IQ46B - Operaciones de Transferencia I Agosto 20, 2008
Profesor: Tomás Vargas
Auxiliar: Melanie Colet

Clase Auxiliar 3.
Evaporadores

PROBLEMA N° 1

Un evaporador simple se utiliza para concentrar 30.000 $^{lb}/_{h}$ de una solución de NaOH a 120 °F desde 15% (p/p) hasta 40%. Para ello el evaporador es calentado con vapor vivo a 41,7 $^{lbf}/_{in^2}$ de presión absoluta; la presión absoluta en la cámara de evaporación es de 1,8 $^{lbf}/_{in^2}$. El coeficiente global de transferencia de calor se ha estimado en 300 $^{Btu}/_{ft2\text{-}h\text{-}°F}$. Calcule el flujo de vapor vivo que debe ser alimentado para cumplir los requerimientos del proceso, la economía de éste y el área de transferencia del equipo.

SOLUCIÓN:

- Condiciones de alimentación: 30.000 $^{lb}/_{h}$ en base húmeda (15% p/p)

Balances de Masa:

Se tiene que:

- SÓLIDOS:

Entrada $0{,}15 \cdot 30.000 = 4.500 \, lb/h$

Salida $0{,}40 \cdot m = 4.500 \, lb/h \quad \rightarrow \quad m = 11.250 \, lb/h$

Siendo *m* la masa de solución de salida.

- AGUA:

Entrada $30.000 - 4.500 = 25.500 \, lb/h$

Salida $11.250 - 4.500 = 6.750 \, lb/h$

- VAPOR DE SALIDA: $30.000 - 11250 = 18.750 \, lb/h$

En resumen tendremos que:

	Entrada	Salida	Evaporado
Sólido	4.500	4.500	0
Agua	25.500	6.750	18.750
Total	**30.000**	**11.250**	**18.750**

Balance de Calor:

Expresamos el balance de calor según la expresión:

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

- Para la solución concentrada: p_a = 1,8 psi $\longrightarrow$ t_{eb} agua pura = 122 °F (tablas de vapor)
- Utilizando gráfico N° 1 (líneas de Dühring) se tiene t_{eb} solución(40%) = 162 °F
- Las entalpías de la alimentación y de la solución concentrada se obtiene de gráfico N° 2:

Alimentación:	15% p/p, 120 °F,	H_f = 75 $^{BTU}/_{lb}$
Solución concentrada:	40% p/p, 162 °F,	H = 145 $^{BTU}/_{lb}$

Para el vapor que sale consideramos que está saturado a la temperatura de ebullición del agua pura en la cámara (122 °F):

$$H_v = 1.114{,}5\ ^{BTU}/_{lb}$$

El calor de vaporización del agua saturada a 41,7 psi es: λ_s = 932 $^{BTU}/_{lb}$

Reemplazando se obtiene que:

$$\boxed{m_s = 21.758\ ^{lb}/_{h}}$$

De este modo el calor transferido es igual a:

$$\boxed{q = m_s \cdot \lambda_s = 21.758 \cdot 932 = 20.278 \times 10^3\ \frac{BTU}{h}}$$

, y la economía del proceso es igual a:

$$\boxed{E = \frac{m_f - m}{m_s} = \frac{18.750}{21.758} = 0{,}86}$$

Y el área de transferencia es igual a:

$$\boxed{A = \frac{Q}{U \times (T_s - T)} = \frac{20.278 \times 10^3}{300 \cdot (270 - 162)} = 625{,}9\ \ ft^2}$$

PROBLEMA N° 2

En una empresa de alimentos se desea concentrar una solución de clorhidrato de cocaína. Dada la escasez de recursos no se dispone de una caldera para alimentar vapor y se utilizará un evaporador calefaccionado por un calefactor eléctrico de 45 kW. El flujo de solución de 1 $^{kg}/_{min}$ y concentración 1% en peso entra al evaporador a 20 °C y el evaporador opera a 1 atm de presión. En estas condiciones calcule cuál es la concentración de salida de la solución, la cantidad de agua evaporada y la temperatura de la solución.

DATOS:

Calor latente de vaporización del agua = 2.500 $^{J}/_{g}$
Capacidad calorífica de la solución = 4,5 $^{J}/_{g\text{-}°C}$
$\Delta T_{eb} = 0{,}094 \cdot c^{1,325}$, donde c es la concentración como % en peso

SOLUCIÓN:

Para resolver el problema nos apoyamos en los balances de masa y calor para el evaporador como en el problema anterior.

Balances de masa

	Entrada $^{kg}/_{h}$	**Salida $^{kg}/_{h}$**	**Evaporado $^{kg}/_{h}$**
Sólidos	0,6	0,6	---
Agua	59,4	59,4 – X	X
Total	**60**	**60 – X**	**X**

En consecuencia la concentración como % en peso a la salida del evaporador será:

$$C = \frac{Masa\ Sólido}{Masa\ Total} \cdot 100 = \frac{0{,}6 \cdot 100}{60 - X} = \frac{60}{60 - X}$$

Balances de calor

El calor que ingresa al evaporador por el calefactor, será utilizado como calor sensible de calentamiento de la solución y calor latente de evaporación de agua.

$$Q = \dot{m} \cdot C_P \cdot \Delta T + w \cdot \lambda$$

, la diferencia de temperatura corresponde a la diferencia entre la temperatura de entrada de la solución y la temperatura a la cual se evapora incluyendo la elevación del punto de ebullición asociada a la concentración de sólidos que se establece al interior del evaporador.

Entonces,

$\Delta T = T_{out} - T_{in}$ = (T° de ebullición normal + ΔT_{eb}) - T_{in}

$\Delta T = (100 + 0{,}094 \cdot C^{1{,}325}) - 20$

, en consecuencia:

$$Calor\ Sensible = \left(\left[\frac{1\,kg}{\min}\right]\cdot\left[\frac{1\min}{60\,s}\right]\right)\cdot\left(\left[\frac{4{,}5\ J}{g\ {}^{o}C}\right]\cdot\left[\frac{1.000\ g}{1\,kg}\right]\right)\left[\left(100+0{,}094\left(\frac{60}{60-X}\right)^{1{,}325}\right)-20\right]$$

$$Calor\ Latente = \left(\frac{X\ kg}{h}\cdot\frac{1\,h}{3.600\,s}\cdot\frac{1.000\ g}{1\,kg}\right)\left(\frac{2.500\ J}{g}\right)$$

Luego, el balance para el calor ingresado será:

$$\frac{45.000\ J}{s} = \frac{75\ J}{s-{}^{o}C}\cdot\left[80+0{,}094\cdot\left(\frac{60}{60-X}\right)^{1{,}325}\right]+\frac{694{,}44\cdot X\ \ J}{s}$$

, resolviendo se tiene:

$$X = 55{,}815\ {}^{kg\ agua}\!\!/_{h}$$

Así, al reemplazar se obtiene:

$$C = 14{,}34\%$$

Y además, ΔT_{eb} = 3,2 °C por lo que la T° de salida de la solución es

$$T_s = 103{,}2\ {}^{\circ}C$$

PROBLEMA N° 3

Un evaporador de triple efecto con alimentación hacia delante se utiliza para evaporar una solución de azúcar, conteniendo 10% en peso de sólidos, a solución concentrada de 30%. El aumento del punto de ebullición de la solución (independiente de la presión) puede estimarse como:

$$APE\ (°C) = 1{,}78x + 6{,}22\,x^2$$

, donde x es la fracción en peso de la solución.

Se utiliza para calentamiento vapor a 205,5 kPa (con 121,1 °C de temperatura de saturación). La presión en el espacio de vapor del tercer efecto es 13,7 kPa.

El flujo de alimentación es 22.680 $^{kg}/_{h}$ a 26,7 °C.

El calor específico de la solución líquida es:

$$C_p=4{,}19 - 2{,}35\cdot x \ ^{kJ}/_{kg\text{-}°K}$$

El calor de solución se considera despreciable.

Los coeficientes de transferencia de calor se han estimado como (en cada efecto):

$$U_1= 3123 \ ^{W}/_{m2\text{-}K},\ U_2= 1987 \ ^{W}/_{m2\text{-}K},\ U_3= 1136 \ ^{W}/_{m2\text{-}K}$$

Si cada efecto tiene la misma superficie de intercambio, calcular esta área y el flujo de vapor usado.

SOLUCIÓN:

De los datos tenemos que:

$$x_f = 0{,}1$$
$$x_3 = 0{,}3$$
$$APE(^{\circ}C) = 1{,}78 \bullet x + 6{,}22 \bullet x^2$$
$$P_{S_1} = 205{,}5 \ \ kPa$$
$$T_{S_1} = 121{,}1^{\circ}C$$
$$P_3 = 13{,}7 \ \ kPa$$
$$\dot{m}_f = 22.680 \ \left[{}^{kg}\!/_{hr}\right]$$
$$T_f = 26{,}7^{\circ}C$$
$$c_p = 4{,}19 - 2{,}35 \bullet x \ \left[{}^{KJ}\!/_{kg-^{\circ}K}\right]$$
$$U_1 = 3.123 \ \left[{}^{W}\!/_{m^2-^{\circ}K}\right]$$
$$U_2 = 1.987 \ \left[{}^{W}\!/_{m^2-^{\circ}K}\right]$$
$$U_3 = 1.136 \ \left[{}^{W}\!/_{m^2-^{\circ}K}\right]$$

Usaremos un método iterativo.

<u>Paso 1.</u>

Para $P_3 = 13{,}7[kPa]$ se tiene de las tablas de vapor que: $T_{sat}^3 = 51{,}67^{o}C$

Luego,

$$APE_3 = 1{,}78 \times 0{,}3 + 6{,}22 \times (0{,}3)^2 = 1{,}09^{o}C$$

Como, $APE_3 = T_3 - T_{sat}^3 \Rightarrow T_3 = T_{sat}^3 + APE_3 = 51{,}67^{o}C + 1{,}09^{o}C = 52{,}76^{o}C$

<u>Paso 2.</u>

Realizaremos los balances de masa correspondientes.

Global:

$$F \bullet x_f = 22.680\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right] \times 0{,}1 = 0{,}3 \times L_3 + (V_1 + V_2 + V_3) \times 0$$

$$L_3 = 7.560\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = 15.120\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$$

$F = (V_1 + V_2 + V_3) + L_3 = 22.680\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$

Soluto:

1ª aproximación: $V_1 = V_2 = V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 = V_3 = 5.040\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$

- Cálculo de L_1, L_2 y L_3.

- Etapa 1: $F = L_1 + V_1 \Rightarrow L_1 = 22.680\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right] - 5.040\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$

  $L_1 = 17.640\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right]$

- Etapa 2: $L_1 = L_2 + V_2 \Rightarrow L_2 = 17.640\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right] - 5.040\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right]$

  $L_2 = 12.600\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right]$

- Etapa 3: $L_2 = L_3 + V_3 \Rightarrow L_3 = 12.600\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right] - 5.040\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right]$

  $L_3 = 7.560\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right]$

- Cálculo de x_1, x_2 y x_3.

- Etapa 1: $x_f \bullet F = x_1 \bullet L_1 \Rightarrow x_1 = \dfrac{0{,}1 \times 22.680}{17.640}$

  $x_1 = 0{,}13$

- Etapa 2: $x_1 \bullet L_1 = x_2 \bullet L_2 \Rightarrow x_2 = \dfrac{0{,}13 \times 17.640}{12.600}$

  $x_2 = 0{,}18$

- Etapa 3: $x_2 \bullet L_2 = x_3 \bullet L_3 \Rightarrow x_3 = \dfrac{0{,}18 \times 12.600}{7.560}$

  $x_2 = 0{,}3$

<u>Paso 3.</u>

Cálculo APE de cada etapa.

(1) $$\begin{aligned} APE_1 &= 1{,}78 \bullet x_1 + 6{,}22 \bullet x_1^2 = 1{,}78 \times 0{,}13 + 6{,}22 \times 0{,}13^2 \\ APE_1 &= 0{,}34^{\circ}C \end{aligned}$$

(2) $$\begin{aligned} APE_2 &= 1{,}78 \bullet x_2 + 6{,}22 \bullet x_2^2 = 1{,}78 \times 0{,}18 + 6{,}22 \times 0{,}18^2 \\ APE_2 &= 0{,}52^{\circ}C \end{aligned}$$

(3) $$\begin{aligned} APE_3 &= 1{,}78 \bullet x_3 + 6{,}22 \bullet x_3^2 = 1{,}78 \times 0{,}3 + 6{,}22 \times 0{,}3^2 \\ APE_3 &= 1{,}09^{\circ}C \end{aligned}$$

Cálculo de $\sum \Delta T$ disponible.

Tenemos que: $\sum \Delta T = T_{S_1} - T_{sat}^{3} - (APE_1 + APE_2 + APE_3)$

$$\sum \Delta T = 121{,}1 - 51{,}67 - (0{,}34 + 0{,}52 + 1{,}09)$$
$$\sum \Delta T = 67{,}48^{o}C$$

Cálculo de ΔT por etapa.

(1) $$\Delta T_1 = \sum \Delta T \times \frac{\frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} = 67{,}48^{o}C \times \frac{\frac{1}{3.123}}{\frac{1}{3.123} + \frac{1}{1.987} + \frac{1}{1.136}}$$

$$\Delta T_1 = 12{,}68^{o}C$$

(2) $$\Delta T_2 = \sum \Delta T \times \frac{\frac{1}{U_2}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} = 67{,}48^{o}C \times \frac{\frac{1}{1.987}}{\frac{1}{3.123} + \frac{1}{1.987} + \frac{1}{1.136}}$$

$$\Delta T_2 = 19{,}93^{o}C$$

(3) $$\Delta T_3 = \sum \Delta T \times \frac{\frac{1}{U_3}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} = 67{,}48^{o}C \times \frac{\frac{1}{1.136}}{\frac{1}{3.123} + \frac{1}{1.987} + \frac{1}{1.136}}$$

$$\Delta T_3 = 34{,}87^{o}C$$

Realizamos una pequeña corrección a ΔT_1 puesto que requerimos más calor en la etapa 1 que recibe la alimentación fría. Para mantener $\sum \Delta T$ reducimos ΔT_2 y ΔT_3.

(1) $\Delta T_1 = 12{,}68^{o}C + 3{,}16^{o}C = 15{,}84^{o}C$
(2) $\Delta T_2 = 19{,}93^{o}C - 1{,}16^{o}C = 18{,}77^{o}C$
(3) $\Delta T_3 = 34{,}87^{o}C - 2^{o}C = 32{,}87^{o}C$

Luego,

(Efecto 1) $\Delta T_1 = T_{S_1} - T_1 \Rightarrow T_1 = 121{,}1^{o}C - 15{,}84^{o}C = 105{,}26^{o}C$

(Efecto 2)
$$\Delta T_2 = T_{S_2} - T_2 = (T_1 - APE_1) - T_2$$
$$\Rightarrow T_1 = 105{,}26^{o}C - 0{,}34^{o}C - 18{,}77^{o}C = 86{,}15^{o}C$$
$$\Rightarrow T_{S_2} = 104{,}92^{o}C$$

(Efecto 3) $\Delta T_3 = T_{S_3} - T_3 = (T_2 - APE_2) - T_3$

$$\Rightarrow T_3 = 86{,}15^{o}C - 0{,}52^{o}C - 32{,}87^{o}C = 52{,}76^{o}C$$

$$\Rightarrow T_{S_3} = 85{,}63^{o}C$$

(Condensador) $T_{S_4} = T_3 - APE_3 = 52{,}76^{o}C - 1{,}09 = 51{,}67^{o}C$

Paso 4.

- Cálculo de los c_p de las corrientes de solución.

F: $c_{p_F} = 4{,}19 - 2{,}35 \bullet x_F = 4{,}19 - 2{,}35 \times 0{,}1 = 3{,}955 \left[{KJ}/{kg\text{–}^{o}K} \right]$

L1: $c_{p_{L_1}} = 4{,}19 - 2{,}35 \bullet x_1 = 4{,}19 - 2{,}35 \times 0{,}13 = 3{,}885 \left[{KJ}/{kg\text{–}^{o}K} \right]$

L2: $c_{p_{L_2}} = 4{,}19 - 2{,}35 \bullet x_2 = 4{,}19 - 2{,}35 \times 0{,}18 = 3{,}767 \left[{KJ}/{kg\text{–}^{o}K} \right]$

L3: $c_{p_{L_3}} = 4{,}19 - 2{,}35 \bullet x_3 = 4{,}19 - 2{,}35 \times 0{,}3 = 3{,}485 \left[{KJ}/{kg\text{–}^{o}K} \right]$

- Cálculo de calor y entalpías por etapa.

Efecto 1: $T_1 = 105{,}26^{o}C \quad T_{S_2} = 104{,}92^{o}C \quad APE_1 = 0{,}34^{o}C$

$$H_1 = H^V_{T_{S_2}} + 0{,}34 \times Sobrecalentamiento$$

$$H_1 = 2.683 \left[{KJ}/{kg} \right] + 0{,}34 \times 1{,}884 \left[{KJ}/{kg} \right] = 2.684 \left[{KJ}/{kg} \right]$$

$$\lambda_{S_1} = H^v_{T_{S_1}} - h^l_{T_{S_1}} = 2.708 \left[{KJ}/{kg} \right] - 508 \left[{KJ}/{kg} \right] = 2.200 \left[{KJ}/{kg} \right]$$

Efecto 2: $T_2 = 86{,}15^{o}C \quad T_{S_3} = 85{,}63^{o}C \quad APE_2 = 0{,}52^{o}C$

$$H_2 = H^V_{T_{S_3}} + 0{,}52 \times Sobrecalentamiento$$

$$H_2 = 2.652 \left[{KJ}/{kg} \right] + 0{,}52 \times 1{,}884 \left[{KJ}/{kg} \right] = 2.653 \left[{KJ}/{kg} \right]$$

$$\lambda_{S_2} = H_1 - h^l_{T_{S_2}} = 2.684 \left[{KJ}/{kg} \right] - 440 \left[{KJ}/{kg} \right] = 2.244 \left[{KJ}/{kg} \right]$$

Efecto 3: $T_3 = 52{,}76^{\circ}C \quad T_{S_4} = 51{,}67^{\circ}C \quad APE_3 = 1{,}09^{\circ}C$

$$H_3 = H_{T_{S_4}}^{V} + 1{,}09 \times Sobrecalentamiento$$

$$H_3 = 2.594\left[{KJ}/{kg}\right] + 1{,}09 \times 1{,}884\left[{KJ}/{kg}\right] = 2.596\left[{KJ}/{kg}\right]$$

$$\lambda_{S_3} = H_2 - h_{T_{S_3}}^{l} = 2.653\left[{KJ}/{kg}\right] - 359\left[{KJ}/{kg}\right] = 2.294\left[{KJ}/{kg}\right]$$

Balances de energía.

- Etapa 1.

$$F \times c_{p_F} \times (T_F - 0^{\circ}C) + S \times \lambda_{S_1} = L_1 \times c_{p_{L_1}} \times (T_1 - 0^{\circ}C) + V_1 \times H_1$$
$$V_1 = F - L_1$$

Entonces,
(1)

$$22.680\left[{kg}/{hr}\right] \times 3{,}955\left[{KJ}/{kg-^{\circ}C}\right] \times 26{,}7^{\circ}C + S \times 2.200\left[{KJ}/{kg}\right] =$$
$$L_1 \times 3{,}885\left[{KJ}/{kg-^{\circ}C}\right] \times 105{,}26^{\circ}C + (22.680\left[{kg}/{hr}\right] - L_1) \times 2.684\left[{KJ}/{kg}\right]$$

- Etapa 2.

$$L_1 \times c_{p_{L_1}} \times (T_1 - 0^{\circ}C) + V_1 \times \lambda_{S_2} = L_2 \times c_{p_{L_2}} \times (T_2 - 0^{\circ}C) + V_2 \times H_2$$
$$V_2 = L_1 - L_2$$

Entonces,
(2)

$$L_1 \times 3{,}885\left[{KJ}/{kg-^{\circ}C}\right] \times 105{,}26^{\circ}C + (22.680 - L_1) \times 2.244\left[{KJ}/{kg}\right] =$$
$$L_2 \times 3{,}767\left[{KJ}/{kg-^{\circ}C}\right] \times 86{,}15^{\circ}C + (L_1 - L_2) \times 2.653\left[{KJ}/{kg}\right]$$

- Etapa 3.

$$L_2 \times c_{p_{L_2}} \times (T_2 - 0^{\circ}C) + V_2 \times \lambda_{S_3} = L_3 \times c_{p_{L_3}} \times (T_3 - 0^{\circ}C) + V_3 \times H_3$$
$$V_3 = L_2 - L_3$$

Entonces,
(3)

$$L_2 \times 3{,}767\left[\frac{KJ}{kg-{}^{o}C}\right] \times 86{,}15^{o}C + (L_1 - L_2) \times 2.294\left[\frac{KJ}{kg}\right] =$$

$$7.560\left[\frac{kg}{hr}\right] \times 3{,}485\left[\frac{KJ}{kg-{}^{o}C}\right] \times 52{,}76^{o}C + (L_2 - 7.560\left[\frac{kg}{hr}\right]) \times 2.596\left[\frac{KJ}{kg}\right]$$

Resolviendo el sistema:

$$L_1 = 18.141\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$L_2 = 13.110\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$L_3 = 7.560\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$V_1 = 4.539\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$V_2 = 5.031\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$V_3 = 5.550\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

$$S = 7.821\left[\frac{kg}{hr}\right]$$

Las diferencias con los valores de V asumido son:

$$\left|V_1 - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = \left|4.539\left[\frac{kg}{hr}\right] - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = 501\left[\frac{kg}{hr}\right] \approx 10\%\_error$$

$$\left|V_2 - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = \left|5.031\left[\frac{kg}{hr}\right] - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = 9\left[\frac{kg}{hr}\right] \approx 0{,}2\%\_error$$

$$\left|V_3 - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = \left|5.550\left[\frac{kg}{hr}\right] - 5.040\left[\frac{kg}{hr}\right]\right| = 510\left[\frac{kg}{hr}\right] \approx 10{,}1\%\_error$$

Realizaremos nuevamente los cálculos a partir de estos valores:

Paso 2.

$$L_1 = 18.141\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad V_1 = 4.539\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad x_1 = 0{,}125$$
$$L_2 = 13.110\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad V_2 = 5.031\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad x_2 = 0{,}173$$
$$L_3 = 7.560\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad V_3 = 5.550\left[\frac{kg}{hr}\right] \qquad x_3 = 0{,}3$$

Paso 3.

$$APE_1 = 0{,}32^oC$$
$$APE_2 = 0{,}50^oC$$
$$APE_3 = 1{,}09^oC$$

$$\sum \Delta T = 67{,}52^oC$$

$$\begin{matrix} \Delta T_1 = 12{,}69^oC & & \Delta T_1 = 15{,}85^oC \\ \Delta T_2 = 19{,}94^oC & \xrightarrow{CORREGIDOS} & \Delta T_2 = 18{,}78^oC \\ \Delta T_3 = 34{,}89^oC & & \Delta T_3 = 32{,}89^oC \end{matrix}$$

$$T_1 = 105{,}25^oC$$
$$T_2 = 86{,}15^oC$$
$$T_3 = 52{,}76^oC$$

$$T_{S_1} = 121{,}1^oC$$
$$T_{S_2} = 104{,}93^oC$$
$$T_{S_3} = 85{,}65^oC$$
$$T_{S_4} = 51{,}67^oC$$

Paso 4.

$$c_{p_F} = 3{,}955\left[\frac{KJ}{kg-^oK}\right]$$
$$c_{p_{L_1}} = 3{,}896\left[\frac{KJ}{kg-^oK}\right]$$
$$c_{p_{L_2}} = 3{,}784\left[\frac{KJ}{kg-^oK}\right]$$
$$c_{p_{L_3}} = 3{,}485\left[\frac{KJ}{kg-^oK}\right]$$

Efecto 1: $H_1 = 2.683\left[\frac{KJ}{kg}\right]$ $\qquad \lambda_{S_1} = 2.200\left[\frac{KJ}{kg}\right]$

Efecto 2: $H_2 = 2.653\left[{KJ}/{kg}\right]$ $\lambda_{S_2} = 2.243\left[{KJ}/{kg}\right]$

Efecto 3: $H_3 = 2.596\left[{KJ}/{kg}\right]$ $\lambda_{S_3} = 2.295\left[{KJ}/{kg}\right]$

De los balances de energía obtenemos:

$$L_1 = 18.144\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$L_2 = 13.116\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$L_3 = 7.560\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$V_1 = 4.536\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$V_2 = 5.028\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$V_3 = 5.556\left[{kg}/{hr}\right]$$

$$S = 7.707\left[{kg}/{hr}\right]$$

Las diferencias con los valores asumidos de V son:

$$\left|V_1 - 4.539\left[{kg}/{hr}\right]\right| = \left|4.536\left[{kg}/{hr}\right] - 4.539\left[{kg}/{hr}\right]\right| = 3\left[{kg}/{hr}\right] \approx 0{,}07\%\_error$$

$$\left|V_2 - 5.031\left[{kg}/{hr}\right]\right| = \left|5.028\left[{kg}/{hr}\right] - 5.031\left[{kg}/{hr}\right]\right| = 3\left[{kg}/{hr}\right] \approx 0{,}06\%\_error$$

$$\left|V_3 - 5.550\left[{kg}/{hr}\right]\right| = \left|5.556\left[{kg}/{hr}\right] - 5.550\left[{kg}/{hr}\right]\right| = 6\left[{kg}/{hr}\right] \approx 0{,}11\%\_error$$

Los resultados son bastante mejores, de modo que nos quedamos con estos.

Paso 5.

- Efecto 1: $q_1 = S \times \lambda_{S_1} = 7.707\left[{kg}/{hr}\right] \times \dfrac{2.200\left[{KJ}/{kg}\right] \times 1[hr]}{3.600[s]} = 4.710[kW]$

- Efecto 2: $q_2 = V_1 \times \lambda_{S_2} = 4.536\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right] \times \dfrac{2.243\left[{}^{KJ}\!/\!{}_{kg}\right] \times 1[hr]}{3.600[s]} = 2.826[kW]$

- Efecto 3: $q_3 = V_2 \times \lambda_{S_3} = 5.028\left[{}^{kg}\!/\!{}_{hr}\right] \times \dfrac{2.295\left[{}^{KJ}\!/\!{}_{kg}\right] \times 1[hr]}{3.600[s]} = 3.205[kW]$

- Cálculos de área.

(1) $A_1 = \dfrac{q_1}{U_1 \times \Delta T_1} = \dfrac{4.710 \times 10^3 [W]}{3.123\left[{}^{W}\!/\!{}_{m^2 - {}^{o}C}\right] \times 15{,}85^{o}C} = 95{,}15[m^2]$

(2) $A_2 = \dfrac{q_2}{U_2 \times \Delta T_2} = \dfrac{2.826 \times 10^3 [W]}{1.987\left[{}^{W}\!/\!{}_{m^2 - {}^{o}C}\right] \times 18{,}78^{o}C} = 75{,}73[m^2]$

(3) $A_3 = \dfrac{q_3}{U_3 \times \Delta T_3} = \dfrac{3.205 \times 10^3 [W]}{1.136\left[{}^{W}\!/\!{}_{m^2 - {}^{o}C}\right] \times 32{,}89^{o}C} = 85{,}78[m^2]$

Paso 6.

Los valores de ΔT se obtienen de: $\Delta T_i^{'} = \dfrac{\Delta T_i \times A_i}{A_m}$, donde $A_m = \dfrac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$.

Entonces,

$$A_m = \frac{95{,}15[m^2] + 75{,}73[m\ ] + 85{,}78[m^2]}{3} = 85{,}55[m^2]$$

$$\Delta T_1^{'} = \frac{15{,}85^{o}C \times 95{,}15[m^2]}{85{,}55[m^2]} = 17{,}63^{o}C$$

(diferencia = 17,63 °C - 15,85 °C = 1,78 °C)

$$\Delta T_2^{'} = \frac{18{,}78^{o}C \times 75{,}73[m^2]}{85{,}55[m^2]} = 16{,}62^{o}C$$

(diferencia = 18,78 °C – 16,62 °C = 2,16 °C)

$$\Delta T_3^{'} = \frac{32{,}89^{o}C \times 85{,}78[m^2]}{85{,}55[m^2]} = 32{,}98^{o}C$$

(diferencia = 32,98 °C – 32,89 °C = 0,09 ºC)

Entonces,

$\sum \Delta T = 67{,}23^{o} C$ (diferencia = 67,52 °C – 67,23 °C= 0,29 °C)

Las diferencias son pequeñas, de manera que no influirán demasiado en los balances de calor.

Entonces,

$$A = 58{,}55[m^2]$$
$$S = 7.707\left[{}^{kg}\!/\!_{hr}\right]$$

<u>Gráfico N° 1.</u> Líneas de Dühring para el sistema hidróxido sódico – agua

Gráfico N° 2.

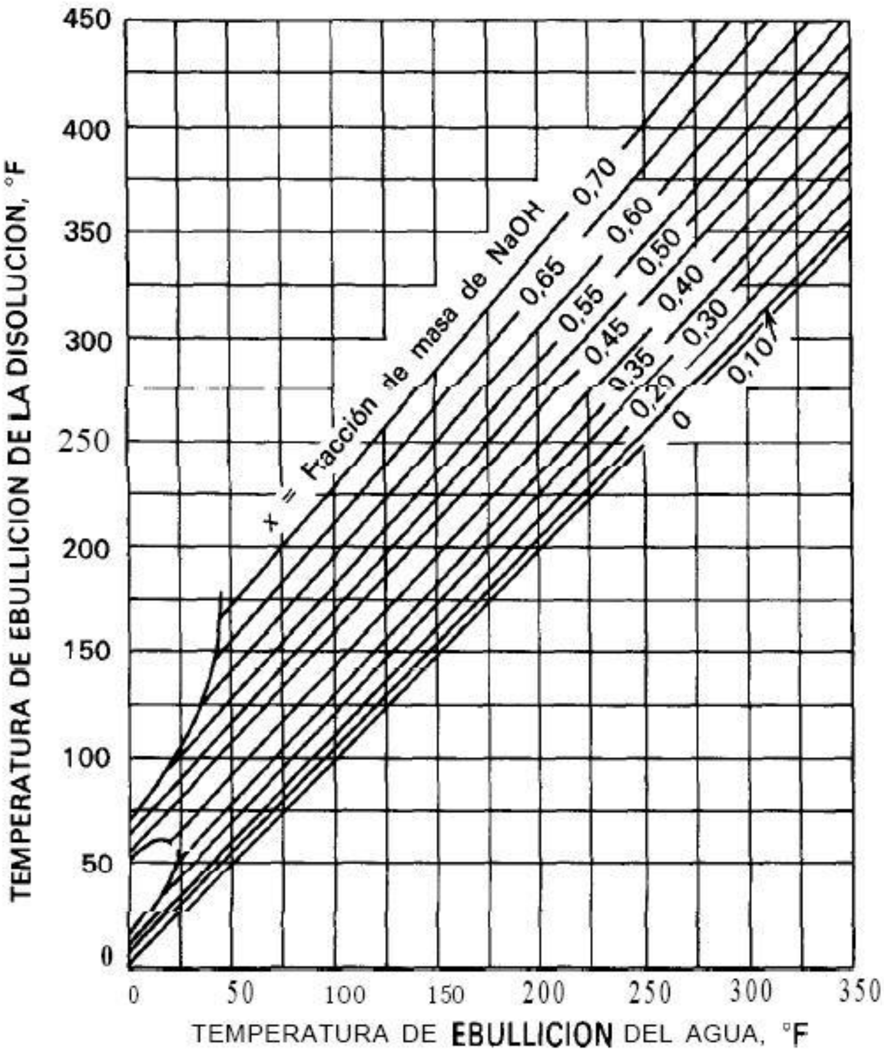
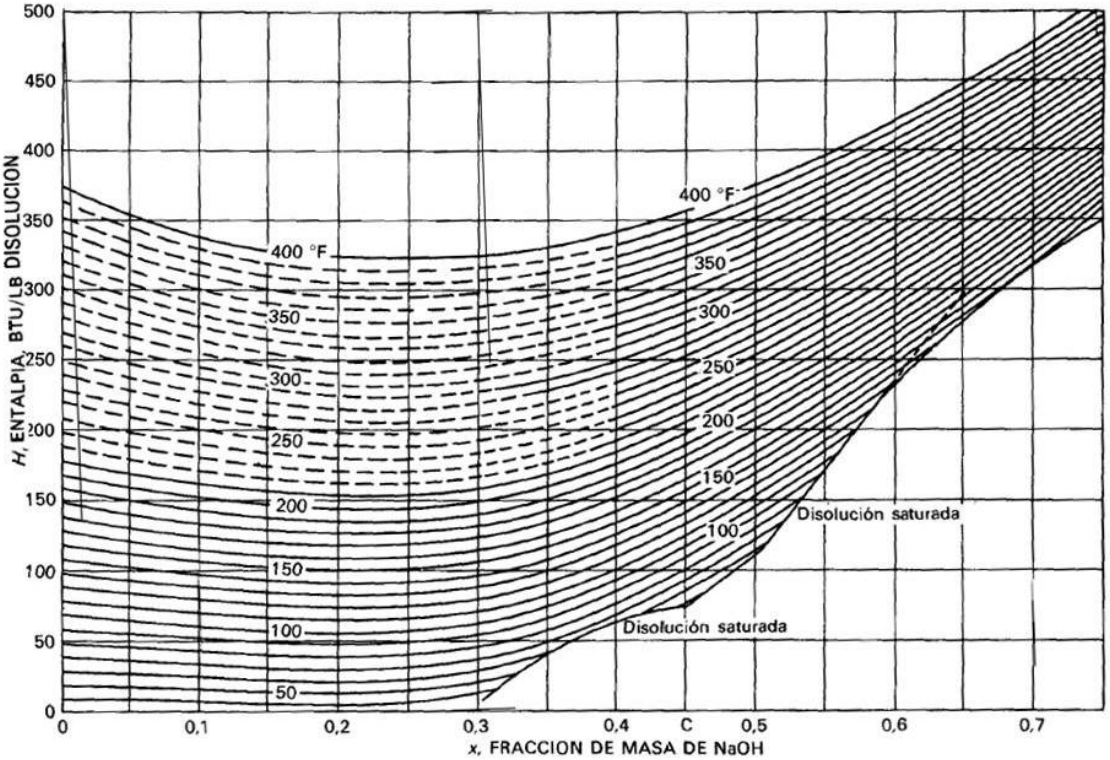


Gráfico N° 2. **Diagrama entalpía – concentración para el sistema hidróxido de sodio – agua**


H, ENTALPIA, BTU/LB DISOLUCION
x, FRACCION DE MASA DE NaOH
400 °F
350
300
250
200
150
100
50
Disolución saturada
Disolución saturada
C
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0