

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_{solvente} e x_{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.

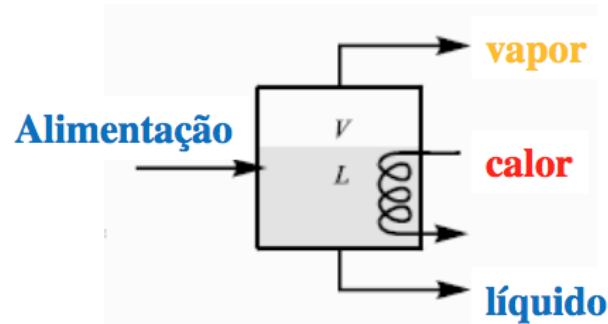
Incrustações: Algumas soluções depositam crostas na superfície de aquecimento. Nestes casos, o coeficiente global diminui progressivamente até existir um momento em que é necessário interromper a operação do evaporador e limpar os tubos.

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.

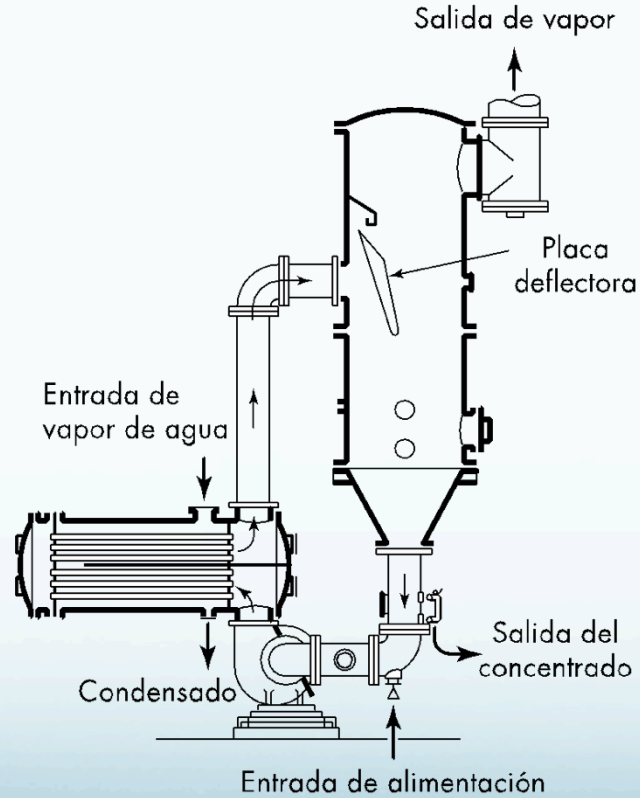
Outras características importantes: calor específico, viscosidade, temperatura de congelamento, liberação de gás durante a ebulição, toxicidade, riscos de explosão, radioatividade e a necessidade de operação estéril

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



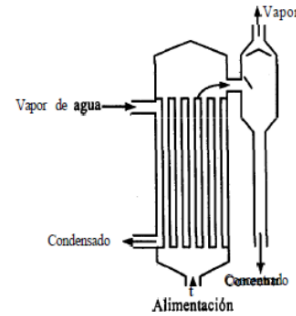
Os principais tipos de evaporadores aquecidos com vapor d'água que são usados atualmente são:

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

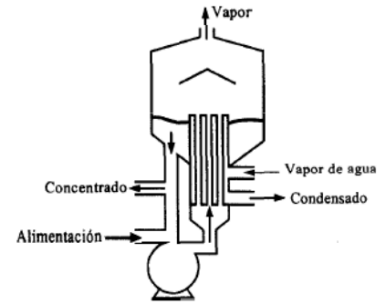
- a) Circulação natural
- b) Circulação forçada
- c) Fluxo ascendente (filme ascendente).
- d) Fluxo descendente (filme descendente).

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

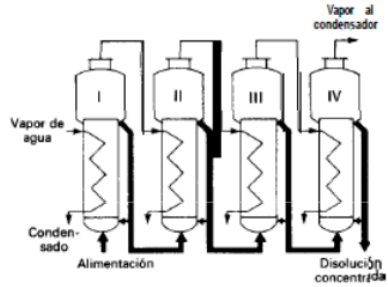
- O uso de uma bomba aumenta a velocidade de circulação do líquido: 2 a 6 m/s
- O líquido está submetido a uma pressão tal que a evaporação não ocorre no interior dos tubos.
- Permitem a obtenção de graus de concentração mais elevados
- Permitem a utilização de líquidos que formam incrustações
- Útil 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

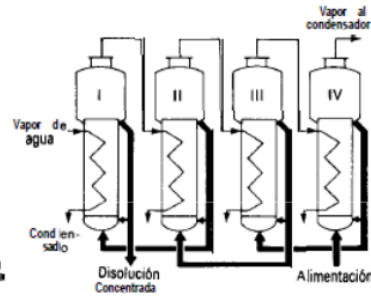
- A maioria dos evaporadores operam com vapor d'água que se condensa sobre a superfície de tubos
- Usualmente o vapor é utilizado a baixa pressão, abaixo de 3 atm, e o líquido que será evaporado está sob vácuo moderado, cerca de 0,05 atm
- Quando um evaporador simples é utilizado, o vapor do líquido 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

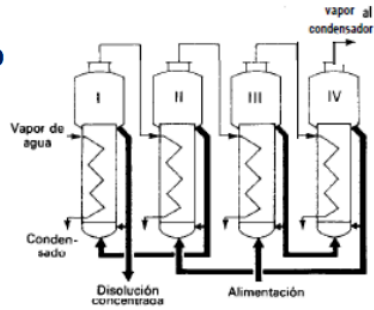
Alimentação direta



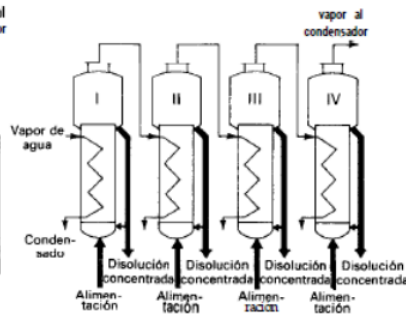
Alimentação inversa



Alimentação mista



Alimentação paralela

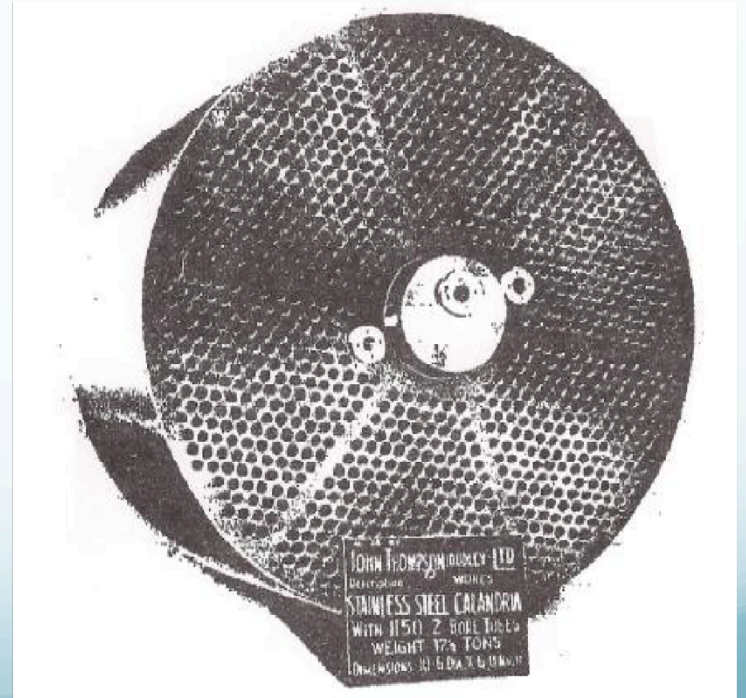
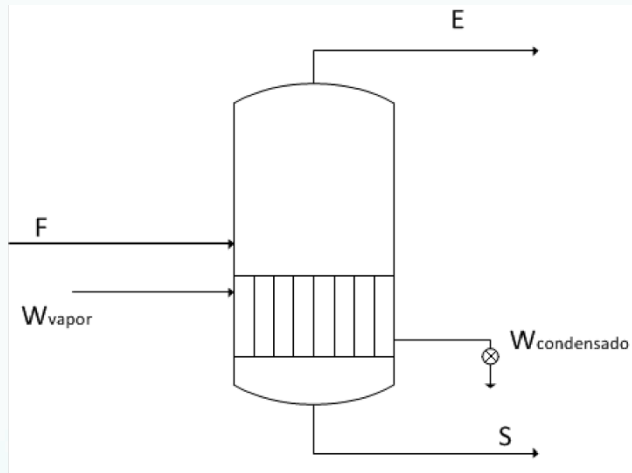


O funcionamento de um evaporador sob vácuo

- 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

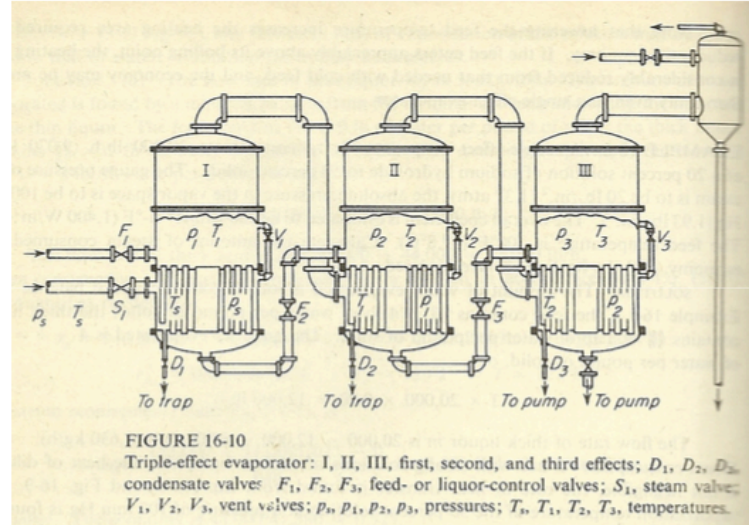
- Após o último efeito há um condensador e um sistema de vácuo (ejetor de ar)
- O vapor de uma unidade deverá estar a uma temperatura mais elevada que o ponto de ebulição do líquido na unidade adjacente. Pro isso opera-se a pressões cada vez menores



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).

$$\Delta T = T_s - T_3$$

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

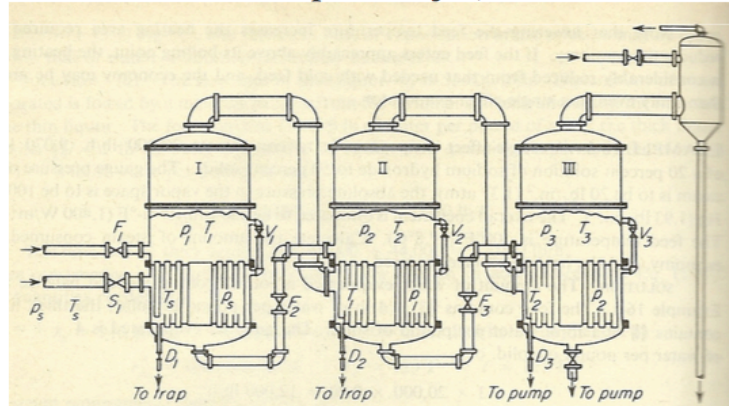


FIGURE 16-10

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?

$$q_1 = A_1 U_1 \Delta T_1$$

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

$$q_2 = A_2 U_2 \Delta T_2$$

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

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

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

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

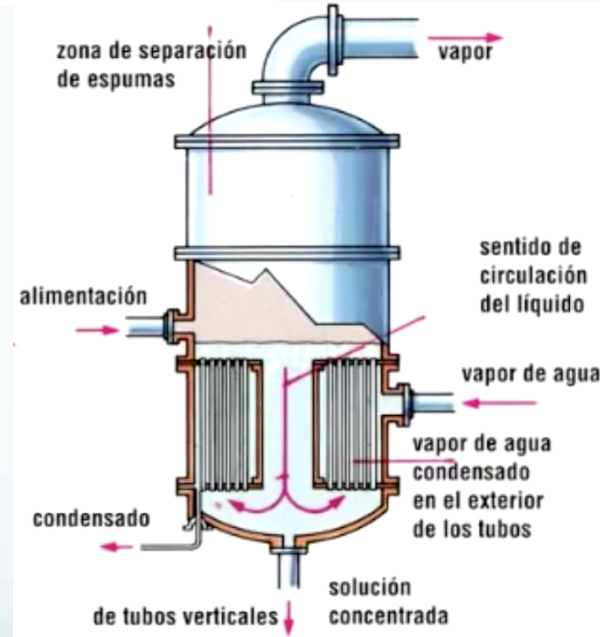
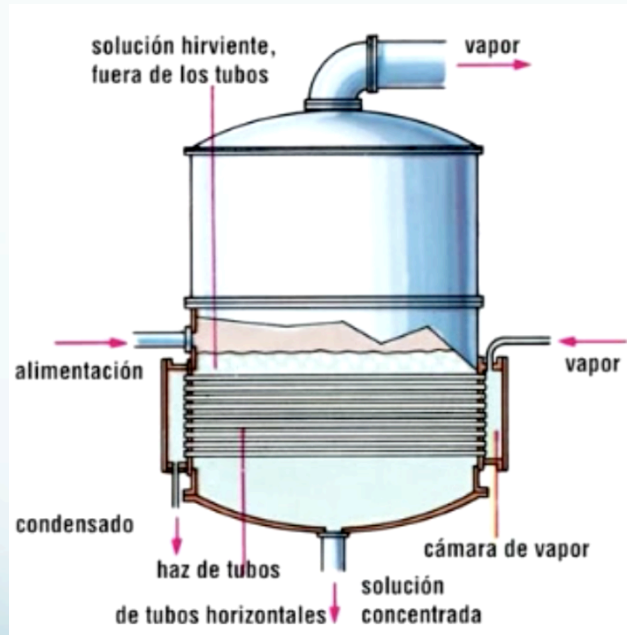
$$\Delta T_1 = \frac{1}{U_1} \left(\frac{\Delta T}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \right)$$

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

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

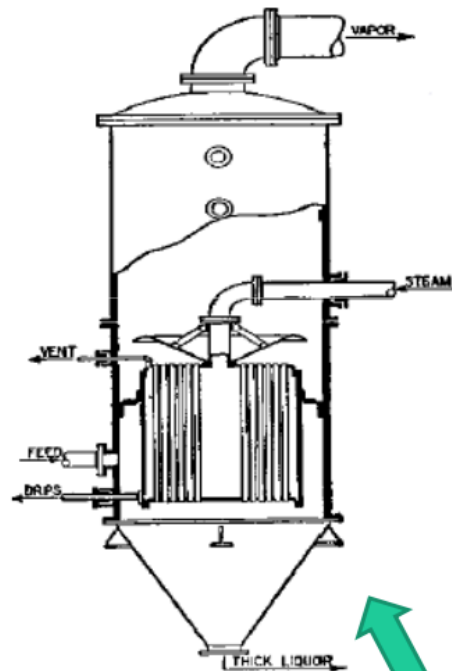
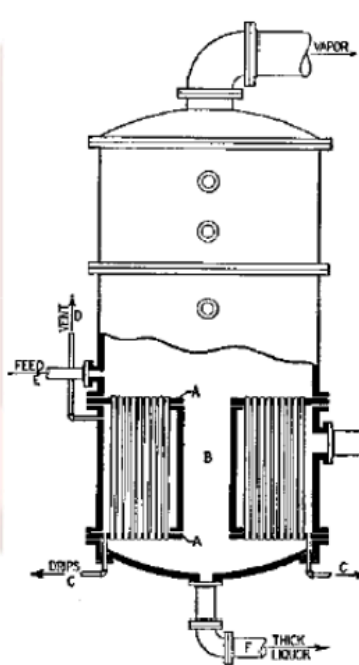
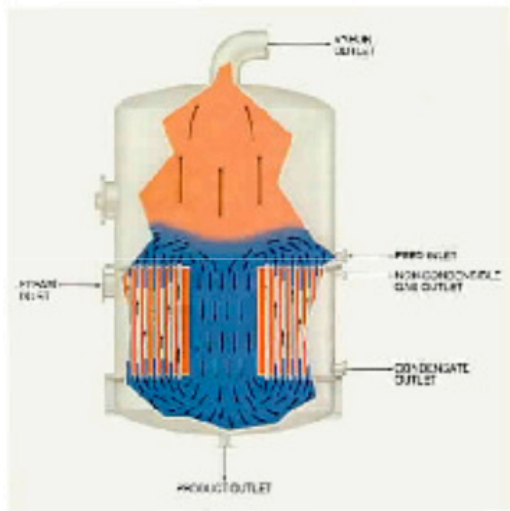
Conseqüentemente, a temperatura de ebulição no primeiro efeito será $108 - 14,3 = 93,7^\circ\text{C}$, e no segundo efeito, $75,8^\circ\text{C}$.

Tipos de evaporadores



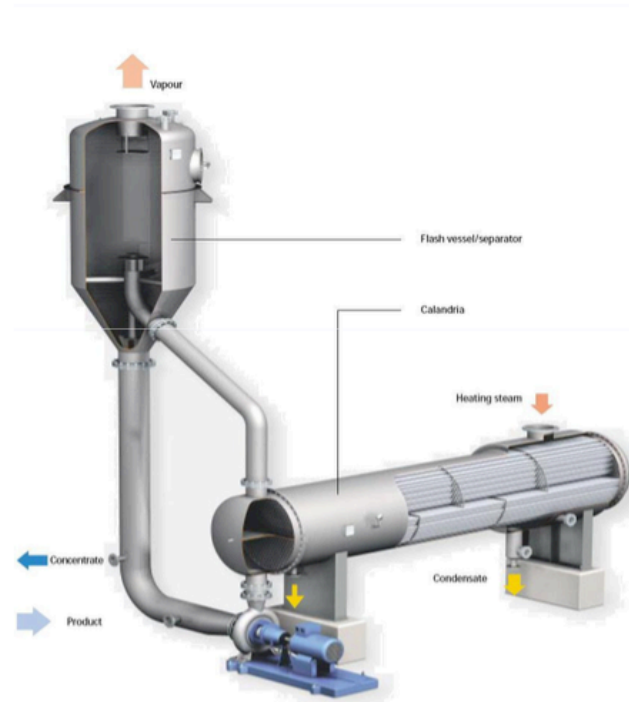
<https://youtu.be/nNneolStja4>

Evaporadores de circulação natural de tubos curtos verticais



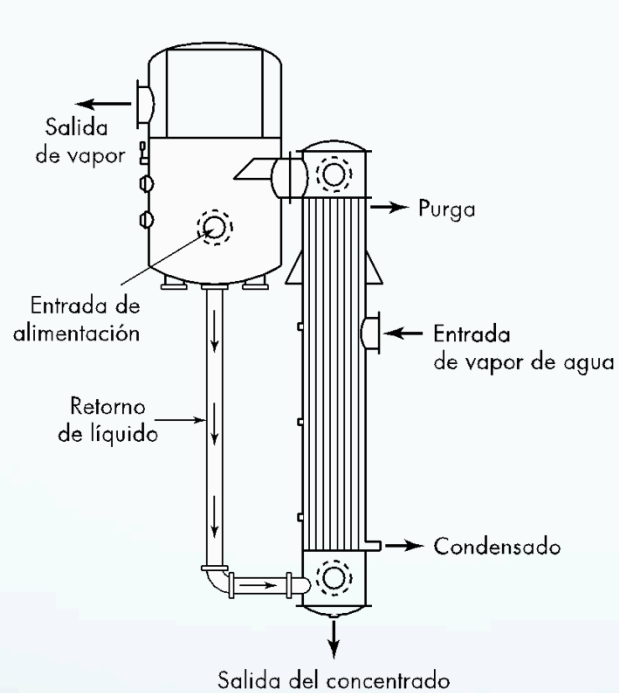
De cesta

Evaporadores de circulação forçada

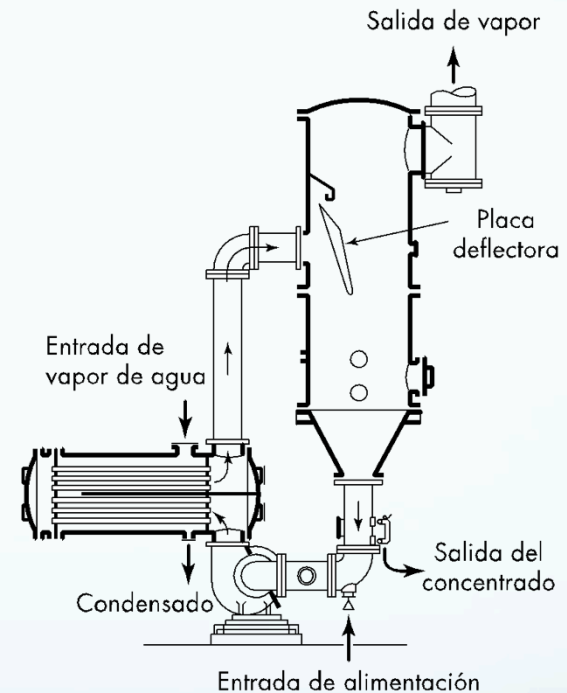


Evaporador de filme ascendente

- **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

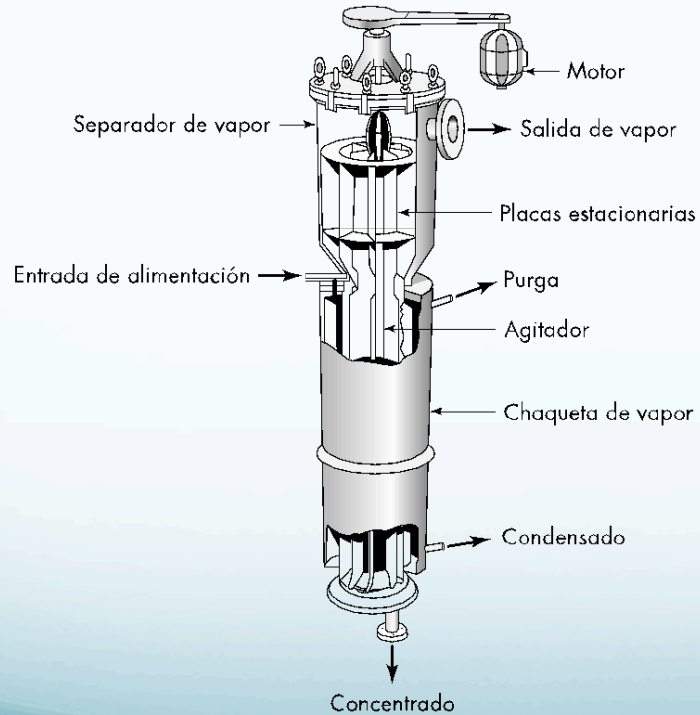


FIGURA 16.2

Evaporador de película agitada.

https://youtu.be/HxKL_M404X4

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

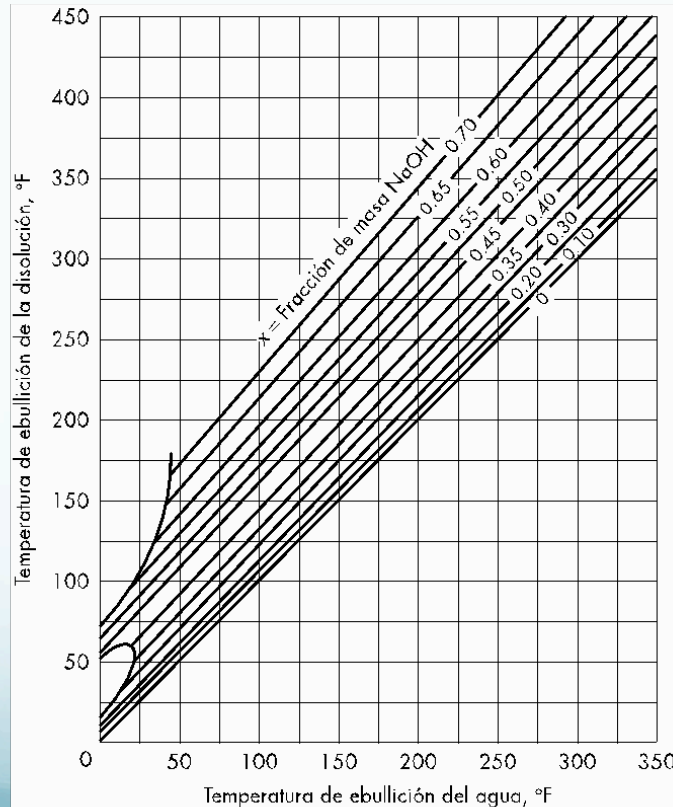
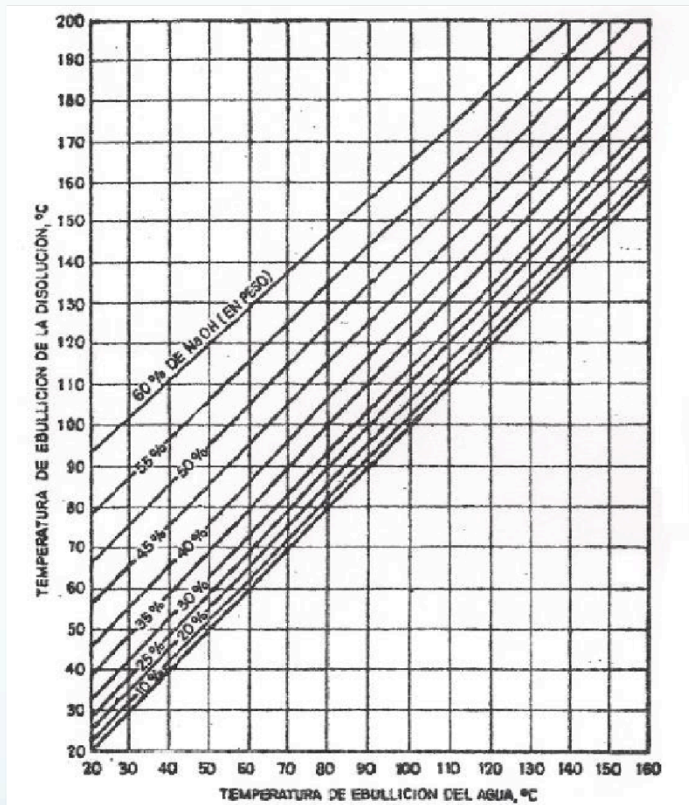


FIGURA 16.3

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



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)

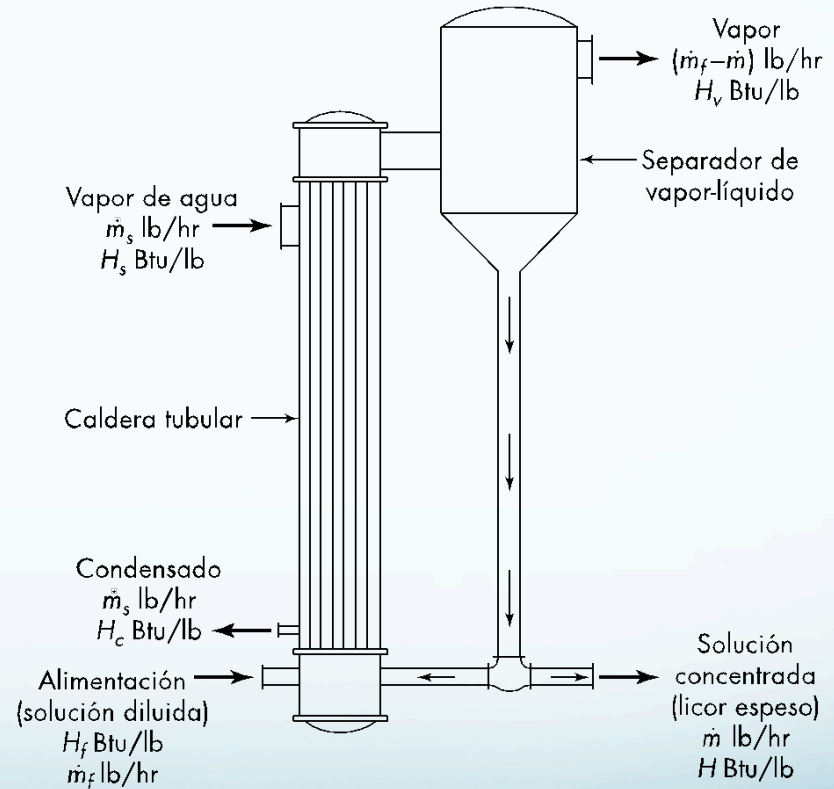
Economia de um evaporador

- 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 λ_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

λ_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 diluicao insignificante

Para solucoes cujas resistencias dissipativas sao insignificantes, os balanços para um evaporador de um unico efeito são calculados a partir das calorias e temperaturas específicas das solucoes. A taxa de transferencia de calor q no lado do licor inclui q_f , o calor transferido para a solucao diluida necessaria para variar a sua temperatura de T_f para a temperatura de ebulicao T o qual é o calor necessario para realizar a evaporacao. Isto é,

$$q = q_f + q_v$$

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

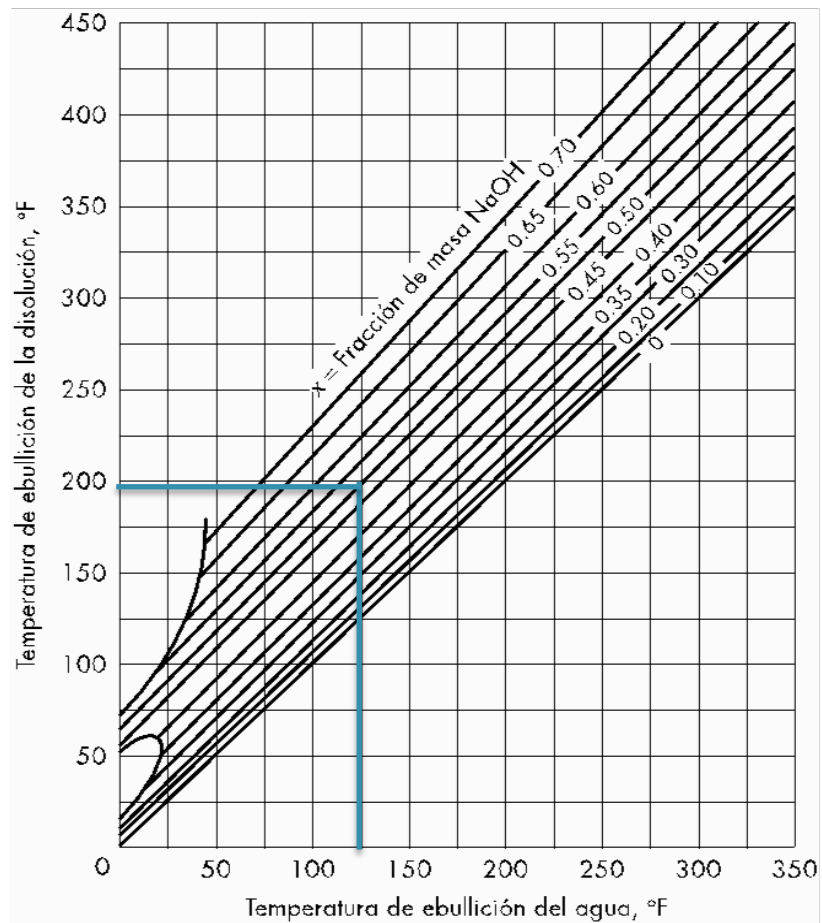
$$q_v = (\dot{m}_f - \dot{m}) \lambda_v$$

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

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 / ft² 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 H₂O \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: $\lambda_s = 939 \text{ Btu/lb}$

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

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

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

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

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

↳ $T_{\text{vapor}} \approx 20 \text{ psi}$