

Operações Unitárias II

Evaporação

Professor Paul Fernand Milcent

Monitora em Iniciação à Docência Patrícia Carrano Moreira Pereira

MÚLTIPLOS EFEITOS

A economia (E/W) de um simples efeito tende a 1,0. A economia de um múltiplo efeito tende ao número de efeitos empregados no sistema. O objetivo de uma unidade de múltiplos efeitos é o de reduzir o consumo de energia necessária à operação.

Um múltiplo efeito é o acoplamento de efeitos simples. O normalmente convencionado como primeiro efeito é aquele que recebe a energia externa. Num processo convencional (2.015 / Brasil), é aquele que recebe vapor saturado do gerador de vapor. O segundo efeito é aquele que recebe como agente de aquecimento, o evaporado proveniente do primeiro efeito e assim sucessivamente.

A evaporação é uma operação unitária baseada na transferência de calor. O fluxo de calor se dá naturalmente de uma região de maior temperatura para outra a menor temperatura. É necessária uma diferença de temperatura entre o fluido quente que condensa e o fluido frio que evapora. Deste modo o vapor de aquecimento de cada efeito deve condensar a uma temperatura superior à de ebulição neste efeito. Isto se obtém por pressões de operação decrescentes do primeiro ao último efeito.

Após o último efeito, há um condensador e um ejetor, que retiram os incondensáveis do sistema e possibilitam o estabelecimento das pressões decrescentes.

Como visto anteriormente, a economia (E/W) do evaporador simples tende a 1,0. A do múltiplo efeito tende a N onde N é o número de efeitos. A capacidade (E) de um múltiplo efeito tende a ser igual a de um único efeito, operando sob mesmas condições.

PARTIDA DE UM MÚLTIPLO EFEITO

Em anexo.

Análise da Diferença de Temperatura Útil do Sistema

Num simples efeito sem e.p.e.

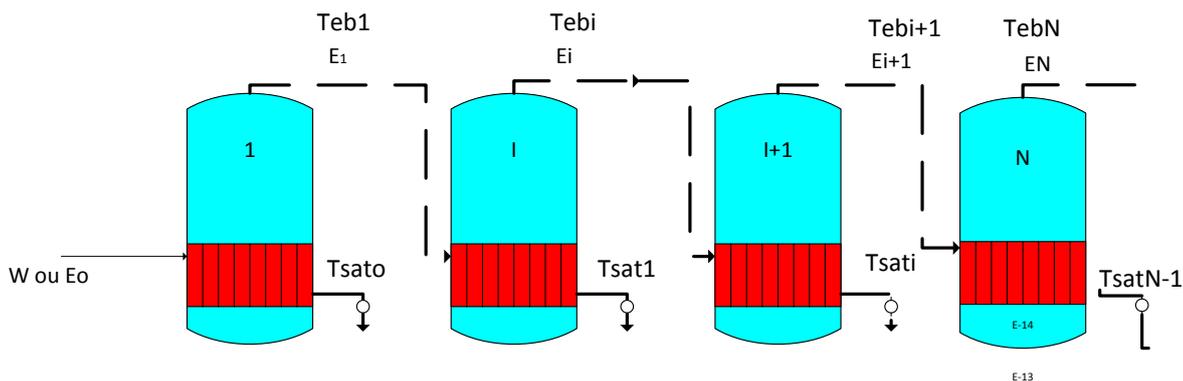
$$\Delta T_{\text{útil}} = T_{\text{cond}} - T_{\text{ebulição}} = T_{\text{cond}} - T_{\text{sat}}$$

Num simples efeito com e.p.e.

$$\Delta T_{\text{útil}} = T_{\text{cond}} - (T_{\text{sat}} + epe) = T_{\text{cond}} - T_{\text{sat}} - epe$$

A e.p.e. reduz a diferença de temperatura útil no simples efeito.

Diferença de temperatura útil num múltiplo efeito (com epe):



$$\Delta T1 = T_{cond} - T_{eb1} = T_{cond} - T_{sa1} - epe1$$

$$\Delta T2 = T_{sa1} - T_{eb2} = T_{sa1} - T_{sa2} - epe2$$

$$\Delta T3 = T_{sa2} - T_{eb3} = T_{sa2} - T_{sa3} - epe3$$

.....

Somando:

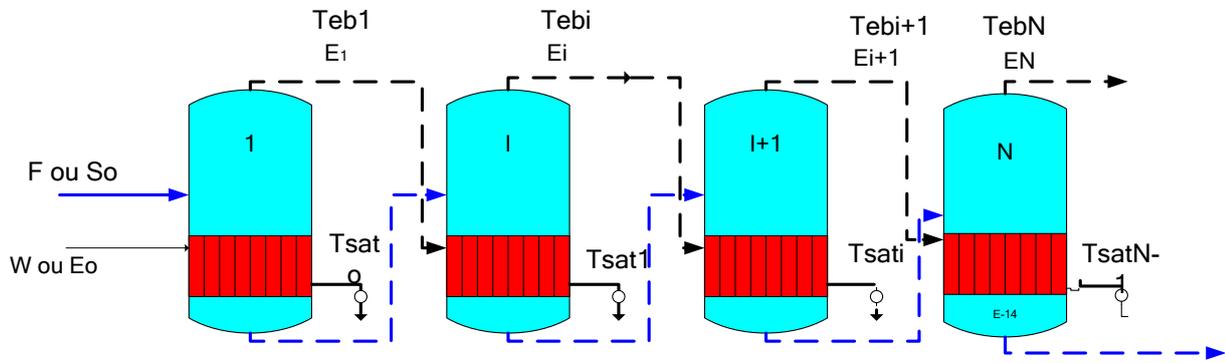
$$\Delta T_{total} = \Delta T_{\acute{u}til} = \sum \Delta T_i = T_{cond} - T_{saN} - \sum epe$$

O epe reduz a diferença de temperatura útil do sistema. Ao aumentar o número de efeitos, para a mesma pressão do vapor de aquecimento (maior temperatura do sistema) e o mesmo vácuo no último efeito (menor temperatura do sistema), como a diferença de temperatura total útil diminui, a capacidade (E) do múltiplo efeito irá diminuir (tende a ser menor que a de um simples efeito operando sob as mesmas condições).

DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS RELACIONADAS A UM MÚLTIPLO EFEITO

Um múltiplo efeito é uma associação de evaporadores simples, interrelacionados termodinamicamente. Se pode empregar diferentes modelos de evaporadores num mesmo sistema de múltiplos efeitos. Um evaporador simples é definido pelas equações de balanço de massa, pela equação de balanço de energia, pela equação de velocidade na qual o fenômeno ocorre e por equações de equilíbrio. Para a solução de tal sistema de equações são necessárias ainda aquelas de previsão de propriedades termodinâmicas. (Este por sinal é o modo como se define qualquer operação ou processo químico ou físico-químico.) Como um múltiplo efeito é um sistema integrado, o sistema de equações deve ser satisfeito simultaneamente e cresce proporcionalmente ao número de efeitos.

Observando o esquema de um sistema de N efeitos com alimentação em cocorrente: (Para diferentes sistemas de alimentação, teremos diferentes expressões para as equações matemáticas).



Sistema em cocorrente.

Balances de Massa:

$$I = 1, N$$

$$S_{I-1} = E_I + S_I$$

Variáveis = S_o, S_i, E_i, N

$$S_{I-1} * x_{I-1} = S_I * x_I$$

Variáveis = x_o, x_i

Além de 2 equações dependentes pois que podem ser obtidas por soma.

$$S_o = \sum_{I=1}^N E_I + S_N$$

$$S_o * x_o = S_N * x_N$$

Balances de energia

$$S_{I-1} * hS_{I-1} + E_{I-1} * hEV_{I-1} = S_I * hS_I + E_{I-1} * hEL_{I-1} + E_I * hEV_I + \text{perdas}_I$$

Variáveis = $hS_o, hS_i, hEVo, hEVi, hLEi, Eo, \text{perdas}_i$

Para a solução, serão necessárias equações, a princípio não lineares, para a determinação das entalpias.

Equações de Velocidade de transferência (supondo evaporadores de recirculação).

$$q_I = U_I * A_I * (Tsati_{I-1} - TS_I)$$

$$q_I = E_{I-1} (hEV_{I-1} - hEL_{I-1})$$

Variáveis = $q_i, U_i, A_i, TS_i, TsatE_i$

Para a solução, serão necessárias equações, a princípio não lineares, para a determinação dos coeficientes globais de transferência de calor. Salvo melhores informações, a estimativa de coeficientes globais para soluções concentradas e viscosas é muito imprecisa. A recomendação é o uso de coeficientes obtidos por experiência anterior.

Equações de equilíbrio

Para qualquer $x, y = 1$

$$TsatiE_I = TsatiS_I$$

$$TS_I = TsatiS_I + epe_I$$

$$TsatiS_I = f(P_I) \quad (\text{não linear})$$

Para a solução, serão necessárias equações, a princípio não lineares, para a determinação das elevações dos pontos de ebulição.

Equilíbrio térmico $TE_i = TS_i$

Variáveis= T_{satSi} , TE_i , e_{pei} , P_i

As observações acima efetuadas demonstram que o sistema de equações a ser resolvido pode ser ainda mais detalhado e ampliado.

É necessário ainda estabelecer / condicionar algo quanto às áreas de troca térmica. Por exemplo, áreas de troca iguais para todos os efeitos.

Por exemplo: $A_I = A_N$

Quando se define as variáveis incógnitas de operação ou para projeto, isto é feito tendo em vista uma condição objetiva. Isto é, algumas variáveis são conhecidas, estão definidas; são fixadas. Por exemplo: componentes, N, sistema de alimentação, S_0 , x_0 , x_N , P_0 , P_N , ...

É possível solucionar o sistema não linear de M equações e M incógnitas, diretamente por meios computacionais.

É possível também realizar a solução por um método iterativo

PROCEDIMENTO ITERATIVO DE HAUSBRAND MODIFICADO.

Entrada: Componentes, número de efeitos, sistema de alimentação.

(I) Balanço material em torno de todo o sistema

Entrada típica: S_0, x_0, x_N

$$S_0 = \sum_{I=1}^N E_I + S_N$$

$$S_0 * x_0 = S_N * x_N$$

$$E_{total} = \sum_{I=1}^N E_I$$

Saída: S_N , E_{total}

Preparação dos balanços de energia:

(II) Supor na primeira iteração que as quantidades evaporadas em cada efeito são iguais.

$$E_I = E_{total} / N$$

(III) Efetuar em sucessão os balanços de massa em torno de cada efeito.

Para alimentação em cocorrente:

$$S_{I-1} = E_I + S_I$$

$$S_{I-1} * x_{I-1} = S_I * x_I$$

Saída: xi

(IV) Conhecendo a maior e a menor temperatura de operação do sistema, estimar as temperaturas nos diversos efeitos do sistema.

Entrada típica: Po, Pn

Saída: TsatSi

(V) Determinar as elevações do ponto de ebulição

$$epe_I = f(x_I, TsatS_I, soluto, solvente)$$

Saída: epei

(VI) Estimar a diferença de temperatura útil

$$\Delta T_{\text{útil}} = TsatE_0 - TsatE_N - \sum epe_I$$

Saída: $\Delta T_{\text{útil}}$

(VII) Estimar as diferenças de temperatura em cada efeito

Supondo que a área de troca térmica em todos os efeitos é igual, se supõe que a quantidade de calor trocada também é igual.

Entrada típica: Supor $A_i = A_n$; $q_i = q_n$; entrada de U_i

$$\Delta T_{\text{útil}} = \sum \Delta T_i = \Delta T_1 + \dots + \Delta T_{I-1} + \Delta T_I + \dots + \Delta T_N$$

$$q_1 = A_1 * U_1 * \Delta T_1 = \dots = q_{I-1} = A_{I-1} * U_{I-1} * \Delta T_{I-1} = q_I = A_I * U_I * \Delta T_I = \dots = q_N = A_N * U_N * \Delta T_N$$

$$U_1 * \Delta T_1 = \dots = U_{I-1} * \Delta T_{I-1} = U_I * \Delta T_I = \dots = U_N * \Delta T_N$$

Saída: ΔT_i

(VIII) Definir as temperaturas em todos os pontos do sistema.

(IX) Determinar as entalpias nos diversos pontos do sistema

(X) Montar e resolver o sistema de equações constituído pelos balanços materiais totais em torno de cada efeito e dos balanços de energia em torno de cada efeito e do balanço material total em torno do sistema.

$$S_{I-1} = E_I + S_I$$

$$S_{I-1} * hS_{I-1} + E_{I-1} * hEV_{I-1} = S_I * hS_I + E_{I-1} * hEL_{I-1} + E_I * hEV_I + perdas_I$$

$$E_{\text{total}} = \sum_{I=1}^N E_I$$

Saída: I=0,N ; Ei

(XI) Determinar as áreas de troca térmica

$$A_i = \frac{q_i}{U_i * \Delta T_i} = \frac{E_{i-1}(hEV_{i-1} - hEL_{i-1})}{U_i * \Delta T_i}$$

(XII) Condicional: propomos no passo (VII) que as áreas de troca são iguais em todos os efeitos. Dentro de uma margem adequada de tolerância, isto se cumpre? SIM: O problema foi solucionado; as variáveis foram definidas.

NÃO: Como o valor das entalpias varia pouco com a pressão e a temperatura de saturação, numa faixa estreita típica de trabalho, o maior erro do processo está na estimativa das temperaturas.

No passo (XI) trabalhamos com as equações:

$$q_i = A_i * U_i * \Delta T_i$$

Encontramos os fluxos de calor em cada efeito com precisão razoável. No entanto as áreas de troca térmica foram diferentes porque as diferenças de temperatura estão imprecisas. O que esperamos é uma mesma área para todos os efeitos, a partir de diferenças de temperatura corrigidas.

$$q_i = A_{IGUAL} * U_i * \Delta T_i^{CORRIGIDA}$$

ou

$$q_i / U_i = A_{IGUAL} * \Delta T_i^{CORRIGIDA}$$

Somando as equações para todos os efeitos

$$\sum_{i=1}^N (q_i / U_i) = A_{IGUAL} * \sum_{i=1}^N \Delta T_i^{CORRIGIDA}$$

Porém

$$\Delta T_{útil} = \sum \Delta T_i$$

A estimativa de qual será a área de troca térmica de todos os efeitos é:

$$A_{IGUAL} = \left[\sum_{i=1}^N (q_i / U_i) \right] / \Delta T_{útil}$$

E as diferenças de temperatura corrigidas são dadas por:

$$\Delta T_i^{CORRIGIDA} = [q_i / U_i] / A_{IGUAL}$$

(XIII) Retornar ao passo (II), efetuando as adaptações adequadas.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

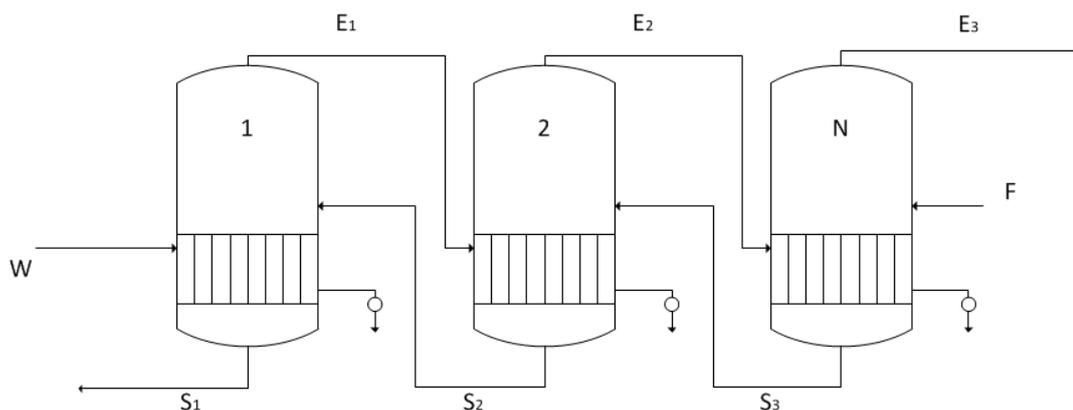
20000kg/h de uma solução de açúcar são concentrados de 10% até 60% em peso (°Brix) em um evaporador de triplo efeito com alimentação em contracorrente. A alimentação entra no terceiro efeito a 26°C e o vapor de aquecimento se encontra a 3ata. No ultimo efeito se mantém um vácuo de 668mmHg referido a uma pressão ambiente de 760mmHg. Os coeficientes integrais de transmissão de calor em kcal/hm²°C valem 1400; 1400 e 1300. Determine:

- A temperatura de ebulição em cada efeito
- O consumo de vapor de aquecimento

c) As superfícies de aquecimento em cada efeito, supondo que são iguais nos três efeitos
 A elevação do ponto de ebulição e o calor específico são funções das concentrações e são fornecidas na tabela abaixo:

Concentração (% em peso)	10	20	30	40	50	60	70
epe (°C)	0,2	0,7	1	2	3	4,5	6
Cp (kcal/kg°C)	0,95	0,88	0,84	0,78	0,72	0,67	0,62

Solução:



$$F = 20000 \frac{kg}{h} \quad x_F = 0,10 \quad x_S = 0,60$$

Balço de massa para todo o sistema, para o soluto:

$$F \cdot x_F = S_1 \cdot x_{S1}$$

$$20000 \cdot 0,10 = S_1 \cdot 0,60$$

$$S_1 = 3333,33 \frac{kg}{h}$$

Balço de massa para todo o sistema, para todo o material:

$$F = E_1 + E_2 + E_3 + S_1$$

$$20000 = E_1 + E_2 + E_3 + 3333,33$$

$$E_1 + E_2 + E_3 = 16666,67 \frac{kg}{h}$$

Estimativa do evaporado em cada efeito (supondo que a evaporação é idêntica em todos os efeitos):

$$\frac{E_{Total}}{N} = \frac{16666,67}{3}$$

$$E_i = 5555,5 \frac{kg}{h}$$

Balço de massa em cada efeito, com a estimativa efetuada anteriormente da quantidade evaporada

$$\begin{aligned} F &= E_3 + S_3 & 20000 &= 5555,5 + S_3 & S_3 &= 14444,4 \frac{kg}{h} \\ F \cdot x_F &= S_3 \cdot x_{S_3} & 20000 \cdot 0,10 &= 14444,4 \cdot x_{S_3} & x_{S_3} &= 0,138 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_3 &= E_2 + S_2 & 14444,4 &= 5555,5 + S_2 & S_2 &= 8888,8 \frac{kg}{h} \\ S_3 \cdot x_{S_3} &= S_2 \cdot x_{S_2} & 14444,4 \cdot 0,138 &= 8888,8 \cdot x_{S_2} & x_{S_2} &= 0,224 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 &= E_1 + S_1 & 8888,8 &= 5555,5 + S_1 & S_1 &= 3333,3 \frac{kg}{h} \\ S_2 \cdot x_{S_2} &= S_1 \cdot x_{S_1} & 8888,8 \cdot 0,224 &= 3333,3 \cdot x_{S_1} & x_{S_1} &= 0,60 \end{aligned}$$

Ponto conveniente de conferência: $x_{S_1} = 0,60$

Determinação das temperaturas extremas do sistema:

$$P_W = 3 \text{ ata} \quad \text{Tabela} \quad T_{cond} = 132,9^\circ C$$

Pressão no último efeito

$$P_3 = 760 - 668 = 92 \text{ mmHg} = \frac{0,125 \text{ kgf}}{\text{cm}^2}$$

Da tabela de vapor:

$$T_{E_3}^{sat} = 49,9^\circ C$$

Estimativa das e.p.e's

No primeiro efeito, pela tabela:

$$x_{S_1} = 60\% \quad e.p.e_1 = 4,5^\circ C$$

No segundo efeito, por interpolação dos dados da tabela:

$$x_{S_2} = 22,4\% \quad e.p.e_2 = 0,8^\circ C$$

No terceiro efeito, por interpolação dos dados da tabela:

$$x_{S_3} = 13,8\% \quad e.p.e_3 = 0,4^\circ C$$

Diferença de temperatura útil

$$\Delta T_{\text{útil}} = T_{cond} - T_N^{sat} - \sum e.p.e$$

$$\Delta T_{\text{útil}} = 132,9 - 49,9 - (0,4 + 0,8 + 4,5)$$

$$\Delta T_{\text{útil}} = 77,3^\circ C \quad (\text{Total})$$

Diferença de temperatura em cada estágio

$$\Delta T_{\text{útil}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

$$U_1 \Delta T_1 = U_2 \Delta T_2 = U_3 \Delta T_3$$

Assim,

$$\Delta T_2 = \frac{U_1}{U_2} \Delta T_1 \quad \text{e} \quad \Delta T_3 = \frac{U_1}{U_3} \Delta T_1$$

Então, substituindo as equações e utilizando os valores de U fornecidos no enunciado:

$$\Delta T_{\text{útil}} = \Delta T_1 + \frac{U_1}{U_2} \Delta T_1 + \frac{U_1}{U_3} \Delta T_1$$

$$77,3 = \Delta T_1 + \frac{1400}{1400} \Delta T_1 + \frac{1400}{1300} \Delta T_1$$

$$\Delta T_1 = 25,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = \frac{1400}{1400} \Delta T_1$$

$$\Delta T_2 = 25,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = \frac{1400}{1300} \Delta T_1$$

$$\Delta T_3 = 27,1^\circ\text{C}$$

Distribuição de temperaturas - Estimativa das temperaturas em todos os pontos do sistema:

	Aquecimento	ΔT	Ebulição	epe
1	132,9 (T_W)	25,1	107,8 ($T_{S1} = T_{E1}$)	4,5
2	103,3 (T_{E1}^{sat})	25,1	78,2 ($T_{S2} = T_{E2}$)	0,8
3	77,4 (T_{E2}^{sat})	27,1	50,3 ($T_{S3} = T_{E3}$)	0,4
<hr/>				
	Condensação	49,9°C (T_{E3}^{sat})		

Ponto conveniente de conferência: Condensação $49,9^\circ\text{C}$ (T_{E3}^{sat})

Coleta de dados termodinâmicos e Balanço entálpico e de massa em torno de cada efeito

1º Efeito:

$$W \cdot h_g + S_2 \cdot h_{S2} = W \cdot h_f + S_1 \cdot h_{S1} + E_1 \cdot h_{E1}$$

$$P_W = 3 \text{ ata}$$

$$h_g = 650,3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$h_f = 133,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para S_1 , com a temperatura T_{S1} já conhecida e o valor de C_p obtido pela tabela:

$$h = C_p T \quad (\text{A temperatura de referência é } 0^\circ\text{C})$$

$$h_{S_1} = 0,67 \cdot 107,8 = 72,23 \frac{kcal}{kg}$$

Para S_2 , com a temperatura T_{S_2} já conhecida e o valor de C_p obtido pela interpolação dos dados da tabela:

$$h = CpT$$

$$h_{S_2} = 0,87 \cdot 78,2 = 68,03 \frac{kcal}{kg}$$

Sendo E_1 um vapor superaquecido a $107,8^\circ C$ e sabendo que existe um e.p.e de $4,5^\circ C$, ou seja, a temperatura de saturação é de $103,3^\circ C$ ($h_g=640,1 kcal/kg$):

$$h_{E_1} = h_g + e.p.e \cdot \overline{Cp}_{vapor}$$

$$h_{E_1} = 640,1 + 4,5 \cdot 0,46$$

$$h_{E_1} = 642,1 \frac{kcal}{kg}$$

Então,

$$W \cdot h_g + S_2 \cdot h_{S_2} = W \cdot h_f + S_1 \cdot h_{S_1} + E_1 \cdot h_{E_1}$$

Substituindo:

$$S_1 = 3333,3 \frac{kg}{h} \quad e \quad S_2 = S_1 + E_1$$

Tem-se:

$$516,9W = 13973,2 + 574,1E_1$$

2º Efeito:

$$E_1 \cdot h_{E_1} + S_3 \cdot h_{S_3} = S_2 \cdot h_{S_2} + E_2 \cdot h_{E_2} + E_1 \cdot h_{f_{E_1}}$$

Para S_3 , com a temperatura T_{S_3} já conhecida e o valor de C_p obtido pela interpolação dos dados da tabela:

$$h = CpT$$

$$h_{S_3} = 0,92 \cdot 50,3 = 46,28 \frac{kcal}{kg}$$

Sendo E_2 um vapor superaquecido a $78,2^\circ C$ e sabendo que existe um e.p.e de $0,8^\circ C$, ou seja, a temperatura de saturação é de $77,4^\circ C$ ($h_g=630,3 kcal/kg$):

$$h_{E_2} = h_g + e.p.e \cdot \overline{Cp}_{vapor}$$

$$h_{E_2} = 630,3 + 0,8 \cdot 0,46$$

$$h_{E_2} = 630,6 \frac{kcal}{kg}$$

Sabendo que a temperatura de saturação de E_1 é de $103,3^\circ C$ ($h_{fE_1}=103,4 kcal/kg$). Então,

$$E_1 \cdot h_{E_1} + S_3 \cdot h_{S_3} = S_2 \cdot h_{S_2} + E_2 \cdot h_{E_2} + E_1 \cdot h_{f_{E_1}}$$

Substituindo:

$$S_3 = F - E_3$$

Tem-se:

$$470,7E_1 + 698742,3 = 46,3E_3 + 630,6E_2$$

3º Efeito:

$$E_2 \cdot h_{E_2} + F \cdot h_F = E_3 \cdot h_{E_3} + S_3 \cdot h_{S_3} + E_2 \cdot h_{f_{E_2}}$$

Para F, com a temperatura T_F já conhecida e o valor de C_p obtido pela tabela:

$$h = C_p T$$

$$h_F = 0,95 \cdot 26 = 24,7 \frac{kcal}{kg}$$

Sendo E_3 um vapor superaquecido a $50,3^\circ C$ e sabendo que existe um e.p.e de $0,4^\circ C$, ou seja, a temperatura de saturação é de $49,9^\circ C$ ($h_g = 619 kcal/kg$):

$$h_{E_3} = h_g + e.p.e \cdot \bar{C}_{p_{vapor}}$$

$$h_{E_3} = 619 + 0,4 \cdot 0,46$$

$$h_{E_3} = 619,1 \frac{kcal}{kg}$$

Sabendo que a temperatura de saturação de E_2 é de $77,4^\circ C$ ($h_{fE1} = 77,3 kcal/kg$). Então,

$$E_2 \cdot h_{E_2} + F \cdot h_F = E_3 \cdot h_{E_3} + S_3 \cdot h_{S_3} + E_2 \cdot h_{f_{E_2}}$$

Substituindo:

$$S_3 = F - E_3$$

Tem-se:

$$553,3E_2 = 572,8E_3 + 431520$$

Resolvendo o sistema de equações:

$$E_1 + E_2 + E_3 = 16666,7 \quad \text{Balanço material global}$$

$$516,9W = 13973,2 + 574,1E_1 \quad \text{Balanço para o primeiro efeito}$$

$$470,7E_1 + 698742,3 = 46,3E_3 + 630,6E_2 \quad \text{Balanço para o segundo efeito}$$

$$553,3E_2 = 572,8E_3 + 431520 \quad \text{Balanço para o terceiro efeito}$$

$$E_1 = 6430 \frac{kg}{k} \quad E_2 = 5612 \frac{kg}{k} \quad E_3 = 4625 \frac{kg}{k} \quad W = 7169 \frac{kg}{k}$$

Fluxo de calor em cada efeito

$$q_1 = W \cdot h_{fg} = 7169(650,3 - 133,4) = 3705656 \frac{kcal}{h}$$

$$q_2 = E_1 (h_{E1} - h_{fE1}) = 6430(642,1 - 103,4) = 3463841 \frac{kcal}{h}$$

$$q_3 = E_2 (h_{E2} - h_{fE2}) = 5612(630,6 - 77,3) = 3105120 \frac{kcal}{h}$$

Área de troca térmica por efeito

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 \Delta T_1} = \frac{3705656}{1400 \times 25,1} = 105,5 m^2$$

$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 \Delta T_2} = 98,6 m^2$$

$$A_3 = \frac{q_3}{U_3 \Delta T_3} = 88,1 m^2$$

Usando os novos valores de E_1 , E_2 e E_3 encontrados, faz-se uma nova iteração supondo que os valores de fluxo de calor continuem os mesmos.

Balço de massa em cada efeito

$$\begin{aligned} F = E_3 + S_3 & & 20000 = 4625 + S_3 & & S_3 = 15375 \frac{kg}{h} \\ F \cdot x_F = S_3 \cdot x_{S_3} & & 20000 \cdot 0,10 = 15375 \cdot x_{S_3} & & x_{S_3} = 0,130 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_3 = E_2 + S_2 & & 15375 = 5612 + S_2 & & S_2 = 9763 \frac{kg}{h} \\ S_3 \cdot x_{S_3} = S_2 \cdot x_{S_2} & & 15375 \cdot 0,130 = 9763 \cdot x_{S_2} & & x_{S_2} = 0,205 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 = E_1 + S_1 & & 9763 = 6430 + S_1 & & S_1 = 3333 \frac{kg}{h} \\ S_2 \cdot x_{S_2} = S_1 \cdot x_{S_1} & & 9763 \cdot 0,205 = 3333 \cdot x_{S_1} & & x_{S_1} = 0,60 \end{aligned}$$

Determinação dos e.p.e's

No primeiro efeito, pela tabela:

$$x_{S_1} = 60\% \quad e.p.e_1 = 4,5^\circ C$$

No segundo efeito, por interpolação dos dados da tabela:

$$x_{S_2} = 20,5\% \quad e.p.e_2 = 0,7^\circ C$$

No terceiro efeito, por interpolação dos dados da tabela:

$$x_{S_3} = 13,0\% \quad e.p.e_3 = 0,4^\circ C$$

Diferença de temperatura útil

$$\Delta T_{\acute{u}til} = T_{cond} - T_N^{sat} - \sum e.p.e$$

$$\Delta T_{\acute{u}til} = 132,9 - 49,9 - (0,4 + 0,7 + 4,5)$$

$$\Delta T_{\acute{u}til} = 77,4^\circ C$$

A área prevista para esta segunda iteração pode ser determinada diretamente já que os fluxos de calor em cada estágio foram considerados os mesmos da iteração anterior

$$A = \frac{\sum(q_i)}{\Delta T_{\text{útil}}}$$

$$A = 97,0 \text{ m}^2$$

Diferença de temperatura em cada estágio

$$\Delta T_i = \frac{q_i}{U_i A}$$

$$\Delta T_1 = 27,3^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 25,5^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 24,6^\circ\text{C}$$

Distribuição de temperaturas

	Aquecimento	ΔT	Ebulição	epe
1	132,9°C (T_W)	27,3°C	105,6°C ($T_{S1} = T_{E1}$)	4,5°C
2	101,1°C (T_{E1}^{sat})	25,5°C	75,6°C ($T_{S2} = T_{E2}$)	0,7°C
3	74,9°C (T_{E2}^{sat})	24,6°C	50,3°C ($T_{S3} = T_{E3}$)	0,4°C
Condensação		49,9°C (T_{E3}^{sat})		

Balanco entálpico em termo de cada efeito

1º Efeito:

$$P_W = 3 \text{ ata} \quad h_g = 650,3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$h_f = 133,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para S_1 , com a temperatura T_{S1} já conhecida e o valor de C_p obtido pela tabela:

$$h = CpT$$

$$h_{S1} = 0,67 \cdot 105,6 = 70,75 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Para S_2 , com a temperatura T_{S2} já conhecida e o valor de C_p obtido pela interpolação dos dados da tabela:

$$h = CpT$$

$$h_{S2} = 0,88 \cdot 75,6 = 66,52 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Sendo E_1 um vapor superaquecido a 105,6°C e sabendo que existe um e.p.e de 4,5°C, ou seja, a temperatura de saturação é de 101,1°C ($h_g=639,3\text{kcal/kg}$):

$$h_{E1} = h_g + e.p.e \cdot \overline{Cp}_{\text{vapor}}$$

$$h_{E1} = 639,3 + 4,5 \cdot 0,46$$

$$h_{E1} = 641,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Então,

$$W \cdot h_g + S_2 \cdot h_{S_2} = W \cdot h_f + S_1 \cdot h_{S_1} + E_1 \cdot h_{E_1}$$

Substituindo:

$$S_1 = 3333,3 \frac{kg}{h} \quad e \quad S_2 = S_1 + E_1$$

Tem-se:

$$516,9W = 14079,8 + 574,9E_1$$

2º Efeito:

Para S₃, com a temperatura T_{S3} já conhecida e o valor de C_p obtido pela interpolação dos dados da tabela:

$$h = CpT$$

$$h_{S_3} = 0,93.50,3 = 46,78 \frac{kcal}{kg}$$

Sendo E₂ um vapor superaquecido a 75,6°C e sabendo que existe um e.p.e de 0,7°C, ou seja, a temperatura de saturação é de 74,9°C (h_g=629,2kcal/kg):

$$h_{E_2} = h_g + e.p.e \cdot \overline{Cp}_{vapor}$$

$$h_{E_2} = 629,2 + 0,7.0,46$$

$$h_{E_2} = 629,5 \frac{kcal}{kg}$$

Sabendo que a temperatura de saturação de E₁ é de 101,1°C (h_{fE1}=101,2kcal/kg). Então,

$$E_1 \cdot h_{E_1} + S_3 \cdot h_{S_3} = S_2 \cdot h_{S_2} + E_2 \cdot h_{E_2} + E_1 \cdot h_{f_{E_1}}$$

Tem-se:

$$473,7E_1 + 713822,2 = 46,8E_3 + 629,5E_2$$

3º Efeito:

Para F, com a temperatura T_F já conhecida e o valor de C_p obtido pela tabela:

$$h = CpT$$

$$h_F = 0,95.26 = 24,7 \frac{kcal}{kg}$$

Sendo E₃ um vapor superaquecido a 50,3°C e sabendo que existe um e.p.e de 0,4°C, ou seja, a temperatura de saturação é de 49,9°C (h_g=619kcal/kg):

$$h_{E_3} = h_g + e.p.e \cdot \overline{Cp}_{vapor}$$

$$h_{E_3} = 619 + 0,4.0,46$$

$$h_{E_3} = 619,1 \frac{kcal}{kg}$$

Sabendo que a temperatura de saturação de E_2 é de $74,9^\circ C$ ($h_{fE_2} = 74,8 kcal/kg$). Então,

$$E_2 \cdot h_{E_2} + F \cdot h_F = E_3 \cdot h_{E_3} + S_3 \cdot h_{S_3} + E_2 \cdot h_{fE_2}$$

Substituindo:

$$S_3 = F - E_3$$

Tem-se:

$$554,7E_2 = 572,3E_3 + 441580$$

Resolvendo o sistema de equações:

$$E_1 + E_2 + E_3 = 16666,7$$

$$516,9W = 14079,8 + 574,9E_1$$

$$473,7E_1 + 713822,2 = 46,8E_3 + 629,5E_2$$

$$554,7E_2 = 572,3E_3 + 441580$$

$$E_1 = 6405 \frac{kg}{k} \quad E_2 = 5599 \frac{kg}{k} \quad E_3 = 4663 \frac{kg}{k} \quad W = 7151 \frac{kg}{k}$$

Fluxo de calor em cada efeito

$$q_1 = W \cdot h_{fg} = 3696352 \frac{kcal}{h}$$

$$q_2 = E_1 (h_{E_1} - h_{fE_1}) = 3459981 \frac{kcal}{h}$$

$$q_3 = E_2 (h_{E_2} - h_{fE_2}) = 3105765 \frac{kcal}{h}$$

Área de troca térmica por efeito

$$A_1 = \frac{q_1}{U_1 \Delta T_1} = 96,7 m^2$$

$$A_2 = \frac{q_2}{U_2 \Delta T_2} = 96,9 m^2$$

$$A_3 = \frac{q_3}{U_3 \Delta T_3} = 97,1 m^2$$

Assim, após esta segunda iteração pode-se observar que as áreas de troca térmica de cada efeito já estão bem próximas. Como o exercício pede que os três efeitos sejam iguais, faz-se uma média das áreas encontradas.

$$\bar{A} = 96,9 m^2$$

Respostas:

$$T_{E_1} = 105,6^\circ C$$

$$T_{E_2} = 75,6^\circ C$$

$$T_{E_3} = 50,3^\circ C$$

$$W = 7151 \frac{kg}{h}$$

$$\bar{A} = 96,9 m$$

PROBLEMAS PROPOSTOS

(1) Em um evaporador de duplo efeito se trata 10.000 kg/h de uma solução que não tem elevação apreciável do ponto de ebulição, para concentrá-lo de 10% até 20%. A solução diluída entra no primeiro efeito a 20°C e neste efeito condensa o vapor vivo a 105 °C. O vapor procedente do segundo efeito tem uma temperatura de condensação de 50 °C. $U_1=1.800 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. $U_2= 1.500 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. Considere $c_p = 1,0 \text{ kcal/kg. °C}$ para todas as soluções. Determinar T, A, e P em cada efeito. Suponha as áreas de troca térmica iguais. Determine o consumo horário de vapor vivo. R: $A \approx 35 \text{ m}^2$; $W \approx 3.470 \text{ kg/h}$.

(2) Resolva o problema (1) para alimentação em contracorrente e $U_1=1.700 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. $U_2= 1.600 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. R: $A \approx 36,5 \text{ m}^2$

(3) Em um triplo efeito em cocorrente se concentra 20.000 kg/h de solução, de 10% até 45%. $T_F = 20^\circ\text{C}$. Para aquecimento se dispõe de vapor vivo a 2 ata e no último efeito se mantém um vácuo de 600 mmHg referido a 740 mmHg de pressão ambiente. $U_1=1.500 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. $U_2= 1.200 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. $U_3= 1.000 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$. Supondo $e_{pes}=0,0$, $c_{ps} = 1,0 \text{ kcal/kg. °C}$, $perdas = 0,0$ e condensados removidos nas temperaturas de condensação. Determinar: a) Consumo de vapor ($\approx 8.500 \text{ kg/h}$) b) Área de troca térmica ($\approx 140 \text{ m}^2$) c) Consumo de água a 16°C no condensador de contato direto ($\approx 59.150 \text{ kg/h}$)



História do Mullá Nasrudin:

Nasrudin esparramava migalhas de pão em volta de sua casa. Alguém perguntou: - O que você está fazendo?

Nasrudin respondeu: - Afugentando os tigres!

E o outro argumentou: - Mas por aqui não há tigres!

E Nasrudin, alegre, mais uma vez respondeu: - Viu só como funciona !?