L</b>		kg/h
<b>V</b>		kg/h
<b>x<sub>F</sub></b>		(adimensional)
<b>x<sub>L</sub></b>		(adimensional)
<b>V<sub>0</sub> (=D)</b>		kg/h
<b>T<sub>F</sub></b>		°C
<b>T<sub>v0</sub></b>		°C
<b>T</b>		°C
<b>T'</b>		°C
<b>ΔT = T<sub>v0</sub> - T'</b>		°C
<b>ETE = T' - T</b>		°C
<b>p</b>		kgf/cm <sup>2</sup>
<b>P<sub>v0</sub></b>		kgf/cm <sup>2</sup>
<b>h<sub>F</sub></b>		kcal/kg
<b>h<sub>L</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v0</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v'</sub></b>		kcal/kg
<b>h<sub>D</sub></b>		kcal/kg
<b>λ</b>		kcal/kg
<b>U</b>		kcal/h.m <sup>2</sup> .°C
<b>Q</b>		kcal/h
<b>A</b>		m <sup>2</sup>

**EXERCÍCIOS**

1) Uma solução de um sal inorgânico a 40°C deve ser alimentada em um evaporador de simples efeito, para ser concentrada de 20% até 40%, à taxa de 8.000 kg/h. Deve ser empregado vapor para aquecimento a 181,5°C. A câmara de evaporação deverá ser operada sob vácuo, a 0,2031 kgf/cm<sup>2</sup> abs. O coeficiente global de troca de calor é 1480 kcal/h.m<sup>2</sup>.°C. Determinar a área de troca de calor que deverá ter o evaporador. Dados para a solução:

Concentração da solução, % em peso de soluto	5	10	20	30	40
Elevação da Temperatura de Ebulição, °C	3,8	6,9	14,8	24,4	33,2
Calor específico, kcal/kg	0,96	0,91	0,86	0,80	0,72

Parâmetro	Valor	Unidades
<b>F</b>		kg/h
<b>L</b>		kg/h
<b>V</b>		kg/h
<b>x<sub>F</sub></b>		(adimensional)
<b>x<sub>L</sub></b>		(adimensional)
<b>V<sub>0</sub> (=D)</b>		kg/h
<b>T<sub>F</sub></b>		°C
<b>T<sub>v0</sub></b>		°C
<b>T</b>		°C
<b>T'</b>		°C
<b>ΔT = T<sub>v0</sub> - T'</b>		°C
<b>ETE = T' - T</b>		°C
<b>p</b>		kgf/cm <sup>2</sup>
<b>P<sub>v0</sub></b>		kgf/cm <sup>2</sup>
<b>h<sub>F</sub></b>		kcal/kg
<b>h<sub>L</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v0</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v</sub></b>		kcal/kg
<b>H<sub>v'</sub></b>		kcal/kg
<b>h<sub>D</sub></b>		kcal/kg
<b>λ</b>		kcal/kg
<b>U</b>		kcal/h.m <sup>2</sup> .°C
<b>Q</b>		kcal/h
<b>A</b>		m <sup>2</sup>

2) Deve-se projetar um evaporador simples efeito para produzir 1.000 kg/h de uma solução a 50% em peso pela evaporação de uma solução a 5% em peso de soluto. A alimentação entra a 25°C e o evaporador funciona a uma pressão absoluta de 0,15 kgf/cm<sup>2</sup>. Para o aquecimento usa-se vapor d'água a 132°C. O coeficiente global de troca de calor é igual a 1150 kcal/h.m<sup>2</sup>.°C. A elevação da temperatura de ebulição da solução é de 12°C. Determinar:

- a) a área de troca de calor;
- b) o consumo horário de vapor.

Dados:  $C_{pF} = 0,95 \text{ kcal/kg.}^{\circ}\text{C}$

$C_{pL} = 0,85 \text{ kcal/kg.}^{\circ}\text{C}$

3) Necessita-se de um evaporador de simples efeito para concentrar 3.000 kg/h de uma solução de hidróxido de sódio desde 10% até 50% em peso de soluto. A alimentação deverá ser realizada a 36°C e o evaporador deverá ser operado a uma pressão absoluta de 0,152 kgf/cm<sup>2</sup>. Para o aquecimento dispõe-se de vapor d'água a 180°C. O coeficiente global de troca de calor é igual a 1150 kcal/h.m<sup>2</sup>.°C. Determinar:

- c) a área de troca de calor;
- d) o consumo horário de vapor.