



Departamento de Ingeniería Civil  
Química y Biotecnología.  
Facultad de Ciencias Físicas  
y Matemáticas.  
UNIVERSIDAD DE CHILE  
[IQ46B] Operaciones de  
Transferencia I; 2009 - Semestre II

## Ejercicio 4

Profesor: Tomás Vargas.

Auxiliar: Melanie Colet.

Ayudante: Jorge Monardes – Diego Guiachetti.

1. Un evaporador de simple efecto está siendo usado para concentrar una alimentación de 10.000 lb/h de una solución de caña de azúcar, a 80°F, desde un 15% en peso de sólidos a un 30% para ser utilizada en un proceso alimenticio. Vapor saturado a 240°F se utiliza para el calentamiento y la presión del espacio de evaporación será de 1 atm absoluta.

Si la elevación del punto de ebullición se rige por la siguiente ecuación:

$$APE (^{\circ}F) = 3,2 \cdot x + 11,2 \cdot x^2$$

la capacidad calorífica de la solución por:

$$C_p (\text{BTU/lb-}^{\circ}\text{F}) = 1,0 - 0,56 \cdot x$$

y la entalpía del vapor sobrecalentado por:

$$H_v (\text{BTU/lb}) = H_{v,sat} + 92,3 \cdot APE$$

,donde  $x$  es la fracción en peso de azúcar y  $APE$  es el aumento del punto de ebullición en °F.

Calcule:

- La cantidad de vapor saturado requerida (en lb/h).
- La economía del proceso.
- El área de intercambio requerida por el evaporador (en ft<sup>3</sup>).  
Considere  $U = 350 \text{ BTU/h-ft}^2\text{-}^{\circ}\text{F}$

Solución:

Balance de masas:

$$m_f = 10000 \text{ lb/h}$$

$$m_{azucar} = 10000 \text{ lb/h} \cdot 0,15 = 1500 \text{ lb/h}$$

Luego, si la solución sale al 30%:

$$0,3 = \frac{m_{azucar}}{m} \Rightarrow m = 5000 \text{ lb/h}$$

Por otro lado del balance de energía:

$$m_s \cdot \lambda_s = m_f \cdot C_p \cdot \Delta T + (m_f - m) \cdot H_v$$

Calculando cada término:

$$\lambda_s (240^\circ F) = 952,18 \text{ BTU/lb}$$

$$C_p = 1 - 0,56 \cdot 0,3 = 0,832 \text{ BTU/lb-}^\circ\text{F (se calcula a la concentración final)}$$

$$\text{APE } (^\circ\text{F}) = 3,2 \cdot 0,3 + 11,2 \cdot 0,3^2 = 1,97^\circ\text{F}$$

Este último valor sirve para calcular el punto de ebullición de la solución:

$$T_{eb,agua} (1 \text{ atm}) = 212^\circ\text{F} \Rightarrow T_{eb,solucion} = 212 + 1,97 = 213,97^\circ\text{F}$$

$$\rightarrow \Delta T = 133,97^\circ\text{F}$$

Con esta temperatura y a la presión de 1 atm se calcula la entalpía del vapor sobrecalentado (agua removida):

$$H_v = \lambda_v (212^\circ\text{F}) + 92,3 \cdot \text{APE} = 970 + 92,3 \cdot 1,97 = 1151,8 \text{ BTU/lb}$$

Reemplazando en el balance de energía:

$$m_s \cdot 952,18 = 10000 \cdot 0,832 \cdot 133,97 + (5000) \cdot 1151,8$$

$$\Rightarrow m_s = 7219 \text{ lb/h}$$

De esta forma la economía del proceso es:

$$\text{Economía} = \frac{m_f - m}{m_s} = \frac{5000}{7219} = 0,69$$

Por último, el área de intercambio es:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_s - T_{eb,solucion}) = m_s \cdot \lambda_s = 6866568 \text{ BTU/h}$$

$$\rightarrow A = \frac{6866568}{350 \cdot (240 - 213,97)} = 753,7 \text{ ft}^2$$

2. En un evaporador de triple efecto se concentra una solución que no tiene aumento apreciable del punto de ebullición. Si la temperatura del vapor vivo alimentado al primer efecto es igual a 328 °F, la temperatura de ebullición en el último efecto es 100 °F y los coeficientes globales son:  $U_1 = 900$ ,  $U_2 = 700$  y  $U_3 = 500 \text{ BTU/h-ft}^2$ , determine las temperaturas de ebullición en el primer y segundo efecto. Justifique sus cálculos y represente sus resultados en una escala de temperaturas.

Solución:

$$\text{Se tiene que } \Delta T_T = T_s - T_3 = 328 - 100 = 228 \text{ °F}$$

Utilizando las siguientes relaciones:

$$\Delta T_1 = \frac{\frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \cdot \Delta T_T \rightarrow \Delta T_1 = 55,8 \text{ °F}$$

$$\Delta T_2 = \frac{\frac{1}{U_2}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \cdot \Delta T_T \rightarrow \Delta T_2 = 71,7 \text{ °F}$$

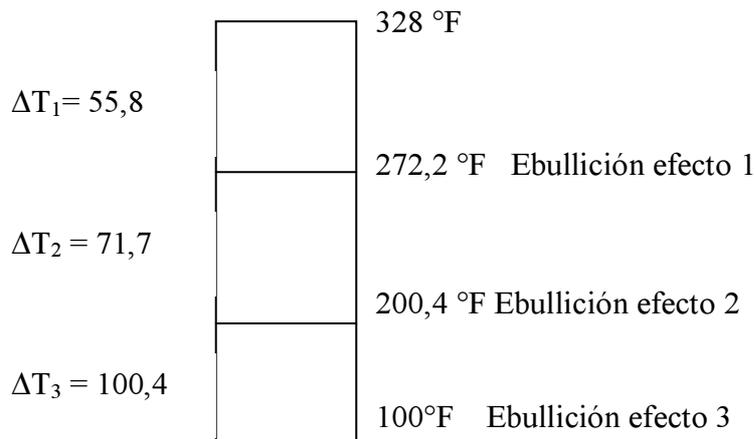
$$\Delta T_3 = \frac{\frac{1}{U_3}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \cdot \Delta T_T \rightarrow \Delta T_3 = 100,4 \text{ °F}$$

De esta forma:

$$T_1 = T_s - \Delta T_1 = 328 - 55,8 = 272,2 \text{ °F}$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T_2 = 272,2 - 71,7 = 200,4 \text{ °F}$$

La escala de temperaturas queda:



3. Considere el problema N° 1 de la clase auxiliar N° 4 donde un evaporador simple se utiliza para concentrar 30000 lb/h de una solución de NaOH a 120 °F desde 15% a un 40% en peso de sólidos. Para ello se utilizó como medio calefactor un flujo de 21758 lb/h de vapor vivo a 27 psi de presión relativa, siendo la presión absoluta en la cámara de evaporación igual a 1,8 psia. Considere que el proceso se realiza ahora utilizando una presión absoluta en la cámara de evaporación igual a 0,12 psia. Calcule la concentración a la que sale en estas nuevas condiciones de operación, la solución concentrada.

Solución:

$$m_s = 21758 \text{ lb/h}$$

$$27 \text{ psi} = 41,7 \text{ psia} \rightarrow \lambda_s = 932 \text{ BTU/lb}$$

De esta forma, el calor administrado por el vapor es:

$$Q = m_s \cdot \lambda_s = 21759 \cdot 932 = 20278456 \text{ BTU/h}$$

Efectuando el balance de masas:

$$m_f = 30000 \text{ lb/h}$$

$$m_{\text{sólido}} = 30000 \cdot 0,15 = 4500 \text{ lb/h}$$

Como no se conoce la concentración a la salida, se deja el flujo de solución concentrada en función de esta variable:

$$m = \frac{4500}{x} \text{ lb/h}$$

De esta forma el balance de energía queda:

$$Q = (m_f - m) \cdot H_v + m \cdot H - m_f \cdot H_f$$

$$20278456 \text{ BTU/h} = \left(30000 - \frac{4500}{x}\right) \cdot H_v + \frac{4500}{x} \cdot H - 30000 \cdot H_f$$

Se tiene que:

$$H_f = 75 \text{ BTU/lb}$$

$$H_v(0,12 \text{ psia}) = 1071 \text{ BTU/lb (el agua retirada sale como vapor saturado)}$$

$$T_{eb,agua}(0,12 \text{ psia}) = 39,65 \text{ }^\circ\text{F}$$

Como no se tienen más datos, hay que empezar a iterar respecto a la concentración de sólidos a la salida del evaporador, por lo cual se sigue el siguiente procedimiento:

- 1- Se elige una concentración de salida.
- 2- Se calcula el punto de ebullición de la solución (líneas de Dühring, gráfico N° 1).
- 3- Se calcula la entalpía de la solución de salida utilizando el gráfico N° 2.
- 4- Se calcula Q, si es igual al entregado por el medio calefactor, se termina la iteración, sino, volver al punto 1.

De esta forma, resulta que la solución de salida tiene un 45% de sólidos, lo cual se comprueba calculando el calor:

$$0,45\% \rightarrow T_{eb,solucion} = 97 \text{ }^\circ\text{F (Gráfico 1)}$$

$$H=110 \text{ BTU/lb (Gráfico 2)}$$

Reemplazando en el balance de energía, da que el calor es:

$$Q = \left(30000 - \frac{4500}{0,45}\right) \cdot 1071 + \frac{4500}{0,45} \cdot 110 - 30000 \cdot 75$$

$$Q = 20270000 \text{ BTU/h} \approx 20278456 \text{ BTU/h}$$