

# Evaporação



# Evaporação

- A evaporação é a operação de se concentrar uma solução mediante a eliminação do solvente por ebulição (McCabe, 1982).
- O objetivo da evaporação é concentrar uma solução consistente de um soluto não volátil e um solvente volátil .
- A grande maioria dos processos de evaporação utilizam água como solvente.

**Como os solutos são considerados não voláteis, no equilíbrio a fase gasosa ou o evaporado só contém solvente, ou seja, a fração de solvente no evaporado é de 100% ( $y_{\text{solvente}}=1$ ;  $y_{\text{solute}}=0$ ).**

**Na fase líquida, que é a solução a ser concentrada, há frações tanto de soluto quanto de solvente ( $x_{\text{solvente}}$  e  $x_{\text{solute}}$ ).**

## **Evaporação ≠ Secagem**

Na evaporação, ao término da operação, é obtido um produto líquido concentrado, já na secagem tem-se um produto sólido.

## **Evaporação ≠ Destilação**

Diferente da evaporação, na destilação o soluto pode ser volátil, assim a fração de solvente na corrente gasosa não é de 100%.

## **Evaporação ≠ Cristalização**

A cristalização pode ser feita de duas maneiras, uma delas é alterando a temperatura da solução para diminuir a solubilidade do sólido dissolvido, a outra é evaporando o solvente até que a solução chegue ao ponto de saturação e os cristais começam a se formar.

Quando se utiliza o segundo método, a evaporação e a cristalização são basicamente o mesmo processo, mas diferem na finalidade da operação. Na cristalização, evapora-se o solvente até que a solução fique saturada e, conseqüentemente, o soluto cristalize, enquanto na evaporação ocorre apenas a concentração da solução sem que se atinja o ponto de saturação.

## Características do líquido

- A solução prática para um problema de evaporação está intimamente relacionada ao caráter do líquido que está sendo concentrado. É a grande variedade de características dos **licores** (que requer critérios e experiência no projeto e operação de evaporadores) que estende esta operação de uma simples transferência de calor para uma arte separada. Aqui estão algumas das propriedades mais importantes dos líquidos que se evaporam.

**Concentração:** Embora a solução de alimentação que entre como um licor para um evaporador possa ser suficientemente diluída tendo muitas das propriedades físicas da água, à medida que a concentração aumenta, a solução se torna cada vez mais individualista. A densidade e a viscosidade aumentam com o teor de sólidos até a solução se tornar saturada ou o licor torna-se muito viscoso para transferência de calor adequada. A fervura contínua de uma solução saturada resulta na formação de cristais, que devem ser separados, caso contrário, os tubos ficarão entupidos. A temperatura de ebulição da solução também pode aumentar consideravelmente à medida que o teor de sólidos aumenta, de modo que a temperatura de ebulição de uma solução concentrada pode ser muito maior do que a da água com a mesma pressão.

**Espuma:** Alguns materiais, especialmente substâncias orgânicas, formam espuma durante a vaporização. Uma espuma estável acompanha o vapor que sai do evaporador, causando um forte arraste.

**Sensibilidade à temperatura:** Muitos produtos químicos finos, produtos farmacêuticos e alimentos deterioram-se quando aquecidos a temperaturas moderadas por tempos relativamente curtos. Na concentração destes materiais são necessárias técnicas especiais para reduzir a temperatura do líquido e o tempo de aquecimento.

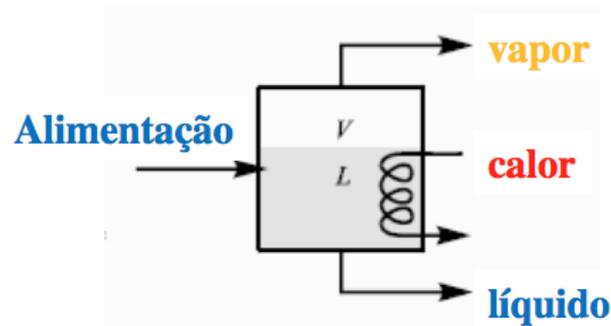
**Incrustações:** Algumas soluções depositam crostas na superfície de aquecimento. Nestes casos, o coeficiente global diminui progressivamente até existir um momento em que é necessário interromper a operação do evaporador e limpar os tubos.

**Materiais de construção:** Sempre que possível, os evaporadores são construídos com algum tipo de aço. No entanto, muitas soluções atacam metais ferrosos e poluição ocorre. Nestes casos, são utilizados materiais especiais como cobre, níquel, aço inoxidável, alumínio, grafite e chumbo. Como os materiais são caros, é especialmente desejável obter altas taxas de transferência de calor para minimizar os custos do equipamento.

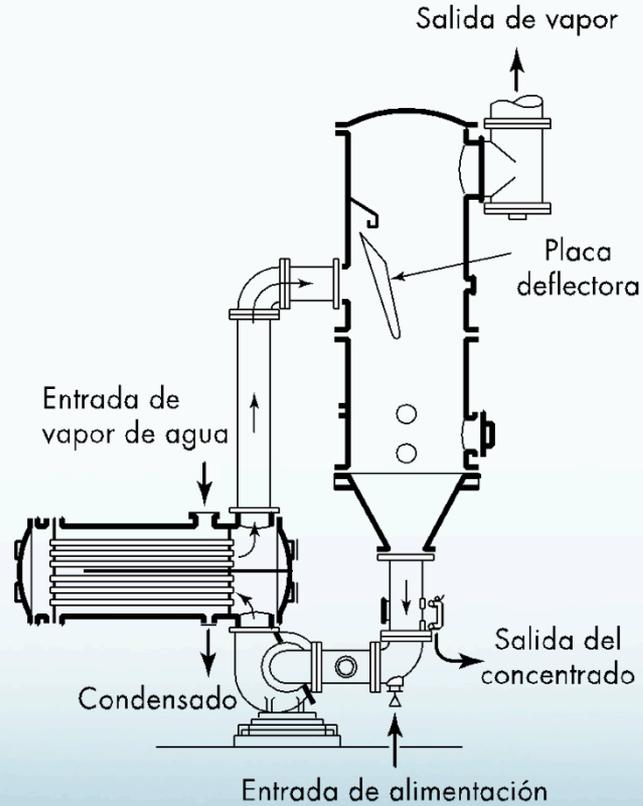
**Outras características importantes:** calor específico, viscosidade, temperatura de congelamento, liberação de gás durante a ebulição, toxicidade, riscos de explosão, radioatividade e a necessidade de operação estéril

# Evaporador

Um evaporador consiste basicamente de um trocador de calor capaz de ferver a solução e um dispositivo para separar a fase vapor do líquido em ebulição.



# Componentes básicos de un evaporador



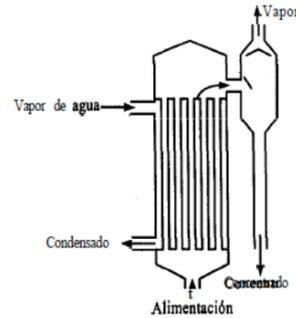
Os principais tipos de evaporadores aquecidos com vapor d'água que são usados atualmente são:

1. Evaporadores de tubos (longos ou curtos) (verticais ou horizontais):

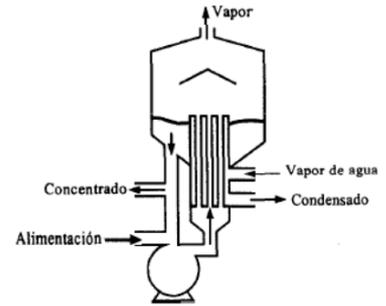
- a) Circulação natural
- b) Circulação forçada
- c) Fluxo ascendente (filme ascendente).
- d) Fluxo descendente (filme descendente).

2. Evaporadores de película (filme) agitada.

*Evaporação de Simple Efeito*



**Com um passo**



**De circulação forçada**

## Evaporadores com uma passagem

Em operação de um passo, o líquido de alimentação passa apenas uma vez através dos tubos, libera o vapor e sai da unidade como uma solução concentrada (ou licor grosso). Toda evaporação ocorre em um único passo.

A taxa de evaporação para alimentação é limitada em uma unidade de passagem única, portanto, esses evaporadores estão bem adaptados à operação multi-efeito, onde a concentração total pode ser alcançada em vários efeitos.

Os evaporadores de filme agitado sempre operam em um único passo;

Os evaporadores de filme ascendente e descendente também podem operar desta maneira.

Os evaporadores de passagem única são especialmente úteis para materiais sensíveis ao calor. Ao operar sob alto vácuo, é possível manter a temperatura do líquido baixa.

Com uma única passagem rápida através dos tubos, a solução concentrada está na temperatura de evaporação, mas apenas por um curto período, e pode esfriar rapidamente à medida que sai do evaporador.

## Evaporadores com circulação

- Uma massa de líquido é mantida nos evaporadores de circulação.
- A alimentação é misturada com a massa total de líquido e depois passa através dos tubos.
- As descargas líquidas não evaporadas dos tubos retornam ao equipamento, de modo que em cada etapa apenas ocorre parte da evaporação total.
- Todos os evaporadores de circulação forçada operam desta maneira;
- Os evaporadores de filme ascendente são geralmente unidades de circulação.
- Não são adequados para líquidos sensíveis ao calor

## Evaporadores com circulação natural

- As correntes de convecção que se originam na superfície de aquecimento fazem circular o licor
- Tubos horizontais: vapor d'água no interior dos tubos
- Tubos verticais: vapor d'água no exterior dos tubos
- Evaporadores do tipo cesta: é mais fácil retirar a unidade de aquecimento para manutenção
- Os tubos tem entre 1 a 2 in de diâmetro e 3 a 10 m de comprimento
- Velocidade do líquido nos tubos: 0,3 a 1m/s

## Evaporadores com circulação forçada

- Tempo de permanência no interior dos tubos é reduzido. Aconselhável para substâncias sensíveis ao calor (sucos de frutas, medicamentos)
- Normalmente usa-se fluxo anelar ascendente
- O uso de filmes descendentes é interessante para líquidos viscosos
- Custo elevado, manutenção de partes móveis

## Evaporadores do tipo filme

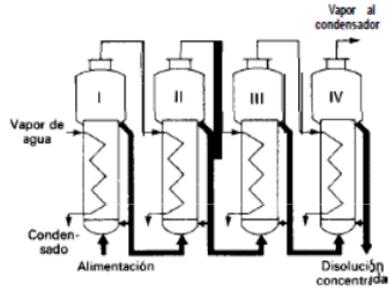
- O uso de uma bomba aumenta a velocidade de circulação do líquido: 2 a 6 m/s
- O líquido está submetido a uma pressão tal que a evaporação não ocorre no interior dos tubos.
- Permitem a obtenção de graus de concentração mais elevados
- Permitem a utilização de líquidos que formam incrustações
- Útil para líquidos viscosos
- Não aconselhável para líquidos sensíveis a temperaturas altas
- O uso da bomba aumento o gasto de energia

## Evaporação de efeito simples ou efeito múltiplo

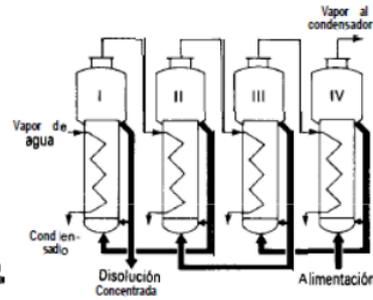
- A maioria dos evaporadores operam com vapor d'água que se condensa sobre a superfície de tubos
- Usualmente o vapor é utilizado a baixa pressão, abaixo de 3 atm, e o líquido que será evaporado está sob vácuo moderado, cerca de 0,05 atm
- Quando um evaporador simples é utilizado, o vapor do líquido é descartado. Neste caso chama-se de **Evaporação de Efeito Simples**
- O vapor de um evaporador pode ser introduzido como alimentação de outro evaporador e o vapor gerado no segundo evaporador é descartado. Neste caso tem-se um **Evaporador de Efeito Duplo**
- Outros evaporadores podem ser adicionados e neste caso tem-se **Evaporador de Efeito Múltiplo**

## *Distintos métodos de alimentação em evaporação de múltiplo efeito*

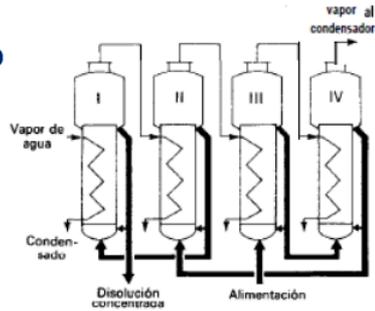
**Alimentação direta**



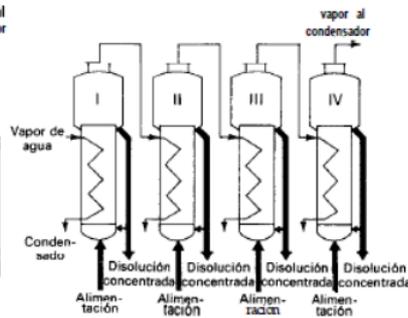
**Alimentação inversa**



**Alimentação mista**



**Alimentação paralela**

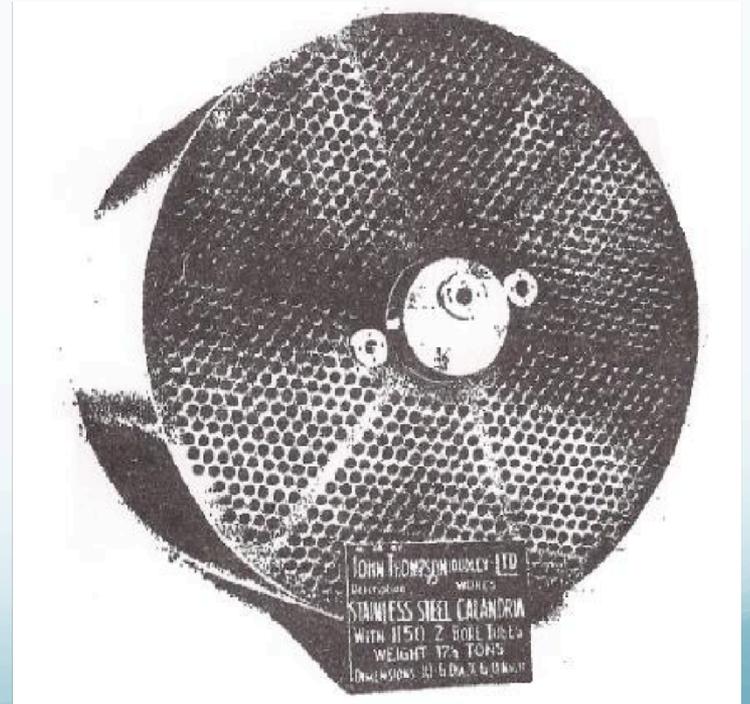
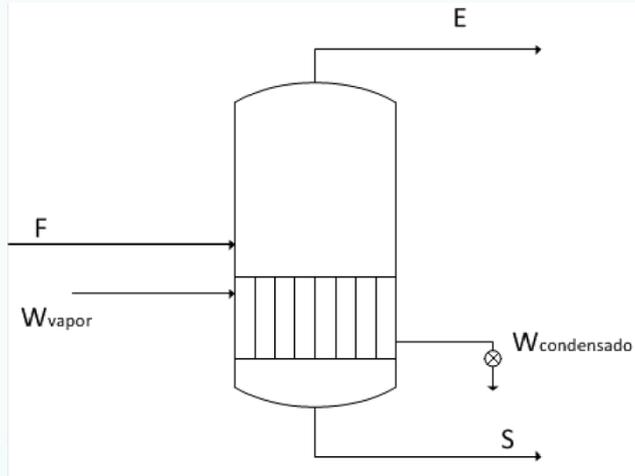


## O funcionamento de um evaporador sob vácuo

- Utilizado para trabalhar a temperaturas menores quando se utiliza substâncias sensíveis a altas temperaturas
- Aumenta a diferença de temperatura entre o vapor e o líquido
- O abaixamento da temperatura originará um material mais viscoso, diminuído o coeficiente de transmissão de calor
- A última unidade de um sistema de efeito múltiplo trabalha normalmente sob vácuo

# Evaporadores de efeito múltiplo

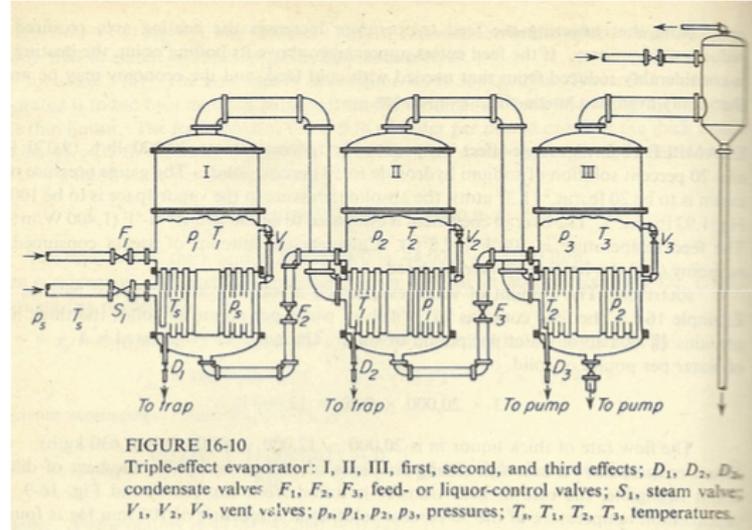
- Após o último efeito há um condensador e um sistema de vácuo (ejetor de ar)
- O vapor de uma unidade deverá estar a uma temperatura mais elevada que o ponto de ebulição do líquido na unidade adjacente. Pro isso opera-se a pressões cada vez menores



# Evaporadores de Múltiplo Efeito

## *Evaporadores de Múltiplo Efeito:*

Na prática por questões comerciais e para não elevar os custos do investimento, os efeitos são todos semelhantes, sendo suas áreas de transferência de calor iguais.



No exemplo, a alimentação é feita no primeiro efeito, no qual a pressão é maior, enquanto no último efeito teremos a menor pressão. A solução diluída é alimentada no primeiro efeito, onde é parcialmente concentrada, flui para o segundo efeito onde ocorre uma concentração adicional e, então, segue para o terceiro efeito onde é obtida a concentração final. A solução concentrada é bombeada do terceiro efeito.

■ ■

### ***Evaporadores de Múltiplo Efeito:***

No estado estacionário, os fluxos de alimentação e a taxa de evaporação são tais que nenhum solvente ou soluto acumule em nenhum dos efeitos.

A temperatura, pressão, a concentração e o fluxo de alimentação são mantidos constantes em todos os estágios pela própria operação do processo. A concentração da solução concentrada (produto) pode ser controlada pelo fluxo de alimentação, onde um aumento do fluxo gera uma diminuição da concentração do produto e vice-versa.

# Evaporadores de Múltiplo Efeito

*Simplificação para elevação do ponto de ebulição e calor utilizado para aquecer a alimentação desprezíveis:*

Considerando que o efeito da elevação do ponto de ebulição e a quantidade de calor utilizada para aquecer a alimentação sejam desprezíveis, a taxa de transferência de calor no evaporador triplo efeito apresentado, pode ser calculada utilizando o calor latente de vaporização da solução, o que acarreta em uma taxa de transferência de calor aproximadamente igual para cada um dos estágios.

$Q/A = U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3 = U \Delta T$  (Obs. Esta equação é apenas uma aproximação, devendo ser corrigida pela adição dos termos excluídos na aproximação).

$$\Delta T = T_s - T_3$$

$$U = 1 / (1/U_1 + 1/U_2 + 1/U_3)$$

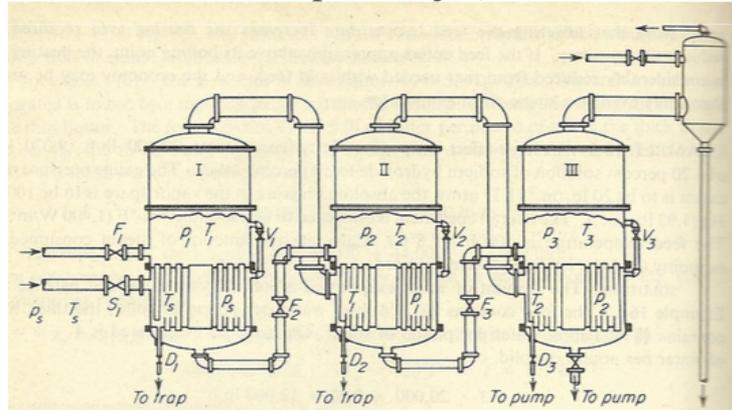


FIGURE 16-10

Triple-effect evaporator: I, II, III, first, second, and third effects;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , condensate valves;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , feed- or liquor-control valves;  $S_1$ , steam valve;  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ , vent valves;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , pressures;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , temperatures.

## EXEMPLO:

Um evaporador de efeito triplo concentra um líquido que não mostra elevação apreciável do ponto de ebulição. A temperatura do vapor de aquecimento que entra no primeiro efeito é de  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a temperatura de ebulição da solução no último efeito é de  $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os coeficientes globais de transferência de calor, em  $\text{W} / \text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , são 2500 para o primeiro efeito, 2000 para o segundo efeito e 1500 para o terceiro efeito. (A solução se torna mais concentrada, a viscosidade aumenta e o coeficiente global é reduzido). Em que temperaturas o líquido ferverá no primeiro e segundo efeito?

$$q_1 = A_1 U_1 \Delta T_1$$

$$A_1 U_1 \Delta T_1 = A_2 U_2 \Delta T_2$$

$$q_2 = A_2 U_2 \Delta T_2$$

$$A_1 U_1 \Delta T_1 = A_2 U_2 \Delta T_2 = A_3 U_3 \Delta T_3$$

$$U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3 = \frac{q}{A}$$

$$U_1 A_1 \Delta T_1 = U A \Delta T$$

$$U_1 \Delta T_1 = U \Delta T = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}}$$

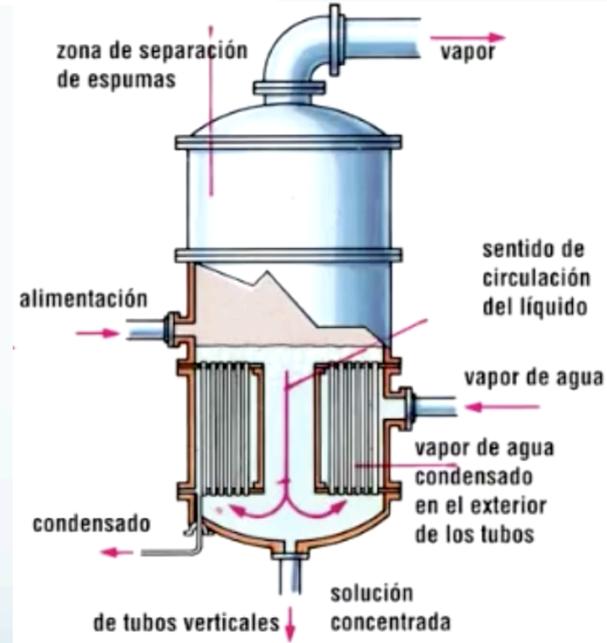
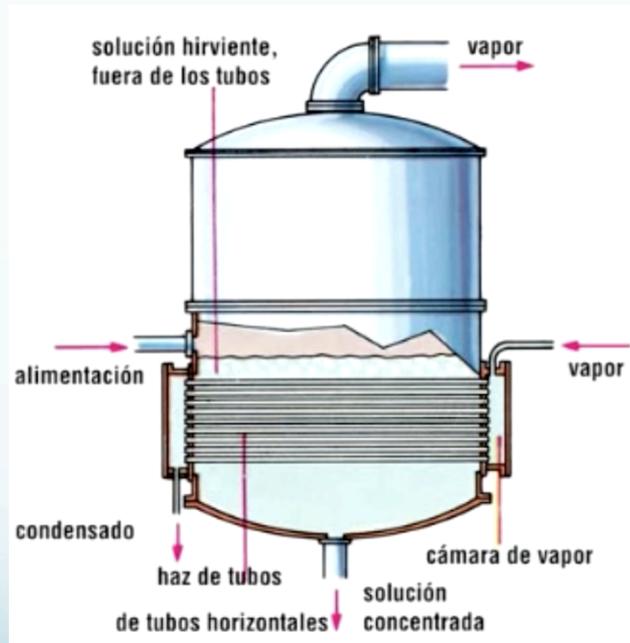
$$\Delta T_1 = \frac{1}{U_1} \left( \frac{\Delta T}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \right)$$

$$\Delta T_1 = \frac{\frac{1}{2500}}{\frac{1}{2500} + \frac{1}{2000} + \frac{1}{1500}} 56 = 14.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Do mesmo modo,  $\Delta T_2 = 17,9 \text{ } ^\circ\text{C}$  e  $\Delta T_3 = 23,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

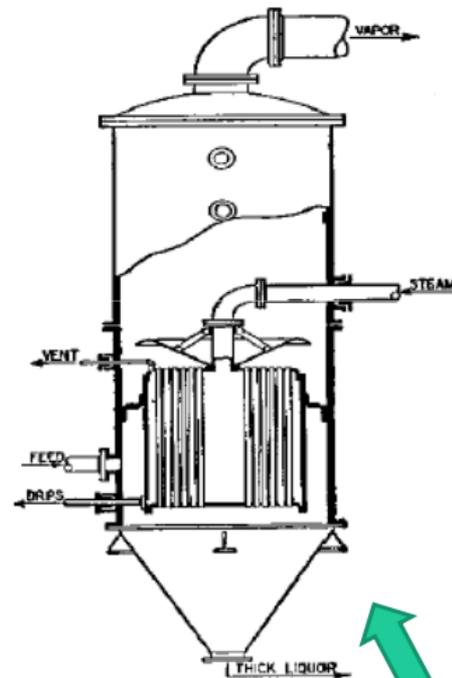
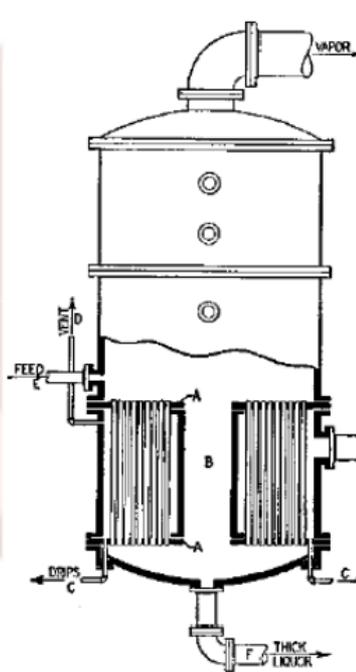
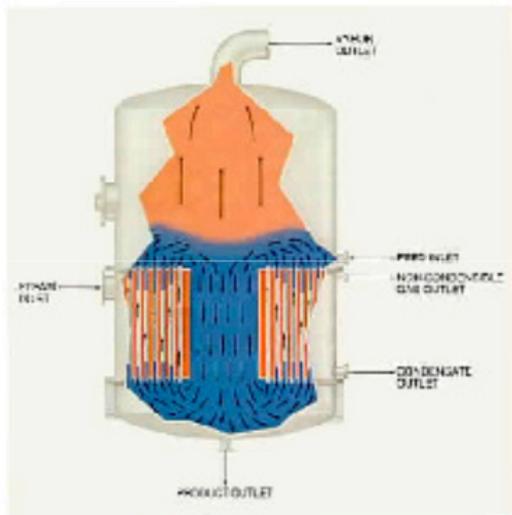
Conseqüentemente, a temperatura de ebulição no primeiro efeito será  $108 - 14,3 = 93,7^\circ\text{C}$ , e no segundo efeito,  $75,8^\circ\text{C}$ .

# Tipos de evaporadores



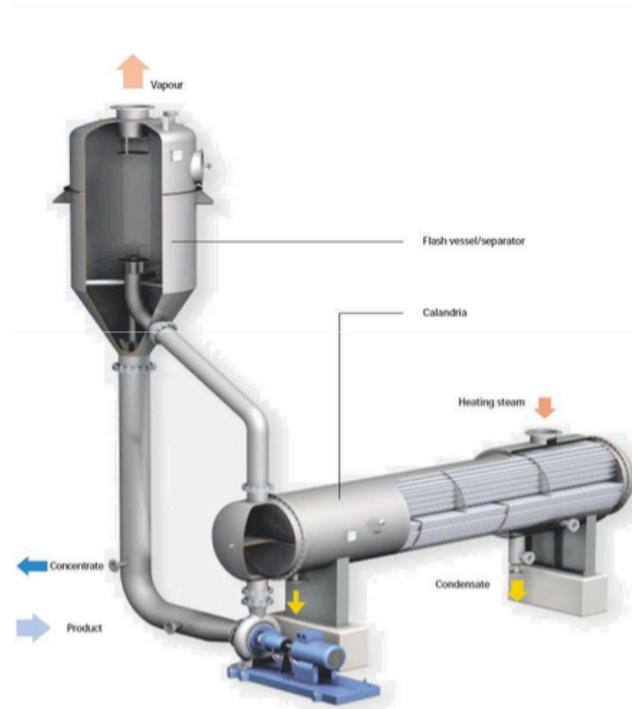
<https://youtu.be/nNneolStja4>

# Evaporadores de circulação natural de tubos curtos verticais



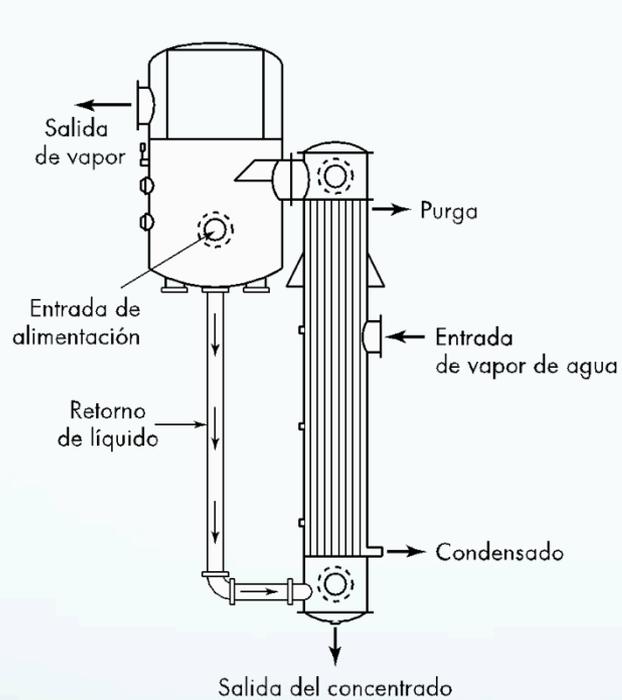
De cesta

# Evaporadores de circulação forçada

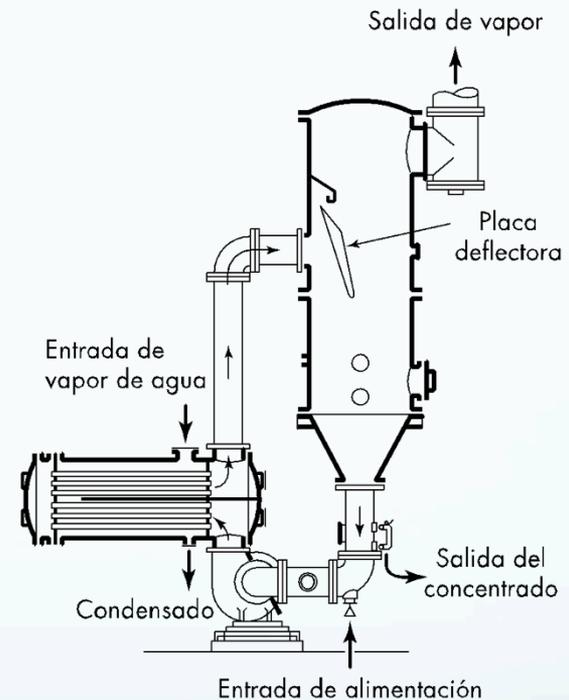


# **Evaporador de filme ascendente**

- **Um evaporador de filme ascendente consta de um feixe de tubos dentro de uma carcaça, os tubos são mais compridos que o de outros evaporadores (10-15m).**
- **O produto utilizado deve ser de baixa viscosidade devido ao movimento ascendente ser natural.**
- **Os tubos se aquecem com o vapor existente no exterior de tal forma que o líquido ascende pelo interior dos tubos, devido ao arrastre exercido pelo vapor formado. O movimento desse vapor gera uma película que se move rapidamente para o reservatório superior.**



Evaporadores de tubos longos verticais, película ascendente



Evaporador de circulação forçada com elemento de aquecimento separado

## Evaporador de tubos longos verticais

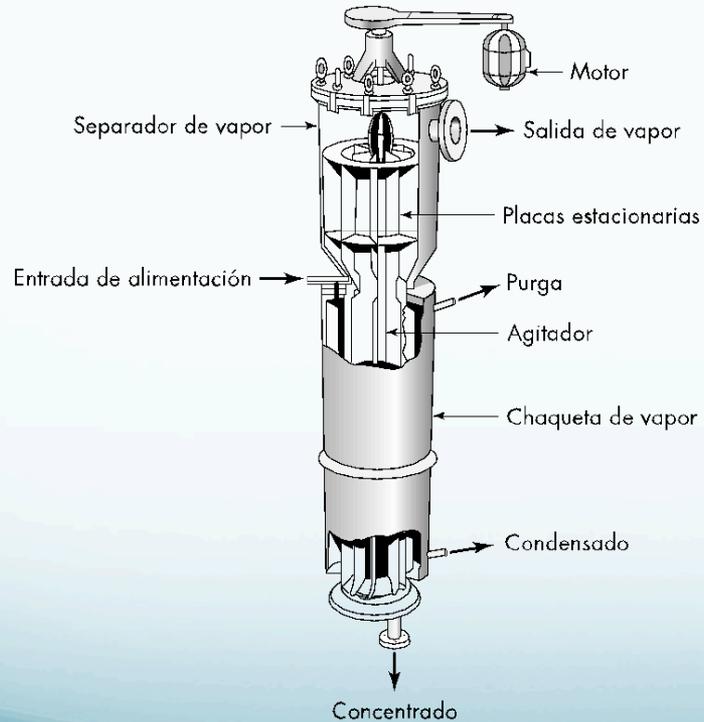


## **Evaporador de filme descendente**

**Neste evaporador, uma película fina de líquido desce por gravidade dentro dos tubos e, externamente aos tubos, circula o vapor de aquecimento.**



# Evaporador de película agitada



**FIGURA 16.2**  
Evaporador de película agitada.

[https://youtu.be/HxKL\\_M404X4](https://youtu.be/HxKL_M404X4)

# PERFORMANCE DE EVAPORADORES TUBULARES

## Principais medidas de performance:

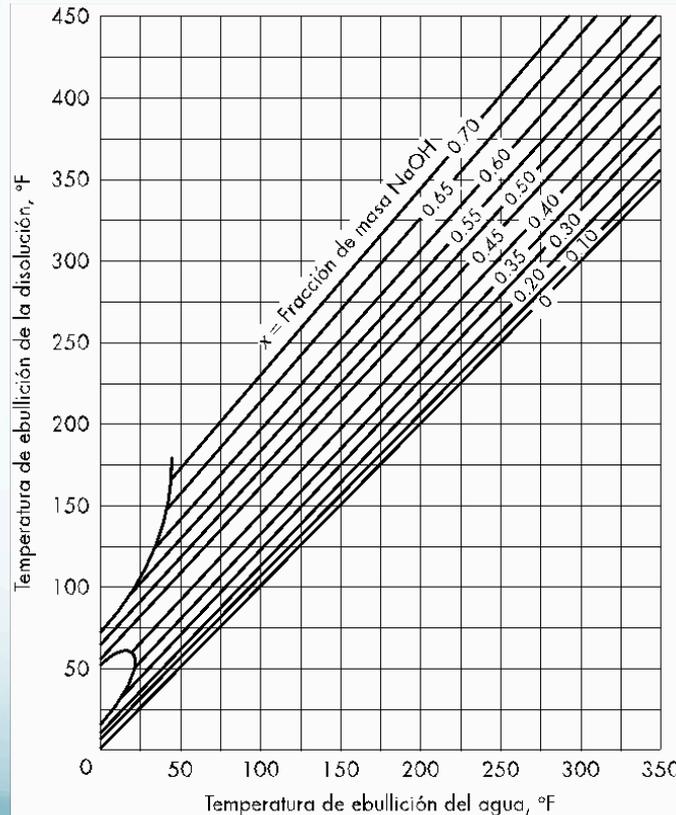
- Capacidade: Massa de água vaporizada por unidade de tempo;
- Economia: Massa de água vaporizada por massa de vapor consumido (menor que 1 no de simples efeito e elevado para múltiplo efeito);
- Consumo de vapor: massa de vapor consumida por unidade de tempo que é igual à capacidade dividida pela economia.

## Elevação do ponto de ebulição e regra de Dühring

A pressão de vapor da maioria das soluções aquosas é menor que a da água à mesma temperatura. Conseqüentemente, a uma dada pressão, a temperatura de ebulição das soluções é maior que a da água pura.

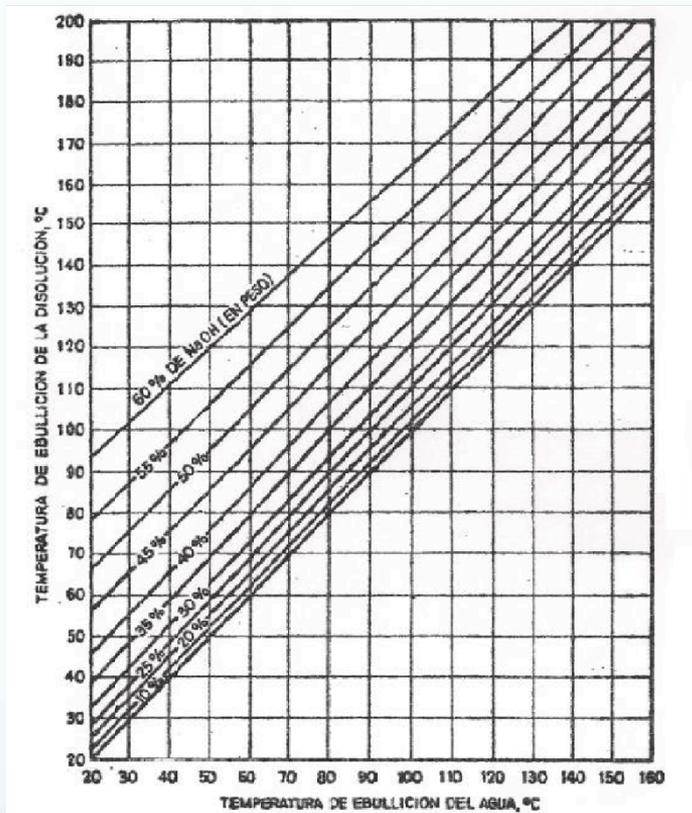
- O aumento do ponto de ebulição da água é conhecido como elevação do ponto de ebulição, E.P.E. ou BPE
- É pequeno para soluções diluídas e para soluções de colóides orgânicos,
- Pode atingir um valor de até 80 ° C (144 ° F) para soluções concentradas de sais inorgânicos.

**Regra de Dühring:** a temperatura de ebulição de uma determinada solução é uma função linear da temperatura de ebulição da água pura com a mesma pressão



**FIGURA 16.3**

Líneas de Dühring, para el sistema de hidróxido de sodio-agua. (Según McCabe.<sup>8</sup>)



Exemplo: Qual a elevação do ponto de ebulição de uma solução de NaOH 60% quando a temperatura de ebulição do solvente puro é de 95°C? (Resposta:  $T_{\text{eb.solução}}=160^{\circ}\text{C}$ ; e.p.e.=65°C)

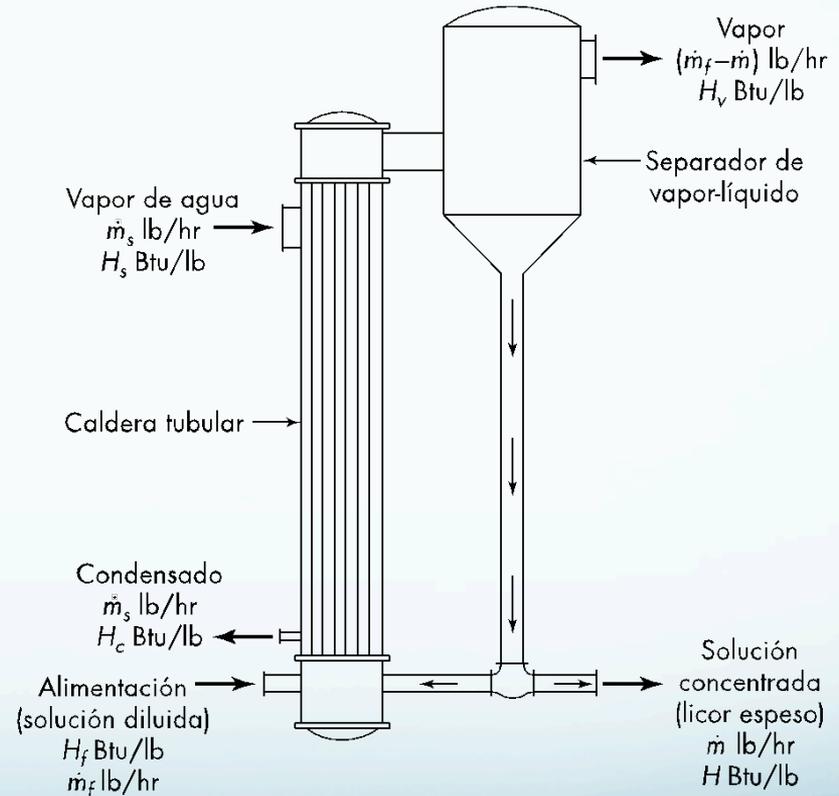
## Economia de um evaporador

- O principal fator que influencia a economia de um sistema de evaporação é o número de efeitos. Por design adequado, a entalpia de vaporização do vapor de aquecimento que entra no primeiro efeito é usada uma ou mais vezes dependendo do número de efeitos.
- A economia também é afetada pela temperatura da alimentação. Se a temperatura for inferior à temperatura de ebulição no primeiro efeito, a carga de aquecimento usa uma parte da entalpia de vapor do vapor e apenas uma parte está disponível para evaporação; se o alimento estiver a uma temperatura mais elevada do que a temperatura de ebulição, a vaporização repentina que é produzida contribui para gerar evaporação adicional à produzida pela entalpia de vaporização no vapor de aquecimento. Do ponto de vista quantitativo, a economia do evaporador é inteiramente uma questão de equilíbrios de entalpia.

# Balances de entalpia para evaporador de efeito único

Em um evaporador de efeito único, o calor latente de condensação do vapor é transferido através de uma superfície de aquecimento para vaporizar a água de uma solução.

São necessários dois balanços de entalpia, um para o vapor de água e um para o lado líquido.



- $T_s$  é a temperatura de condensação do vapor de água,  $T$  é a temperatura de ebulição do líquido no evaporador e  $T_f$  é a temperatura da alimentação.
- Supõe-se que não há vazamento ou arraste, que o fluxo de não condensáveis é insignificante e que as perdas de calor do evaporador não precisam ser consideradas.
- A corrente de vapor de água que entra na câmara de condensação pode ser superaquecida, e o condensado geralmente deixa a câmara de condensação um pouco sub-arrefecida abaixo da temperatura de ebulição. No entanto, tanto o superaquecimento do vapor de água como o sub-resfriamento do condensado são pequenos e é aceitável negligenciá-los ao aplicar um equilíbrio de entalpia.
- Com estes pressupostos, a diferença entre a entalpia do vapor de água e a do condensado é simplesmente  $\lambda_s$ , o calor latente de condensação do vapor de água. O equilíbrio de entalpia para o lado do vapor é

$$q_s = \dot{m}_s (H_s - H_c) = \dot{m}_s \lambda_s$$

$q_s$  = velocidade de transferência de calor através da superfície de aquecimento

$H_s$  = entalpia específica do vapor d'água

$H_c$  = entalpia específica do condensado

$\lambda_s$  = calor latente de condensação do vapor d'água

$\dot{m}_s$  = velocidade de fluxo de vapor de água

O balanço de entalpia para o lado do licor é

$$q = (\dot{m}_f - \dot{m})H_v - \dot{m}_f H_f + \dot{m}H$$

$q$  = velocidade de transferencia de calor da superficie de aquecimento em direção ao líquido

$H_u$  = entalpia específica do vapor

$H_f$  = entalpia específica da solução diluida

$H$  = entalpia específica da solução concentrada

Na ausência de perdas de calor, o calor transferido do vapor de aquecimento para os tubos é igual ao transferido dos tubos para o licor e, portanto,

$$q_s = q$$

Assim, combinando equações, teremos:

$$q = \dot{m}_s \lambda_s = (\dot{m}_f - \dot{m})H_v - \dot{m}_f H_f + \dot{m}H$$

## Balanco de entalpia com calor de diluição insignificante

Para soluções cujas resistências dissipativas são insignificantes, os balanços para um evaporador de um único efeito são calculados a partir das calorias e temperaturas específicas das soluções. A taxa de transferência de calor  $q$  no lado do licor inclui  $q_f$ , o calor transferido para a solução diluída necessária para variar a sua temperatura de  $T_f$  para a temperatura de ebulição  $T$  o qual é o calor necessário para realizar a evaporação. Isto é,

$$q = q_f + q_v$$

$$q_f = \dot{m}_f c_{pf} (T - T_f)$$

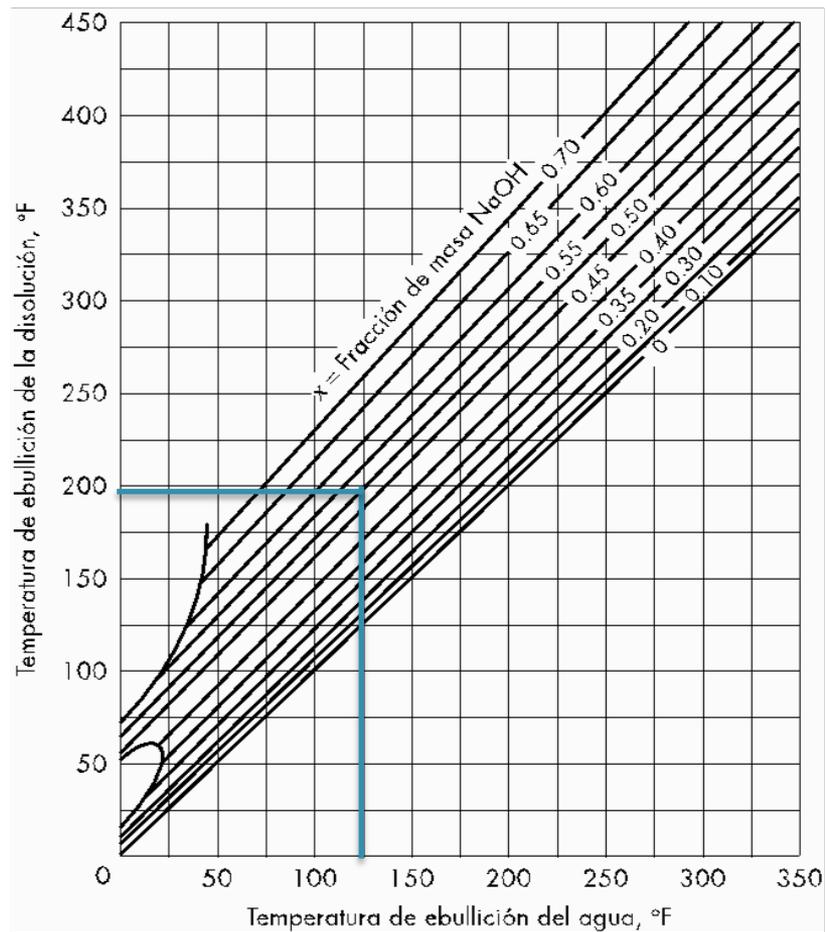
$$q_v = (\dot{m}_f - \dot{m}) \lambda_v$$

$$q = \dot{m}_f c_{pf} (T - T_f) + (\dot{m}_f - \dot{m}) \lambda$$

## EXEMPLO:

Um evaporador de efeito único concentra 20.000 lb / h de uma solução de hidróxido de sódio de 20 a 50% de sólidos. A pressão manométrica do vapor de água será de 20 psi; a pressão absoluta no espaço de vapor é de 1,93 psi. O coeficiente global é estimado em 250 Btu / ft<sup>2</sup> h ° F. A temperatura da alimentação é de 100 ° F. Calcule a quantidade de vapor de água consumida, a economia e a superfície de aquecimento necessária.

- Temperatura de vaporização da sol. 50% a 1,93 psi (regra de Duhring) = 197°F



Sol. 20%(m) de NaOH

Para cada lb de NaOH temos 4 lb de água

Licor 50% de NaOH

Para cada lb de NaOH temos 1 lb de água

em 20.000 lb  $\rightarrow$  4000 lb de NaOH

- 3 lb de água  
lb de NaOH

$$\rightarrow m_v = 12000 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

4000 lb NaOH + 4000 lb H<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  8000 lb licor

- Entalpia da solução  $H_f = 55 \text{ Btu/lb}$
- Entalpia do licor espesso  $H = 221 \text{ Btu/lb}$
- Entalpia do vapor  $H_v = 1149 \text{ Btu/lb}$
- Calor latente a 20 psi:  $\lambda_s = 939 \text{ Btu/lb}$

$$q = m_v H_v + m H - m_s H_f = 12000 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 1149 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + 8000 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 221 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} - 20000 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 55 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} = 14.456.000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{q}{\lambda_s} = \frac{14.456.000 \text{ Btu}}{939 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \cdot \text{h}} = 15.400 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\text{ECONOMIA} = \frac{12000 \frac{\text{lb}}{\text{h}}}{15400 \frac{\text{lb}}{\text{h}}} = 0,78 \frac{\text{kg H}_2\text{O vaporizada}}{\text{kg vapor utilizado}}$$

$$q = UA\Delta T \Rightarrow A = \frac{q}{U\Delta T}$$

$$A = \frac{14456000 \text{ Btu/hr}}{250 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{ h } ^\circ\text{F}} (259 - 19)^\circ\text{F}} = 930 \text{ ft}^2 = 86.4 \text{ m}^2$$

↳  $T_{\text{vapor}} \approx 20^\circ\text{C}$