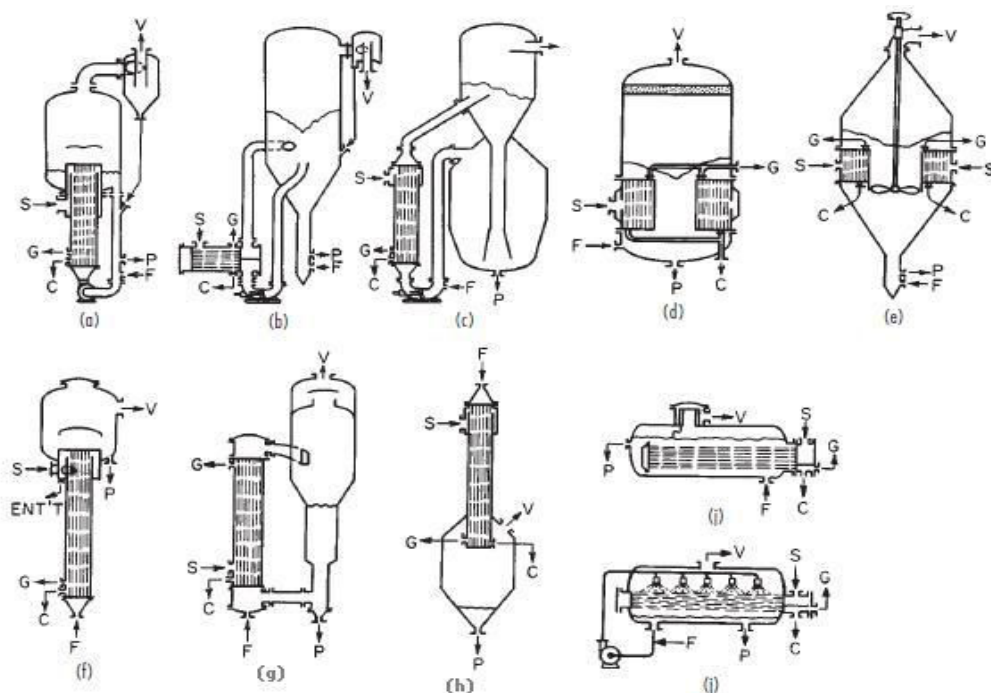


PROCESSO DE EVAPORADORES EM ALIMENTOS

A evaporação é uma operação através da qual a água é removida em parte ou quase totalmente do alimento. A fonte de aquecimento dos alimentos utilizada é o vapor de água e sendo efetuada em equipamentos chamados de Evaporadores que concentra o alimento até o total de sólidos desejados.

CONCENTRAÇÃO / EVAPORAÇÃO

Por concentração ou evaporação, entende-se um processo que proporciona a evaporação ou retirada de uma solução diluída (no caso é a água contida nos alimentos in natura), aumentando a sua concentração sob forma de vapor obtido através da transferência de calor ao produto alimentício. Em qualquer dos casos ocorrem diversos processos cinéticos, com transferência de calor para os alimentos, os quais se utilizam métodos matemáticos de cálculos para determinar as velocidades do processo; balanço de massa; consumo de vapor; área de transferência térmica, etc. O equipamento utilizado é o evaporador que consiste em uma câmara, dentro da qual existe um trocador de calor com aquecimento indireto que proporciona o meio de transmissão de calor ao produto por meio de vapor à baixa pressão. A figura-1 mostra alguns modelos de evaporadores.



(a)-Circulação natural; (b)-Circulação forçada ; (c)-Circulação natural cristalizador; (d)-Tubo vertical; (e)-Tubo vertical; (f)-Tubo longo; (g)-Circulação natural tubos longo; (h)-Película descendente; (i)-Tubos horizontal.

Figura-1: Modelos de Evaporadores

TIPOS DE EVAPORADORES

DESCONTÍNUOS- O produto se aquece em um recipiente esférico, envolto por uma camisa de vapor. Este recipiente é aberto ou conectado a um condensador ou a um sistema à vácuo (figura-2). A área de transferência de calor neste tipo de evaporador é muito baixa e a residência do produto pode chegar a várias horas. O aquecimento do produto é feito por convecção natural.

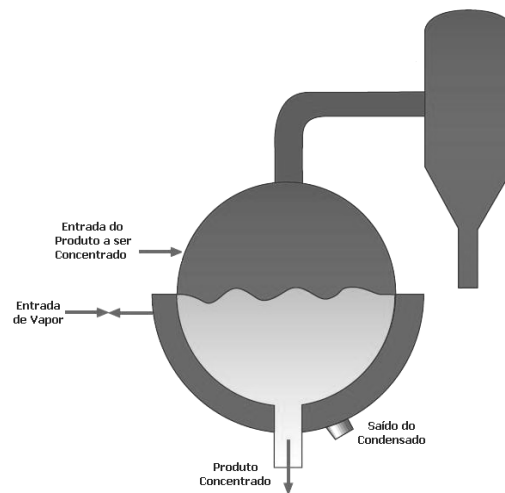


Figura-2: Evaporador Descontínuo

CONVECÇÃO OU CIRCULAÇÃO NATURAL- São dotados de tubos curtos verticais, dentro de um corpo de vapor, este dispositivo é chamado de calandra. O produto é aquecido e sobe através dos tubos por convecção natural e o vapor é condensado pelo exterior dos tubos. O líquido concentrado retorna à base do recipiente através de uma seção anular central (figura-3).

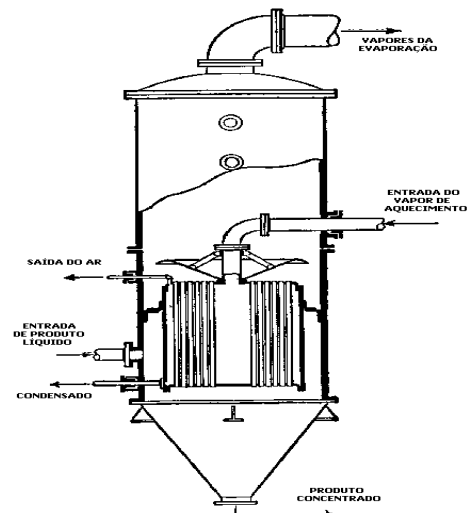


Figura-3: Evaporador Circulação Natural

PELÍCULA ASCENDENTE- Podem evaporar alimentos líquidos de baixa viscosidade, os quais fervem no interior de tubos verticais. Estes tubos se aquecem devido ao vapor existente no exterior, de tal maneira que o líquido ascende pelo interior dos tubos

arrastado por vapores formados na parte inferior. O movimento ascendente dos vapores produz uma película que se move rapidamente para cima (figura-4). Este tipo de evaporador alcança elevados coeficientes de transferência de calor, podendo-se recircular o alimento líquido até que se alcance a concentração desejada. O tempo de residência é de 3-4 segundos.

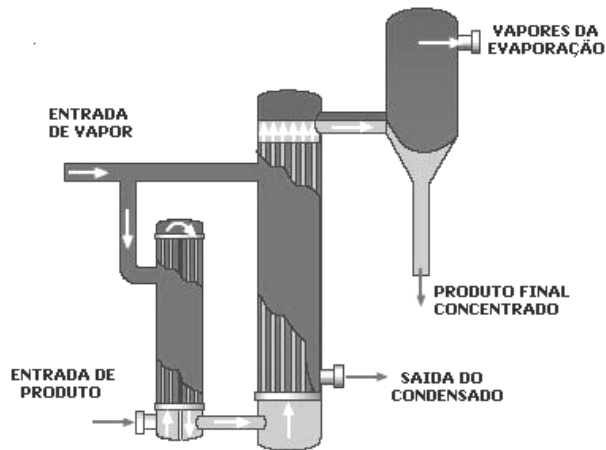


Figura-4: Evaporador de Película Ascendente

PELÍCULA DESCENDENTE- Estes evaporadores desenvolvem uma fina película de líquido dentro dos tubos verticais que desce por gravidade (figura-5). Também permitem instalar um maior número de efeitos do que o evaporador de película ascendente e podem processar líquidos mais viscosos e mais sensíveis ao calor. O tempo de residência é de 20-30 segundos.

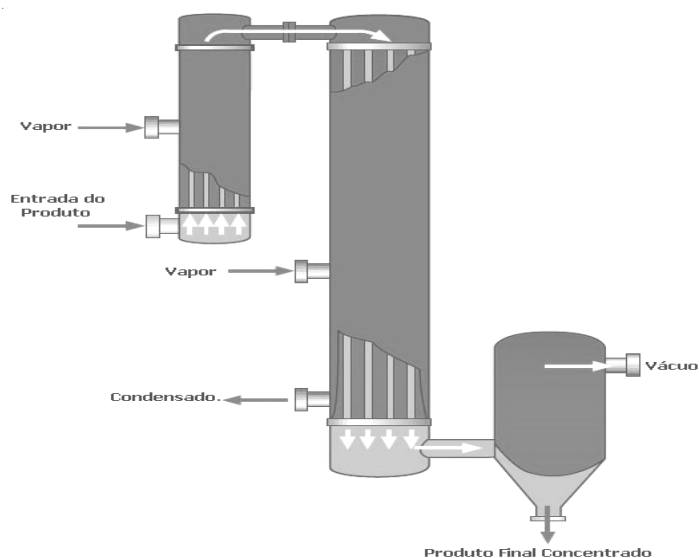


Figura-5: Evaporador de Película Descendente

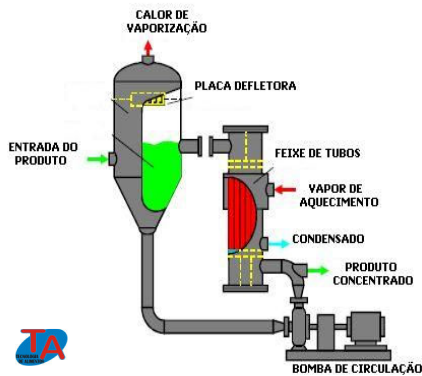
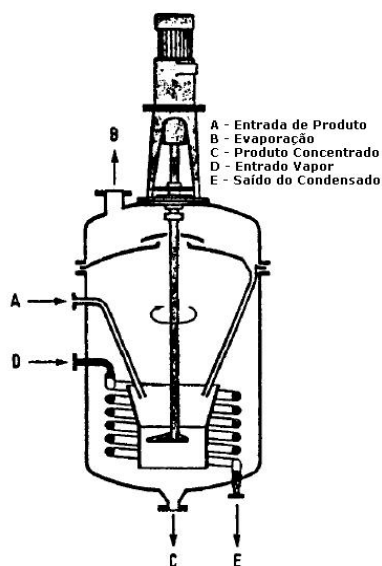


Figura-6: Evaporador de Circulação Forçada

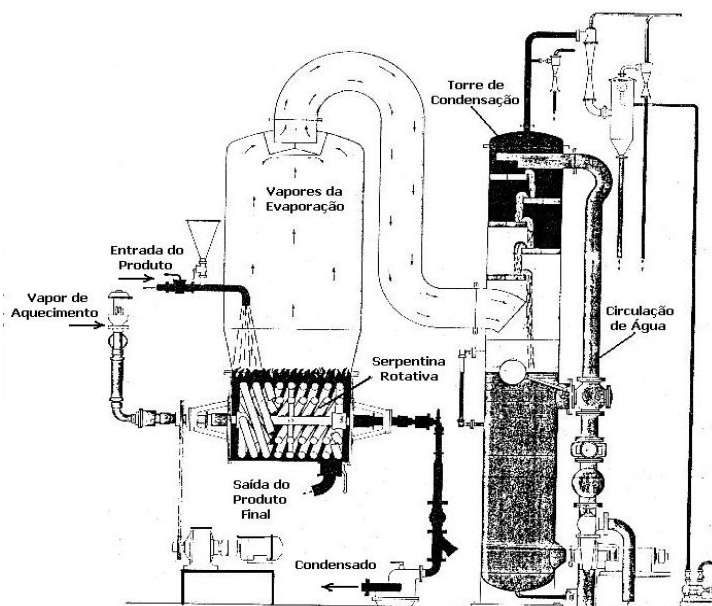
CIRCULAÇÃO FORÇADA- Consta de um trocador de calor com aquecimento indireto, onde o líquido circula em elevadas velocidades, devido à presença de bombas de fluxo axial. Devido à elevada carga hidrostática da parte superior dos tubos, qualquer possibilidade de ebulição do líquido é desprezada. O líquido que entra no evaporador se evapora instantaneamente, devido à diferença de pressão entre a parte interior e exterior do tubo. Possui os menores custos de fabricação e operação (figura-6).

PELÍCULA AGITADA- A configuração cilíndrica do sistema produz menores áreas de transmissão de calor por unidade de volume de produto, sendo necessária a utilização de vapor à alta pressão, como meio de aquecimento com o objetivo de conseguir elevadas temperaturas na parede e velocidades de evaporação razoáveis. A grande desvantagem deste sistema são os custos de fabricação e manutenção, assim como a baixa capacidade de processamento.

SERPENTINA ROTATIVA- É constituída de uma ou mais serpentinas de vapor que giram abaixo da superfície do líquido em ebulição. As de serpentinas rotativas ao girar proporcionam turbulência ao líquido, o que melhora a transferência de calor e, ao mesmo tempo, diminui a taxa de queima (figura-7). O evaporador com serpentina rotativa a vácuo é particularmente indicado para elaboração de produtos de tomate de elevada concentração, além de poder funcionar de forma contínua.



SERPENTINA VERTICAL



SERPENTINA HORIZONTAL



Figura-7: Evaporadores de Serpentina

MÚLTIPLOS EFEITOS- Os evaporadores de múltiplos efeitos (dois ou mais) conjugam, em série, dois ou mais evaporadores simples, numa mesma estrutura ou em estruturas separadas. Os sistemas utilizados são os mais diversos, podendo haver associação de descontínuo + convecção natural, convecção natural + serpentina rotativa, tubos longos + tubos longos (geralmente com película descendente de circulação forçada) e assim por diante. A grande vantagem desta conjugação é a economia de vapor gasta por quilo de água evaporada. A figura-8 mostra o princípio de funcionamento de evaporadores de múltiplo efeito na concentração de suco de laranja.

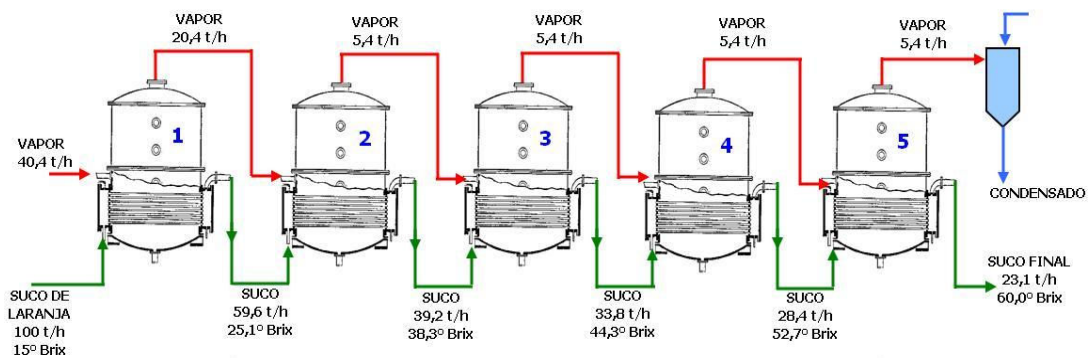


Figura-8: Evaporadores de múltiplo estágio. Neste esquema o projeto é de cinco estágios

AQUECIMENTO DIRETO - Evaporadores de aquecimento direto significa troca de calor com o meio de aquecimento em contato direto com o produto a ser aquecido.

Um evaporador atmosférico de aquecimento direto usa queimador invertido, alimentado com gás e oxigênio sob pressão submerso no líquido a ser evaporado. Nesse tipo de evaporador, não existe superfície de aquecimento de calor ou transmissão de calor, já que o contato é direto entre o meio de aquecimento e o produto. Esse evaporador é usado para concentrar normalmente, produtos propensos a depositar incrustações, as quais retardam a transmissão de calor sobre a superfície do trocador de calor.

Nesta linha de evaporador, existe os evaporadores chamados de “Flash”, cujo método de evaporação, é o produto ser pré-aquecido num trocador de calor convencional até cerca de 100°C, e depois enviado através de bombeamento de um tubo vertical ou diagonal, onde o vapor limpo é injetado na tangente para super aquecer o produto à temperatura desejada (120 a 150°C) figura-9. Este tipo de evaporador não é recomendado para produtos sensíveis a aquecimentos elevados.

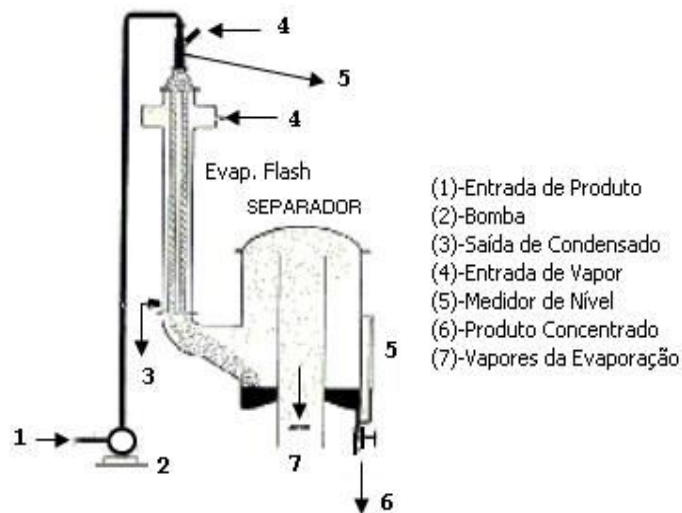


Figura-9: Evaporador de aquecimento direto (Flash)

MECANISMO DE OPERAÇÃO DOS EVAPORADORES

Estes procedimentos na evaporação, referem-se ao acompanhamento dos rendimentos do evaporador no processo de evaporação e concentração de um determinado produto.

Quantidade de Transferência de Calor

O líquido de aquecimento na evaporação é frequentemente o vapor de água condensante. A quantidade de calor transferida para o produto alimentício, é diretamente proporcional a quantidade de vapor de água que condensa e pode ser determinada pela equação 1.

$$\frac{dQ}{dT} = U \times A \rightarrow dQ = U \times A \times dT$$

$$\int dQ = \int_{T_v}^T (U \times A) dT$$

$$Q = U \times A (T_v - T) \quad (1)$$

Q = quantidade de calor transferido ao produto (kcal)

A = área de superfície de aquecimento (m²)

U = coeficiente global de transmissão de calor (kcal/m² °C)

T = temperatura do produto (°C)

Entalpia de Aquecimento

A entalpia (H) é definida para qualquer sistema pela expressão termodinâmica:

$$dH = dE + d(p \times V)$$

$$\int dH = \int dE + \int d(p \times V) \rightarrow H = E + (p \times V) \quad (2)$$

onde:

H = entalpia de aquecimento

E = energia interna do sistema

p = pressão de vapor absoluta do sistema

V = volume do sistema

Toda substância apresentam certas condições entálpicas que variam em função de sua massa, temperatura e pressão. A entalpia é expressa em calorias por unidade de massa do alimento (kcal/kg). Quando se aquece ou se resfria uma quantidade de um alimento em processo, a variação entálpica é diretamente proporcional à massa do mesmo, ao calor específico, e ao gradiente de temperatura empregado.

$$\Delta H = f (M, c_p, \Delta T) \rightarrow \Delta H = M \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

ΔH = entalpia de aquecimento

M = massa do alimento (kg, g, l)

c_p = calor específico do alimento (cal)

ΔT = variação de temperatura (°C)

Quando se atinge as condições entálpicas de uma quantidade determinada do produto alimentício, no ponto de saturação prossegue o aquecimento do alimento e o sistema não altera a sua temperatura, mas se observa uma mudança de fase que é a vaporização. No caso dos alimentos, a evaporação é a da água contida na composição do mesmo, neste ponto tem-se a entalpia de vaporização.

Cálculos no Processo de Evaporação

Para que ocorra a evaporação da água dos alimentos, é preciso que no equipamento (Evaporadores) a pressão de vapor de água interna, se iguale à pressão do ambiente, quando a massa de alimento entre em ebulição. A velocidade de evaporação está diretamente relacionada com a transmissão de calor do meio de aquecimento e as suas entalpias. Desta forma temos:

$$Q = U \times A (T_v - T_s) = M (H_v - H_c) \quad (4)$$

Q = quantidade total de vapor (kcal)

U = coeficiente global de transferência de calor (kcal/m² °C)

A = área de troca térmica (m²)

M = quantidade de produto (kg)

H_v = entalpia de vapor

H_c = entalpia do condensado de vapor

EVAPORADOR DE ÚNICO EFEITO

Quando um evaporador de um único efeito é usado, o vapor liberado do produto que está sendo concentrado é condensado e eliminado para a atmosfera. Com evaporadores de um único efeito não há reaproveitamento do vapor liberado do produto em ebulição, isto é, normalmente será necessário mais de 1 a 1,3 kg de vapor para evaporar 1 kg de água do produto. A figura-10 mostra o esquema de funcionamento de um evaporador de um único efeito.

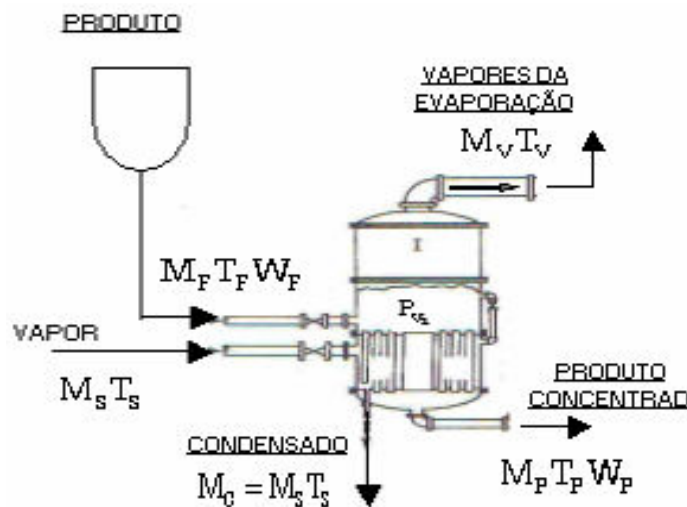


Figura-10: Esquema Evaporador Único Efeito

M_F = quantidade de produto	M_P = quantidade produto final
T_F = temperatura do produto	T_P = temperatura do produto
W_F = % sólidos solúveis do produto	W_P = % sólidos solúveis do produto
M_S = quantidade de vapor	M_V = quantidade água evaporada
T_S = temperatura do vapor	T_V = temperatura água evaporada
M_C = quantidade de condensado	P = pressão absoluta
T_C = temperatura do condensado	

O vapor saturado T_s entra no trocador de calor de vapor acima da entrada do produto T_F . A troca térmica começa a ocorrer e o produto entra em ebulição a uma temperatura T_p (temperatura de equilíbrio com a temperatura do vapor), ou seja, a quantidade de calor transferido ao produto é diretamente proporcional à quantidade de vapor que condensa. Esta quantidade é calculada pela equação de transmissão de calor.

$$Q = U \times A [T_S - T_P] = M_S [H_S - H_C]$$

Q = quantidade total de vapor

U = coeficiente global de transferência de calor

A = área da superfície de aquecimento

T_s = temperatura do vapor

T_p = temperatura do produto

M_s = quantidade de vapor

H_s = entalpia do vapor de aquecimento (tabela de vapor saturado)

H_c = entalpia do condensado liberado (tabela de vapor saturado)

Para o cálculo energético do processo de evaporação, estabelecer as equações dos balanços energéticos do evaporador.

Equação do Balanço de Massa

$$M_F + M_S = M_P + M_V + M_C \quad (\text{com } M_S = M_C)$$

Quantidade de Produto Concentrado Final

$$M_F + W_F = M_P \times W_P$$

Balanço de Energia no Processo de Evaporação

$$M_F H_F + M_S H_S = M_P H_P + M_V H_V + M_C H_C$$

$$M_S [H_S - H_C] = M_P H_P + M_V H_V - M_F H_F$$

$$M_S [H_S - H_C] = M_P H_P + M_F H_C = U \times A (T_S - T_P)$$

Temperatura do Vapor de Aquecimento

$$T_V = f \times P_V$$

A temperatura do vapor é controlada pela pressão no evaporador. O produto dentro do evaporador em ebulição vai estar em equilíbrio com a temperatura do vapor de aquecimento, portanto:

$$T_P = T_V \times PE \times M$$

PE = Elevação do ponto de ebulição do produto (PE = 0,51)

$$m = \frac{1000 \times W_P}{M [1 - W_P]}$$

m = peso específico do produto

M = peso molecular do produto

EXEMPLO-1

Em um evaporador de um único efeito, deve-se concentrar suco de laranja numa proporção de 10000 kg/h ($T=30^{\circ}\text{C}$). A concentração inicial do suco é de 15% de sólidos solúveis e, deve ser concentrado até 60% de sólidos solúveis. Calcular portanto, a temperatura de concentração do produto; o balanço de massa; a água evaporada no processo; o balanço energético do evaporador e a área da superfície de aquecimento. São conhecidos os seguintes valores:

$P_v = 0,1994$ bar (pressão de vapor)

$T_s = 120^{\circ}\text{C}$ (temperatura do vapor de aquecimento)

$U = 1000$ w/m² (coeficiente de transferência de calor)

$M = 342$ kg (peso molecular do suco de laranja)

$W_p = 60\%$ (concentração final do suco de laranja)

$W_s = 15\%$ (concentração inicial do suco de laranja)

SOLUÇÃO

$$M_F = 10000 \text{ kg/h}$$

$$P_V = 0,1994 \text{ bar}$$

$$T_V = 60^{\circ}\text{C} \text{ (temperatura do vapor saturado)}$$

$$m = \frac{M_f \times W_p}{[M(1-W_p)]} = \frac{1000 \times W_p}{[342(1-W_p)]} = \frac{1000 \times 0,6}{[342(1-0,6)]} = 4,39$$

Elevação do ponto de ebulição: $PE \rightarrow PE = 0,71 \times m = 0,71 \times 4,39 = 2,24^{\circ}\text{C}$

a temperatura do suco (T_p) será:

$$T_p = T_V + PE \rightarrow 60 + 2,24 \rightarrow T_p = 62,24^{\circ}\text{C}$$

Cálculo do Balanço de Massa

$$W_s \times M_f = W_p \times M_p$$

$$0,15 \times M_f = 0,60 \times M_p \rightarrow M_p = \frac{0,15 \times M_f}{0,60}$$

$$M_p = \frac{0,15 \times 10000}{0,60} \rightarrow M_p = 2500 \text{ kg/h}$$

M_p = quantidade obtida de suco na concentração de 60% de sólidos.

Água Evaporada no Processo

$$M_f = M_p + M_v \rightarrow M_v = M_f - M_p$$

$$M_v = 10000 - 2500 \rightarrow M_v = 7500 \text{ kg/h de água evaporada}$$

Balço Energético do Evaporador

$$M_s (H_s - H_c) = M_p H_p + M_v H_v - M_f H_f$$

H_v = entalpia da água evaporada

H_s = entalpia do vapor de aquecimento

H_c = entalpia do condensado liberado

H_p = entalpia do suco de laranja inicial

H_w = entalpia do suco de laranja concentrado

$$H_p = H_w(62,2^\circ\text{C}) (1 - 0,7 W_p) = 260,7 (1 - 0,7 \times 0,6) \rightarrow H_p = 151,2 \text{ kg/kJ}$$

$$H_f = H_w(30^\circ\text{C}) (1 - 0,7 W_p) = 125,76 (1 - 0,7 \times 0,15) \rightarrow H_f = 112,6 \text{ kg/kJ}$$

$$H_v = 2606,6 \text{ kg/kJ}$$

$$\beta_s = (H_s - H_c) = 2202,6 \text{ kg/kJ}$$

$$M_s = \frac{(M_p H_p + M_v H_v - M_f H_f)}{(H_s - H_c) H_w}$$

$$M_s = \frac{(2500 \times 151,2 + 7500 \times 2609,6 - 10000 \times 112,6)}{2206,6} \rightarrow M_s = 8546 \text{ kg/h}$$

M_s = consumo de vapor

Área da Superfície de Transferência Térmica

$$Q = U \times A (T_s - T_p) \rightarrow A = \frac{M_s \beta_s}{U (T_s - T_p)}$$

M_s valor em kg/segundo

$$M_s = \frac{8546 \text{ kg/h}}{3600} = M_s = 2,374 \text{ kg/seg.}$$

β_s valor em j/segundo

$$\beta_s = (2206,6 \text{ kJ/h} \times 1000) \rightarrow \beta_s = 2202600 \text{ j/seg}$$

$$A = \frac{M_s \beta_s}{U (T_s - T_p)} = \frac{2,374 \times 2202600}{1000 (120 - 62,24)} \rightarrow A = 90,5 \text{ m}^2 \text{ de área}$$

Eficiência do Processo de Evaporação

A eficiência do processo de evaporação, é calculada pela quantidade evaporada pelo consumo de vapor utilizado.

$$E_v = \frac{M_v}{M_s} = \frac{7500}{8546} = 0,877 \text{ kg de água evaporada / kg de vapor consumido}$$

Isto significa que está havendo uma grande quantidade de vapor utilizado no processo ou seja, para cada 1 kg de vapor utilizado, esta se evaporando somente 0,877 kg de água do suco de laranja. Isto ocorre normalmente em evaporadores de um único efeito.

EVAPORADOR COM VÁRIOS EFEITOS

Os evaporadores de múltiplo efeito conjugam em série dois ou mais evaporadores de um efeito. A grande vantagem desta conjugação é a economia de vapor gasto por kg de água evaporada no processo. As ligações nos evaporadores de múltiplo efeito são feitas de modo que o vapor produzido em um efeito do evaporador serve como meio de aquecimento para o seguinte efeito e, assim sucessivamente até o último efeito (figura-11). Cada efeito do evaporador age como um evaporador de um único efeito. O calor liberado pelo vapor de aquecimento usado (TP₁) e a pressão (PV₁), é usado para o aquecimento do produto no segundo efeito (MV₁), onde se tem uma temperatura (TP₂) e pressão (PV₂), e uma quantidade de produto (MV₂) e assim sucessivamente até o último efeito do sistema.

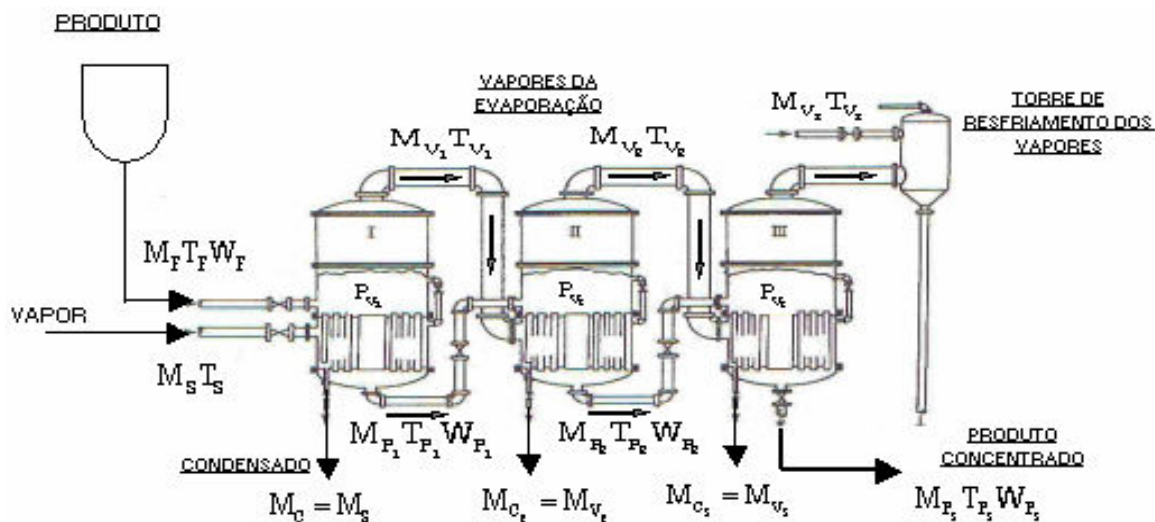


Figura-11: Evaporador de Triplo Efeito

Na prática por questões comerciais e para não elevar muito os custos do investimento, os números de efeitos são todos semelhantes e, a área de transferência de calor é igual. Se o coeficiente de transferência de calor é o mesmo para cada efeito, a quantidade de vapor utilizado será sempre a mesma, desde que a temperatura seja a mesma para cada efeito também. Portanto teremos:

$$MV_1 = MV_2 = MV_3 = \dots MV_n$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \dots \Delta T_n$$

como :

$$\Delta T_1 = (T_S - TP_1)$$

$$\Delta T_2 = (TV_1 - TP_2)$$

$$\Delta T_3 = (TV_3 - TP_3)$$

$$\Delta T_n = (TV_{n-1} - TP_n)$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \dots \Delta T_n = \frac{T_S - T_{Wn} - \sum_{i=1}^N PE_i}{N}$$

EXEMPLO-2

Supondo o exemplo-1 agora, utilizando um evaporador com três efeito. Deve-se concentrar um produto a 10.000 kg/h que esta com 15% de concentração inicial, a uma temperatura de 30°C, até uma concentração final de 60% de sólidos solúveis. A temperatura do vapor no primeiro efeito é de 120°C e, a pressão do vapor no último

efeito é $PV=0,1993$ bar. O coeficiente de transferência de calor para cada efeito é $U=1000$ W/m². O peso específico do produto é igual a $M=342$ kg/m.

SOLUÇÃO

Sendo a mesma quantidade de vapor, podemos escrever então:

$$MV_1 = MV_2 = MV_3 = MC_1 = MC_2 = MV$$

o concentrado obtido por hora será:

$$0,15M_f = 0,60MP_3 \rightarrow 0,15 \times 10000 = 0,60MP_3 \rightarrow MP_3 = 2500 \text{ kg/h}$$

Logo

$$MV_1 = MV_2 = MV_3 = MC_1 = MC_2 = 2500 \text{ kg/h}$$

No 1º Efeito

$$MP_1 = M_f - MV_1 = 10000 - 2500 \rightarrow MP_1 = 7500 \text{ kg/h}$$

$$WP_1 = W_f \left[\frac{M_f}{MP_1} \right] = 0,15 \left[\frac{10000}{7500} \right] \rightarrow WP_1 = 0,20$$

No 2º Efeito

$$MP_2 = MP_1 - MV_2 = 7500 - 2500 \rightarrow MP_2 = 5000 \text{ kg/h}$$

$$WP_2 = WP_1 \left[\frac{MP_1}{MP_3} \right] = 0,20 \left[\frac{7500}{2500} \right] \rightarrow WP_2 = 0,30$$

$$PV_3 = 0,1994 \times TV_3 \rightarrow PV_3 = 60^\circ \text{ C}$$

A elevação do PE em cada estágio do evaporador será:

Para o 1º Efeito (PE₁)

$$M_1 = \frac{U - WP_1}{[M(1 - WP_1)]} = \frac{1000 \times 0,20}{[342(1 - 0,20)]} \rightarrow MP_1 = 0,73$$

$$PE_1 = 0,51 \times M_1 = 0,51 \times 0,73 \rightarrow PE_1 = 0,37^\circ \text{ C}$$

Para o 2º Efeito (PE₂)

$$M_2 = \frac{U - WP_2}{[M(1 - WP_2)]} = \frac{1000 \times 0,30}{[342(1 - 0,30)]} \rightarrow M_2 = 1,25$$

$$PE_2 = 0,51 \times M_2 = 0,51 \times 1,25 \rightarrow PE_2 = 0,64^\circ \text{C}$$

Para o 3º Efeito (PE₃)

$$M_3 = \frac{U - WP_3}{[M(1 - WP_3)]} = \frac{1000 \times 0,60}{[342(1 - 1,40)]} \rightarrow M_3 = 4,39$$

$$PE_3 = 0,51 \times M_3 = 0,51 \times 4,39 \rightarrow PE_3 = 2,24^\circ \text{C}$$

Portanto:

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3 = \frac{T_s - T_{v_s} - \sum_{i=1}^s PE_i}{3} = \frac{120 - 60 - (2,24 + 0,64 + 0,37)}{3} = 18,9^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_s - \Delta TP_1 \rightarrow TP_1 = T_s - \Delta T_1 = 120 - 18,9 = 101,1^\circ \text{C}$$

Desta forma teremos:

$$TV_1 = TP_1 - PE_1 = 101,1 - 0,37 = 100,7^\circ \text{C}$$

$$TP_3 = TV_3 - PE_3 = 60 + 2,24 = 62,2^\circ \text{C}$$

$$T_3 = TV_2 + TP_3 \rightarrow TV_2 = TP_3 + T_3 = 62,2 + 18,9 = 81,1^\circ \text{C}$$

$$TP_2 = TV_2 + PE_2 = 81,1 + 0,64 = 81,7^\circ \text{C}$$

Resumindo os resultados obtidos até aqui:

$M_f = 10000 \text{ kg/h}$	$T_f = 30^\circ\text{C}$	$W_f = 0,15$
$MP_1 = 7500 \text{ kg/h}$	$TP_1 = 101,1^\circ\text{C}$	$WP_1 = 0,20$
$MP_2 = 5000 \text{ kg/h}$	$TP_2 = 81,7^\circ\text{C}$	$WP_2 = 0,30$
$MP_3 = 2500 \text{ kg/h}$	$TP_3 = 62,24^\circ\text{C}$	$WP_3 = 0,60$
$TV_1 = 100,7^\circ\text{C}$	$TV_2 = 81,1^\circ\text{C}$	$TV_3 = 60,0^\circ\text{C}$

CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO DO EVAPORADOR

O balanço energético do evaporador deve sempre ser avaliado no efeito que está recebendo o vapor vivo diretamente da caldeira. Portanto temos:

$$M_f H_f + M_s H_s = MP_1 H_{P_1} + MV_1 H_{V_1} + M_c H_c$$

$$H_{P_1} = H_{WP_1} (1 - 0,7 WP_1) = 423,1 (1 - 0,7 \times 0,2) = 364 \text{ kJ/kg}$$

$$H_f = H_{P_2} (1 - 0,7 W_f) = 125,56 (1 - 0,7 \times 0,15) = 112,6 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{V_1} = 2677,5 \text{ kJ/kg} \rightarrow (H_s - H_c) = 2202,6 \text{ kJ/kg}$$

$$M_s = \frac{MP_1 + MV_1 H_{V_1} = M_f H_f}{H_s - H_c} = \frac{7500 \times 364 + 2500 \times 2677,5 - 10000 \times 112,6}{2202,6}$$

$$M_s = 3767 \text{ kg/h (consumo de vapor)}$$

EFICIÊNCIA DO PROCESSO

Representa quantos kg de água está sendo evaporado no processo para cada kg de vapor consumido. Temos portanto:

$$E_v = \frac{(MV_1 + MV_2 + MV_3)}{M_s} = \frac{7500}{3767} \rightarrow E_v = 1,99 \text{ kg/água}$$

o resultado mostra que para cada kg de vapor, está sendo evaporado 1,99 kg de água do produto.

ÁREA DA SUPERFÍCIE DE TROCA TÉRMICA

Para o 1º Efeito

$$M_S(H_S - H_C)_S = U \times A_1(T_S - TP_1)$$

$$A_1 = \frac{M_S(H_S - H_C)_S}{[U(T_S - TP_1)]} = \frac{(3767 \div 3600) \times (2202,2 \times 1000)}{[1000 \times 18,9]} \rightarrow A_1 = 122,0 \text{ m}^2$$

Para o 2º Efeito

$$MV_1(H_S - H_C)_{V_1} = U \times A_2(TV_1 - TP_2)$$

$$A_2 = \frac{MV_1(H_S - H_C)_{V_1}}{[U(TV_1 - TP_2)]} = \frac{(2500 \div 3600) \times (2255 \times 1000)}{[1000 \times 18,9]} \rightarrow A_2 = 82,9 \text{ m}^2$$

Para o 3º Efeito

$$MV_2(H_S - H_C)_{V_2} = U \times A_3(TV_1 - TP_2)$$

$$A_3 = \frac{MV_2(H_S - H_C)_{V_2}}{[U(TV_1 - TP_3)]} = \frac{(2500 \div 3600) \times (2306 \times 1000)}{[1000 \times 18,9]} \rightarrow A_3 = 84,7 \text{ m}^2$$

Área Total será :

$$A_T = (112,0 + 82,9 + 64,7) = 290 \text{ m}^2$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOTT, P., **Operaciones Unitárias em Ingeniería Química**, McGraw-Hill, New York, 1991.

FOUST, A.S.; WENZE L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; BRYCE ANDERSEN, L. **Princípios de Operações Unitárias**, 2a Ed.. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1982.

EARLE, R.L., EARLE, M. D., **Unit Operations in Food Processing**, Publis., NZIFST, New Zealand, 1983.

MAFART, P. , **Génie Industriel Alimentaire, Les procédés physiques de conservation**, vol-1, Lavoisier, Paris, 1996.

BILLET, R., **Evaporation Technology**, VCH Verlagsgesells Chaft, Weinhaeim, Germany, 1989.

SIOZAWA, Y.Y., & QUAST, D.G., **Processo de Evaporação na Concentração de Alimentos**, ITAL, Campinas, SP, 1975.

COULSON & RICHARDSON'S, **Chemical Enginnering**, Chemical Engineering Design, Butterworth-Heinemann. Oxford, 2003.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., **Perry's Chemical Engineer Handbook**, McGraw-Hill, R.J., 1997.