

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
**INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**  
**DE LOS ALIMENTOS/**

Asignatura: Ingeniería de Procesos III (ITCL 234)

Operaciones Unitarias (ITCL 238)

Profesor: Elton F. Morales Blancas

Ayudantes: Anís Matamala y Maximiliano Osorio

**UNIDAD: EVAPORACION DE SOLUCIONES ALIMENTICIAS**

**GUIA DE PROBLEMAS I: Evaporadores de simple efecto**

**Ejercicio 1.**

Un evaporador continuo de efecto simple concentra 10000 (kg/hr) de una solución de sal al 1.0 % en peso que entra a 40°C, hasta una concentración final de 8 % en peso. El espacio del evaporador está a 102 KPa absoluta y el vapor de agua que se introduce está saturado a 140 KPa. El coeficiente total  $U$  es 1700 ( $W / m^2K$ ). Calcúlese las cantidades de vapor y de liquido como productos, así como el área de transferencia de calor que se requiere. Nota: Calcular EPE basándose en el método termodinámico. Las capacidades caloríficas del NaCl (cristales) están dada por la siguiente ecuación:  $C_p \left( \frac{cal}{mol \cdot ^\circ C} \right) = 10,79 + 0,000420 \cdot T$ ; donde  $T$  está en grados Kelvin; y es aplicable para el rango  $273 < T < 1074$  K.

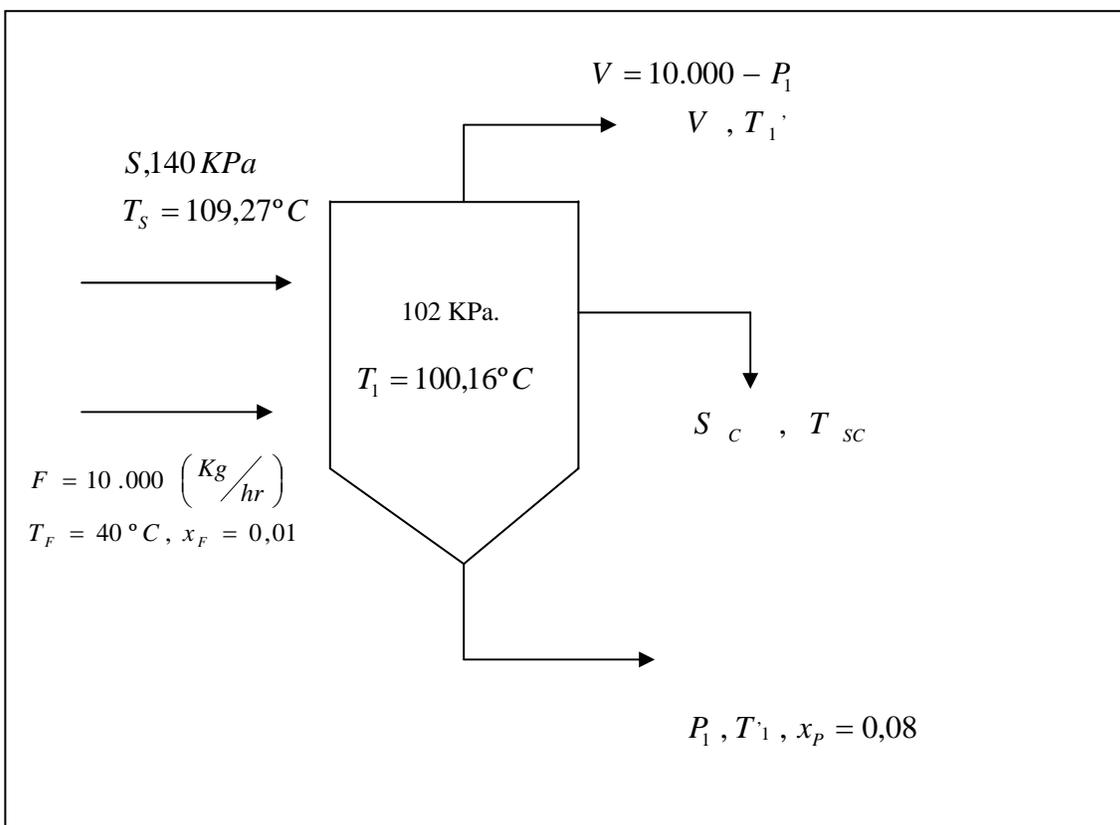


FIGURA 1. Evaporador continuo de efecto simple

Información entregada:

- Flujo másico de alimentación:  $F = 10.000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$
- Concentración del líquido diluido:  $x_F = 0,01$
- Concentración del líquido concentrado:  $x_p = 0,08$
- Presión en el espacio interior del evaporador: 102 KPa.
- Presión del vapor que se introduce en el equipo: 140 KPa.
- Temperatura de ingreso del líquido diluido o alimentación:  $T_F = 40^\circ\text{C}$
- Coeficiente de transferencia de calor:  $U = 1700 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right)$
- Ecuación para el cálculo de las Capacidades caloríficas de las soluciones:

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T$$

Solución:

En la figura (1) se muestra el diagrama de flujo del proceso, siguiendo los pasos descritos los cálculos son los siguientes para responder las interrogantes:

Paso 1. Para 140 KPa, la temperatura de saturación es  $109,27^\circ\text{C}$ , para 102 KPa, la temperatura de saturación es  $100,16^\circ\text{C}$  de acuerdo con las tablas de vapor respectivamente.

Paso 2. Cálculo de EPE con  $x = 0,08$ , basándose en el método termodinámico para el evaporador utilice la siguiente ecuación:

$$EPE = \Delta T_B = \frac{R_g \cdot W_A \cdot T_{A_0}^2 \cdot m}{L_v \cdot 1000} \quad \dots (1)$$

Donde:

$$R_g = \text{Constante de los gases ideales} : 8,314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right)$$

$$W_A = \text{Peso molecular del agua} : 18 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{Kgmol}} \right)$$

$$L_v = \text{Calor latente de vaporización} : 4,0626 \times 10^4 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$$T_{A_0} = \text{Punto de ebullición del agua pura} : 373,1 \text{ (K)}$$

$m = \text{Molalidad}$

2.a) Calcule la molalidad. Se entiende que molalidad son los moles de soluto en 1000 gramos de solvente.

$$8 \text{ g de soluto} = 92 \text{ g de solvente}$$

$$x = 1000 \text{ g de solvente} \quad \rightarrow \quad x = 86,95 \text{ g de soluto}$$

con estos gramos de soluto podemos calcular la molalidad:

$$m = \frac{\text{gramos de soluto}}{\text{Peso molecular sal}}$$

$$m = 86,95 \text{ gramos de soluto} / 59 \text{ g/mol}$$

$$m = 1,47$$

2.b) Calculo del valor de EPE.

Si reemplazamos  $m$  en la ecuación (1), tenemos que  $EPE = 0,75^\circ C$

luego :

$$T_1 = T_0 + EPE$$

$$T_1 = (100,16 + 0,75)^\circ C \quad T_1 = 100,91^\circ C$$

Paso 3. Balance de materiales y de sólidos

Balance total de materiales y de sólidos para calcular la cantidad de producto concentrado y caudal másico del vapor.

$$\text{Balance total:} \quad F + S = V + P + S_c \quad \dots\dots (2)$$

Como  $S = S_c$ , pero  $S_c$  sale condensado, el balance total queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance total:} \quad F = V + P \quad \dots\dots (3)$$

$$\text{Balance de sólidos:} \quad F \cdot X_F = V \cdot X_V + P \cdot X_P \quad \dots\dots (4)$$

Como la fracción de sólidos en el vapor es igual a cero la ecuación (4) se reduce a la expresión siguiente, reemplazando los valores conocidos obtenemos el valor de  $P$ :

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad \dots\dots (5)$$

$$10.000 \cdot 0,01 = P \cdot 0,08 \quad \rightarrow \quad P = 1250 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

Ahora como tenemos  $F$  y  $P$  con la siguiente ecuación, podemos calcular el total vaporizado:

$$V = F - P \quad \dots\dots (6)$$

$$V = (10.000 - 1250) \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

$$V = 8750 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

Paso 4 .Resumen de temperaturas en el equipo.

$$\begin{aligned} T_F &= 40^\circ C & T_1 &= 100,91^\circ C \\ T_S &= 109,27^\circ C & T_{SC} &= 109,27^\circ C \\ T_P &= 100,91^\circ C \end{aligned}$$

Paso 5. La capacidad calorífica del liquido en el evaporador se calcula con la siguiente expresión

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T \quad \dots\dots (7)$$

donde  $T$  está en Kelvin.

Luego, para  $T_F = 313,1$  y  $T_P = 373,25$ , obtendremos los siguientes valores de  $C_p$ :

Para la alimentación  $F$ :  $C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T$

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot 313,1 = 10,92 \left( \frac{cal}{mol^\circ C} \right)$$

$$C_p = 0,77 \left( \frac{kJ}{Kg^\circ C} \right)$$

Para el producto  $P$ :  $C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T$

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot 373,25 = 10,94 \left( \frac{cal}{mol^\circ C} \right)$$

$$C_p = 0,78 \left( \frac{kJ}{Kg^\circ C} \right)$$

Nota:

Utilice los siguientes datos para el cambio de unidades en  $C_p$

$$1 \text{ cal} = 4,186$$

$$1 \text{ mol} = 59 \text{ gmol}$$

Paso 6. Cálculo de entalpías  $h$  para las corrientes de vapor con respecto al agua a  $0^\circ C$  como base.

$h_s$  = Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a  $T_s$

$h_v$  = Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a  $T_1$

$h_{sc}$  = Entalpía del vapor que sale condensado a  $T_s$

$$h_s = 2690 \left( \frac{kJ}{Kg} \right) \quad h_v = 2677 \left( \frac{kJ}{Kg} \right) \quad h_{sc} = 458 \left( \frac{kJ}{Kg} \right)$$

Paso 7. Cálculo del vapor de agua requerido por el evaporador realizando un balance de energía.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_S = P \cdot h_P + V \cdot h_V + S \cdot h_{SC} \quad \dots\dots (8) \quad \text{se}$$

conoce a  $h_F$  y a  $h_P$ , como las entalpías del líquido diluido y concentrado con las siguientes expresiones:

$$h_F = C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Ref}) \quad h_P = C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Ref})$$

Luego el balance de energía se expresa con la siguiente ecuación:

$$F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Ref}) + S \cdot h_S = P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot h_V + S_C \cdot h_{SC} \quad \dots\dots (9)$$

si despejamos la incógnita  $S$  de la ecuación (9), tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot h_V - F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Ref})}{(h_S - h_{SC})} \quad \dots\dots (10)$$

si se reemplazan todos los valores antes calculados en la ecuación (10) tenemos que el valor de  $S$  corresponde a

$$S = 10.400 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

Paso 8. Cálculo del calor  $q$  transferido en el equipo y área de transferencia de calor.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores de  $q$ , donde  $q$  es el calor transferido por el equipo y  $A$  es el área de transferencia de calor del equipo.

$$q = A \cdot U \cdot (\Delta T) = S \cdot (h_S - h_{SC}) = S \cdot \lambda_S \quad \dots\dots (11)$$

$$\text{donde } \Delta T = T_S - T_1 \quad \Delta T = 109,27^\circ\text{C} - 100,56^\circ\text{C} \quad \Delta T = 8,71^\circ\text{C}$$

si reemplazamos el valor de  $S$ , obtenido de la ecuación (10) y reemplazamos los valores de las entalpías de los vapores saturado y condensado en la ecuación (11), el valor de  $q$  es igual a:

$$q = \frac{23212800 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \right)}{3600 \left( \text{seg} \right)} = 6448 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \right) = 6448 \text{ kW} = 6,44 \times 10^6 \text{ W}$$

Nota: Utilice como factor de conversión para cambiar las unidades de  $q$ , lo siguiente:

$$\boxed{1 \text{ kJ} / \text{seg} = 1 \text{ kW}}$$

Luego para el cálculo del área solo necesitamos reemplazar en la siguiente expresión:

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T} \quad \dots\dots( 12 )$$

$$A = \frac{6,44 \cdot 10^6 \text{ (W)}}{1700 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right) \cdot 8,71 \text{ (K)}}$$

$$A = 435 \text{ m}^2$$

El valor del área de transferencia de calor es:  $A = 435 \text{ m}^2$

## Ejercicio 2.

Una alimentación de 4500 (kg/hr) de una solución de sal al 2,0 % en peso y 311 K, entra continuamente a un evaporador de efecto simple para concentrarla al 5,0 %. La evaporación se lleva a cabo a presión atmosférica y el área del evaporador es 70 m<sup>2</sup>. El calentamiento se logra con vapor de agua saturado a 385 K. Calcúlense las cantidades de vapor y de líquido producidos y el coeficiente total de transferencia de calor U. Utilizar las mismas consideraciones y procedimientos del problema 1 para el estimar el valor de EPE y Cp para las soluciones de salmuera.

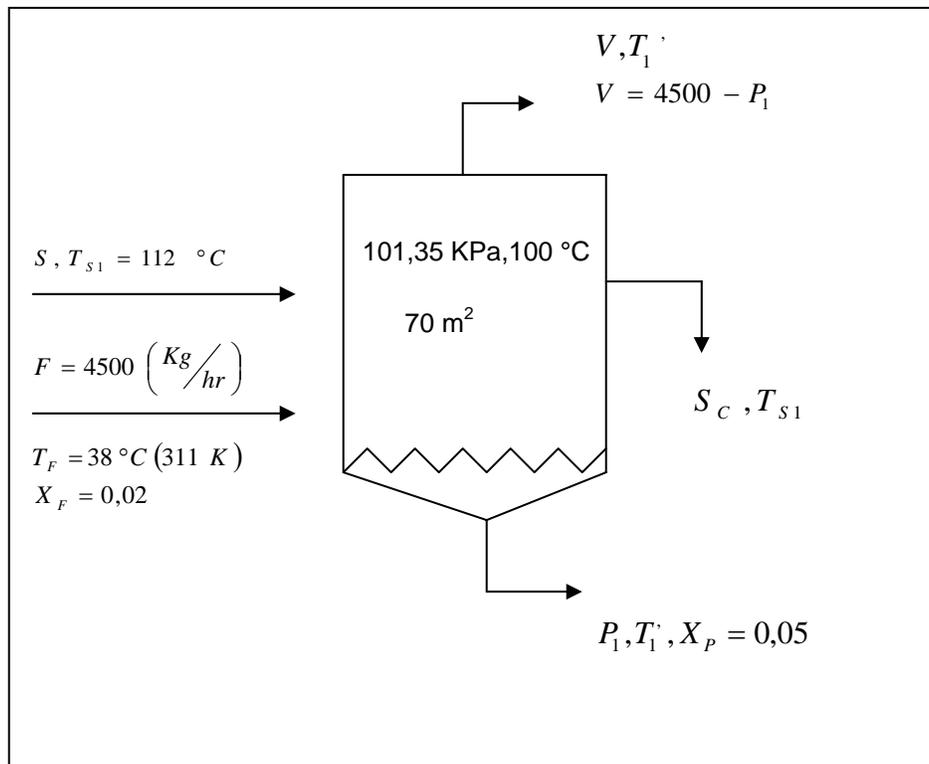


FIGURA 2. Evaporador continuo de efecto simple

Información entregada:

- Flujo másico de alimentación:  $4500 \left( \frac{kg}{hr} \right)$
- Concentración del líquido diluido:  $x_F = 0,02$
- Concentración del líquido concentrado:  $x_p = 0,05$
- Presión en el espacio interior del evaporador: 101,35 KPa.
- Temperatura de ingreso del líquido diluido o alimentación: 38°C
- Temperatura del vapor de agua saturado:  $T_s = 112 \text{ °C}$

- Área del evaporador:  $A = 70 \text{ m}^2$
- Ecuación para el cálculo de las Capacidades caloríficas de las soluciones:

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T$$

### Solución:

En la figura (2) se muestra el diagrama de flujo del proceso, siguiendo los pasos descritos los cálculos son los siguientes para responder las interrogantes:

Paso 1. Para 101,35 KPa la temperatura de saturación es 100 °C, de acuerdo con las tablas de vapor.

Paso 2. Cálculo de EPE con  $x = 0,05$ , basándose en el método termodinámico para el evaporador utilice la siguiente ecuación:

$$EPE = \Delta T_B = \frac{R_g \cdot W_A \cdot T_{A_0}^2 \cdot m}{L_v \cdot 1000} \quad \dots (1)$$

Donde:

$$R_g = \text{Constante de los gases ideales} : 8,314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \right)$$

$$W_A = \text{Peso molecular del agua} : 18 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{Kgmol}} \right)$$

$$L_v = \text{Calor latente de vaporización} : 4,0626 \times 10^4 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$$T_{A_0} = \text{Punto de ebullición del agua pura} : 373,1 \text{ (K)}$$

$m = \text{Molalidad}$

2.a) Calcule la molalidad. Se entiende que molalidad son los moles de soluto en 1000 gramos de solvente.

$$5 \text{ g de soluto} = 95 \text{ g de solvente}$$

$$x = 1000 \text{ g de solvente} \quad \rightarrow \quad x = 52,6 \text{ g de soluto}$$

con estos gramos de soluto podemos calcular la molalidad:

$$m = \frac{\text{gramos de soluto}}{\text{Peso molecular sal}} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} m &= 52,6 \text{ de soluto} / 59 \text{ gmol} \\ m &= 0,89 \end{aligned}$$

2.b) Cálculo del valor de EPE.

Si reemplazamos  $m$  en la ecuación anterior, tenemos que  $EPE = 0,45^\circ \text{C}$

$$\text{luego : } \begin{aligned} T_1 &= T_1 + EPE \\ T_1 &= (100 + 0,45)^\circ \text{C} \end{aligned} \quad T_1 = 100,45(^\circ \text{C})$$

### Paso 3. Balance de materiales y de sólidos

Balance total de materiales y de sólidos para calcular la cantidad de producto concentrado y caudal másico del vapor.

$$\text{Balance total:} \quad F + S = V + P + S_c \quad \text{..... (2)}$$

Como  $S = S_c$  pero  $S_c$ , sale condensado, el balance total queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance total:} \quad F = V + P \quad \text{..... (3)}$$

$$\text{Balance de sólidos:} \quad F \cdot X_F = V \cdot X_V + P \cdot X_P \quad \text{..... (4)}$$

Como la fracción de sólidos en el vapor es igual a cero la ecuación (4) se reduce a la siguiente expresión y reemplazando los valores conocidos tenemos que:

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad \text{..... (5)}$$

$$4500 \cdot 0,02 = P \cdot 0,05$$

$$P = 1800 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

luego de la ecuación (3) con los valores ya conocidos podemos calcular el valor de  $V$  con la ecuación (6)

$$V = F - P \quad \text{.....( 6)}$$

$$V = (4500 - 1800) \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

$$V = 2700 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

### Paso 4. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$T_F = 38^\circ C \quad T_1 = 100,45^\circ C \quad T_p = 100,45^\circ C$$

$$T_s = 112^\circ C \quad T_{SC} = 112^\circ C$$

Paso 5. La capacidad calorífica del líquido en el evaporador se calcula con la siguiente expresión. Donde  $T$  está en Kelvin.

$$C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T \quad \text{..... (7)}$$

Luego, para  $T_F = 311$  y  $T_p = 373,24$ , obtendremos los siguientes valores de  $C_p$ :

Para la alimentación  $F$ :  $C_p = 10,79 + 0,000420 \cdot T$

$$Cp = 10,79 + 0,000420 \cdot 311 = 10,9 \left( \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{C}} \right)$$

$$Cp = 0,77 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

Para el producto  $P$ :  $Cp = 10,79 + 0,000420 \cdot T$

$$Cp = 10,79 + 0,000420 \cdot 373,24 = 10,94 \left( \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{C}} \right)$$

$$Cp = 0,78 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right)$$

Paso 6. Cálculo de entalpías  $h$  para las corrientes de vapor con respecto al agua a  $0^\circ\text{C}$  como base.

$h_s =$  Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a  $T_s$

$h_v =$  Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a  $T_1$

$h_{sc} =$  Entalpía del vapor que sale condensado a  $T_s$

$$h_s = 2695 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad h_v = 2676 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad h_{sc} = 470 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Paso 7. Cálculo del vapor de agua requerido por el evaporador realizando un balance de energía.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_S = P \cdot h_P + V \cdot h_V + S \cdot h_{SC} \dots\dots (8)$$

se conoce a  $h_F$  y a  $h_P$ , como las entalpías del líquido diluido y concentrado con las siguientes expresiones:

$$h_F = Cp_F \cdot (T_F - T_{Ref}) \quad h_P = Cp_P \cdot (T_P - T_{Ref})$$

Luego el balance de energía se expresa con la siguiente ecuación:

$$F \cdot Cp_F \cdot (T_F - T_{Ref}) + S \cdot h_S = P \cdot Cp_P \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot H_V + S_C \cdot h_{SC} \dots\dots (9)$$

si despejamos la incógnita  $S$ , tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot Cp_P \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot h_V - F \cdot Cp_F \cdot (T_F - T_{Ref})}{(h_S - h_{SC})} \dots\dots (10)$$

si se reemplazan todos los valores antes calculados en la ecuación (10) tenemos que el valor de  $S$  corresponde a

$$S = 3251 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

Paso 8. Cálculo del calor  $q$  transferido en el equipo y área de transferencia de calor.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores de  $q$ , donde  $q$  es el calor transferido por el equipo y  $U$  es el coeficiente total de transferencia de calor

$$q = A \cdot U \cdot (\Delta T) = S \cdot (h_s - h_{s_c}) = S \cdot \lambda_s \quad \text{..... (11)}$$

$$\text{donde } \Delta T = T_s - T_1 \rightarrow \Delta T = 112(^{\circ}\text{C}) - 100,24(^{\circ}\text{C}) \quad \Delta T = 11,76(^{\circ}\text{C})$$

De la ecuación (11) reemplazamos los valores conocidos y obtenemos el valor de  $q$ :

$$q = \frac{7234172 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \right)}{3600 \left( \text{seg} \right)} = 2009 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{seg}} \right) = 2009 \left( \text{kW} \right) \cdot \left( \frac{1000 \text{ W}}{\text{kW}} \right) = 2 \times 10^6 \text{ W}$$

Con la siguiente expresión calcule el valor de  $U$

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad \text{..... (12)}$$

si reemplazamos los valores conocido tenemos que el valor de  $U$ , que es el coeficiente total de transferencia de calor es:  $U = 2429 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$

### Ejercicio 3.

Con los mismos valores del área,  $U$ , presión del evaporador y temperatura de la alimentación del problema 2, calcular las cantidades de líquido y vapor producidos y la concentración del líquido de salida cuando la velocidad de alimentación se aumenta a 6800 (kg/hr).

#### Solución:

Paso 1. Para 42 KPa la temperatura de saturación es 76,9 °C, de acuerdo con las tablas de vapor.

Paso 2. Recuerde que tenemos la siguiente información:

- Flujo de alimentación:  $F = 6800 \left( \frac{kg}{hr} \right)$
- Concentración del líquido diluido:  $x_F = 0,02$
- Suponga una concentración del líquido final:  $x_p = 0,05$
- Presión en el espacio interior del evaporador: 42 KPa.
- Temperatura de ingreso del líquido diluido o alimentación: 38° C
- Temperatura del vapor de agua saturado:  $T_s = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Área del evaporador:  $A = 70 \text{ } m^2$
- Capacidades caloríficas de las soluciones:  
 $C_{p_p} = 0,76 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$   
 $C_{p_F} = 0,77 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$
- Coeficiente de transferencia de calor:  $U = 2429 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$

Paso 3. Balance de materiales y sólidos

Balance total de materiales y de sólidos para calcular la cantidad de producto concentrado y caudal másico del vapor.

$$\text{Balance total:} \quad F + S = V + P + S_c \quad \dots\dots (1)$$

Como  $S = S_c$  pero  $S_c$ , sale condensado, el balance total queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance total:} \quad F = V + P \quad \dots\dots(2)$$

Balance de sólidos:  $F \cdot X_F = V \cdot X_V + P \cdot X_P$  ..... (3)

Como la fracción de sólidos en el vapor es igual a cero la ecuación (3) se reduce a la siguiente expresión y a su vez reemplace los valores conocidos:

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad \text{.....(4)}$$

$$6800 \cdot 0,02 = P \cdot 0,05$$

$$P = 2720 \left( \frac{g}{hr} \right)$$

si se despeja la ecuación (2) para calcular el valor de  $V$ , tenemos lo siguiente:

$$V = F - P \quad \text{.....(5)}$$

$$V = (6800 - 2720) \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

$$V = 4080 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

Paso 4. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$T_F = 38^\circ C \quad T_1 = 100,45^\circ C$$

$$T_S = 112^\circ C \quad T_{SC} = 112^\circ C$$

$$T_P = 100,45^\circ C$$

Paso 5. Cálculo de entalpías  $h$  para las corrientes de vapor con respecto al agua a  $0^\circ C$  como base.

$h_s =$  Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a  $T_s$

$h_v =$  Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a  $T_1$

$h_{sc} =$  Entalpía del vapor que sale condensado a  $T_s$

$$h_s = 2695 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad h_v = 2676 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad h_{sc} = 470 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Paso 6. Cálculo del vapor de agua requerido por el evaporador realizando un balance de energía.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_S = P \cdot h_P + V \cdot h_V + S \cdot h_{SC} \quad \text{.....(6)}$$

se conoce a  $h_F$  y a  $h_P$ , como las entalpías del liquido diluido y concentrado con las siguientes expresiones:

$$h_F = C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f}) \qquad h_P = C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f})$$

Luego el balance de energía se expresa con la siguiente ecuación:

$$F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f}) + S \cdot h_S = P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f}) + V \cdot h_V + S_C \cdot h_{S_C} \dots\dots (7)$$

si despejamos la incógnita  $S$ , tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f}) + V \cdot h_V - F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f})}{(h_S - h_{S_C})} \dots\dots (8)$$

si se reemplazan todos los valores antes calculados en la ecuación (8) tenemos que el valor de  $S$  corresponde a

$$S = 4913 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

Paso 7. Cálculo del calor  $q$  transferido en el equipo y área de transferencia de calor.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores de  $q$ , donde  $q$  es el calor transferido por el equipo y  $U$  es el coeficiente total de transferencia de calor

$$q = A \cdot U \cdot (\Delta T) = S \cdot (h_S - h_{S_C}) = S \cdot \lambda_S \dots\dots (9)$$

$$\text{donde } \Delta T = T_S - T_1 \rightarrow \Delta T = 112(^{\circ}C) - 100,24(^{\circ}C) \quad \Delta T = 11,76(^{\circ}C)$$

si reemplazamos los valores conocidos en la ecuación (9) obtenemos el valor de  $q$  es igual a:

$$q = \frac{1093142 \left( \frac{kJ}{hr} \right)}{3600 (seg)} = 3036 \left( \frac{kJ}{seg} \right) = 3036 (kW) \cdot \left( \frac{1000 W}{kW} \right) = 3,03 \times 10^6 W$$

El valor de  $q$  es igual a:  $q = 3,03 \times 10^6 W$ , luego para el cálculo del área solo necesitamos reemplazar este valor en la ecuación siguiente.

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T} \dots\dots (10)$$

$$A = \frac{3,03 \times 10^6 \text{ W}}{2429 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right) \cdot 11,76 (\text{°C})}$$

El valor del área de transferencia de calor es:  $A = 106 \text{ m}^2$

Paso 8. Calculo de la velocidad y concentración del producto

$$P_{\text{Real}} = P_{\text{Asumido}} \cdot \frac{A_{\text{Real}}}{A_{\text{Calculada}}} \quad \dots\dots(11)$$

$$P_{\text{Real}} = 2720 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right) \cdot \frac{70 \text{ m}^2}{106 \text{ m}^2}$$

$$P_{\text{Real}} = 1796 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right)$$

luego utilizando la ecuación (4), reemplace el valor obtenido en la ecuación (11), para obtener el valor de  $X_p$

$$F \cdot X_F = P \cdot X_p$$

$$6800 \cdot 0,02 = 1796 \cdot X_p$$

$$X_p = 0,075$$

**Ejercicio 4.**

Recalcúlese el problema 1, esta vez con una presión de 42 KPa en lugar de 102 KPa. Utilice los mismos valores de presión de vapor, área A y coeficiente de transferencia de calor U.

- Determine la nueva capacidad o velocidad de alimentación con estas condiciones. La composición del líquido es la misma de antes
- Determine la nueva composición del producto al aumentar la velocidad de alimentación a 18150 (kg/hr)

**Solución:**

Información entregada:

- Suponga un caudal másico de alimentación:  $F = 5.000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$
- Concentración del líquido diluido:  $x_F = 0,01$
- Concentración del líquido concentrado:  $x_p = 0,08$
- Presión en el espacio interior del evaporador: 42 KPa.
- Presión del vapor que se introduce en el equipo: 140 KPa.
- Temperatura de ingreso del líquido diluido o alimentación:  $T_F = 40^\circ\text{C}$
- Coeficiente de transferencia de calor:  $U = 1700 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right)$
- Ecuación para el cálculo de las Capacidades caloríficas de las soluciones:  
 $C_{p_p} = 0,78 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$        $C_{p_F} = 0,77 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$
- Valor de EPE= 0,75 °C

Paso 1. Para 140 KPa, la temperatura de saturación es 109,27 °C, para 42 KPa, la temperatura de saturación es 76,9 °C de acuerdo con las tablas de vapor respectivamente.

Paso 2. Balance total de materiales y de sólidos para calcular la cantidad de producto concentrado y caudal másico del vapor.

$$\text{Balance total:} \quad F + S = V + P + S_c \quad \dots (1)$$

Como  $S = S_c$ , pero  $S_c$  sale condensado, el balance total queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance total:} \quad F = V + P \quad \dots (2)$$

$$\text{Balance de sólidos: } F \cdot X_F = V \cdot X_V + P \cdot X_P \quad \dots\dots (3)$$

Como la fracción de sólidos en el vapor es igual a cero la ecuación (3) se reduce a la siguiente expresión y con esto reemplazamos los valores conocidos y obtenemos el valor de  $P$ :

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad \dots\dots(4)$$

$$5000 \cdot 0,01 = P \cdot 0,08$$

$$P = 625 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right)$$

si despejamos el valor de  $V$ , de la ecuación (2) tenemos que el valor es el que sigue:

$$V = F - P \quad \dots\dots(5)$$

$$V = (5000 - 625) \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

$$V = 4375 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

Paso 3. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$T_F = 40^\circ C$$

$$T_1 = 77,65^\circ C$$

$$T_S = 109,27^\circ C$$

$$T_{SC} = 109,27^\circ C$$

$$T_P = 77,65^\circ C$$

Paso 4. Cálculo de entalpías  $h$  para las corrientes de vapor con respecto al agua a  $0^\circ C$  como base.

$h_S =$  Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a  $T_S$

$h_V =$  Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a  $T_1$

$h_{SC} =$  Entalpía del vapor que sale condensado a  $T_S$

$$h_S = 2690 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad h_V = 2639 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad h_{SC} = 458 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

Paso 5. Cálculo del vapor de agua requerido por el evaporador realizando un balance de energía.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_S = P \cdot h_P + V \cdot h_V + S \cdot h_{SC} \quad \dots\dots (6)$$

se conoce a  $h_F$  y a  $h_P$ , como las entalpías del líquido diluido y concentrado con las siguientes expresiones:

$$h_F = C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Ref})$$

$$h_P = C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Ref})$$

Luego el balance de energía se expresa con la siguiente ecuación:

$$F \cdot Cp_F \cdot (T_F - T_{Ref}) + S \cdot h_S = P \cdot Cp_P \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot h_V + S_C \cdot h_{S_C} \dots (7)$$

si despejamos la incógnita  $S$ , tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot Cp_P \cdot (T_P - T_{Ref}) + V \cdot h_V - F \cdot Cp_F \cdot (T_F - T_{Ref})}{(h_S - h_{S_C})} \dots (8)$$

si se reemplazan todos los valores antes calculados en la ecuación (8) tenemos que el valor de  $S$  corresponde a

$$S = 5120 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

Paso 6. Cálculo del calor  $q$  transferido en el equipo y área de transferencia de calor.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores de  $q$ , donde  $q$  es el calor transferido por el equipo y  $A$  es el área de transferencia de calor del equipo.

$$q = A \cdot U \cdot (\Delta T) = S \cdot (H_S - H_{S_C}) = S \cdot \lambda_S \dots (9)$$

$$\text{donde } \Delta T = T_S - T_1 \rightarrow \Delta T = 109,27(^{\circ}C) - 77,3(^{\circ}C) \quad \Delta T = 31,97(^{\circ}C)$$

si reemplazamos los valores conocidos en la ecuación (9) el valor de  $q$  es igual a:

$$q = \frac{11427840 \left( \frac{kJ}{hr} \right)}{3600 \text{ (seg)}} = 3174 \left( \frac{kJ}{seg} \right) = 3174 \text{ KW} = 3,17 \times 10^6 \text{ W}.$$

Luego para el cálculo del área solo necesitamos reemplazar este valor en la ecuación siguiente.

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T} \dots (10)$$

$$A = \frac{3,17 \times 10^6 \text{ W}}{1700 \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \cdot 31,97 \text{ K}}$$

El valor del área de transferencia de calor es:  $A = 58,3 \text{ m}^2$

Paso 7. Utilice la ecuación (11) para el cálculo de la velocidad de alimentación y concentración del producto concentrado con una alimentación de 18150 (Kg/hr)

$$F_{Real} = F_{Asumido} \cdot \frac{A_{Real}}{A_{Calculada}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$P_{Real} = 5000 \left( \frac{kg}{hr} \right) \cdot \frac{435 \text{ m}^2}{58,3 \text{ m}^2}$$

$$P_{Real} = 37307 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

b) Luego con la ecuación (4), reemplazamos y obtenemos el valor de  $X_p$ . Suponga

$$P = 625 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad 18150 \cdot 0,01 = 625 \cdot X_P \quad X_P = 0,29$$

### Ejercicio 5

Se está usando un evaporador de efecto simple para concentrar una alimentación de 10.000 (lb/hr) de una solución de azúcar de caña a 80°F que tiene 15°Brix (grados Brix equivale a porcentaje de azúcar en peso) hasta lograr 30°Brix para usarla en un producto alimenticio. Se dispone el vapor saturado a 240°F para el calentamiento. El espacio del vapor en el evaporador está a 1 atmósfera absoluta de presión. El valor total de  $U$  es  $350 \left( \frac{BTU}{hr - pie^2 - ^\circ F} \right)$ , y la capacidad calorífica de la solución de azúcar puede estimarse de:  $C_p \left( \frac{BTU}{lb - ^\circ F} \right) = 1.0 - 0.56x$ . La elevación del punto de ebullición puede estimarse de la siguiente expresión:  $EPE = 3,2x + 11,2x^2$ . Calcular el área de evaporador requerida, el consumo de vapor de agua por hora y la economía de vapor. Nota: trabajar en S.I

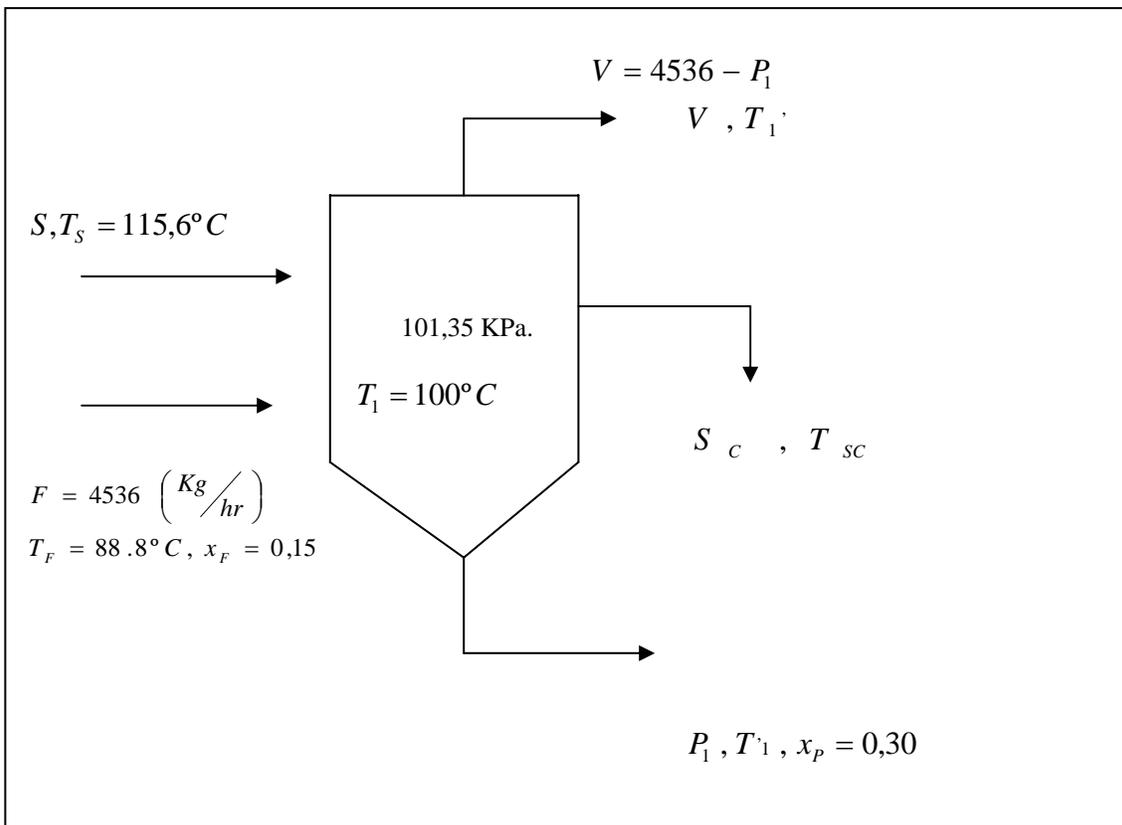


FIGURA 5. Evaporador continuo de efecto simple

Información entregada:

- Flujo másico de alimentación:  $F = 4536 \left( \frac{kg}{hr} \right)$
- Concentración del líquido diluido:  $x_F = 0,15$
- Concentración del líquido concentrado:  $x_p = 0,30$
- Presión en el espacio interior del evaporador: 101,35 KPa.

- Temperatura de ingreso del liquido diluido o alimentación:  $T_F = 88.8\text{ }^\circ\text{C}$
- Coeficiente de transferencia de calor:  $U = 1987,2\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right)$
- Ecuación para el cálculo de las Capacidades caloríficas de las soluciones:

$$C_p = 1.0 - 0.56x$$

### **Solución:**

En la figura (5) se muestra el diagrama de flujo del proceso, siguiendo los pasos descritos los cálculos son los siguientes para responder las interrogantes:

Paso 1 . Para 101.35 KPa, la temperatura de saturación es 100 °C, de acuerdo con las tablas de vapor.

Paso 2. Cálculo de EPE con  $x = 0,3$ , basándose en el método termodinámico para el evaporador utilice la siguiente ecuación:

$$EPE = 3,2x + 11,2x^2$$

$$EPE = 3,2(0,3) + 11,2(0,3)^2$$

$$EPE = 1,97^\circ\text{F} = 3,55^\circ\text{C}$$

luego la temperatura a la salida del equipo es la siguiente:

$$T_1' = T_1 + EPE$$

$$T_1' = 100^\circ\text{C} + 3,55^\circ\text{C}$$

$$T_1' = 103,55^\circ\text{C}$$

Paso 3. Balance total de materiales y de sólidos para calcular la cantidad de producto concentrado y caudal másico del vapor.

$$\text{Balance total:} \quad F + S = V + P + S_c \quad \text{..... (1)}$$

Como  $S = S_c$ , pero  $S_c$  sale condensado, el balance total queda de la siguiente forma:

$$\text{Balance total:} \quad F = V + P \quad \text{..... (2)}$$

$$\text{Balance de sólidos:} \quad F \cdot X_F = V \cdot X_V + P \cdot X_P \quad \text{..... (3)}$$

Como la fracción de sólidos en el vapor es igual a cero la ecuación (3) se reordena y queda de la siguiente manera, luego reemplazamos los valores conocidos y obtenemos el valor de  $P$ :

$$F \cdot X_F = P \cdot X_P \quad \text{.....(4)}$$

$$4536 \cdot 0,15 = P \cdot 0,30$$

$$P = 2268 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

si de la ecuación (2) se despeja la incógnita  $V$ , y se reemplazan los valores que ya conocemos tenemos que:

$$V = F - P \quad \text{.....(5)}$$

$$V = (4536 - 2268) \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

$$V = 2268 \left( \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$$

Paso 4. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$T_F = 88,8^\circ C \quad T_i = 103,55^\circ C$$

$$T_S = 115,6^\circ C \quad T_{SC} = 115,6^\circ C$$

$$T_p = 103,55^\circ C$$

Paso 5. La capacidad calorífica del líquido en el evaporador se calcula con la siguiente expresión:

$$C_p = 1,0 - 0,56x \quad \text{..... (6)}$$

Donde  $x$ , es la fracción de sólidos de los líquidos diluido y concentrado

Para la alimentación

$$C_p = 1,0 - 0,56x \quad \rightarrow \quad C_p = 1,0 - 0,56 \cdot 0,15$$

$$C_p = 0,916 \left( \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ F} \right) \quad \rightarrow \quad C_p = 3,83 \left( \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ C} \right)$$

Para el producto

$$C_p = 1,0 - 0,56x \quad \rightarrow \quad C_p = 1,0 - 0,56 \cdot 0,30$$

$$C_p = 0,832 \left( \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ F} \right) \quad \rightarrow \quad C_p = 3,48 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ C} \right)$$

Paso 6. Cálculo de entalpías  $h$  para las corrientes de vapor con respecto al agua a  $0^\circ C$  como base.

$h_s =$  Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a  $T_s$

$h_v =$  Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a  $T_1'$

$h_{sc} =$  Entalpía del vapor que sale condensado a  $T_1'$

$$h_s = 2670 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad h_v = 2685 \left( \frac{kJ}{kg} \right) \quad h_{sc} = 485 \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

Paso 7. Cálculo del vapor de agua requerido por el evaporador realizando un balance de energía.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_s = P \cdot h_P + V \cdot h_v + S \cdot h_{sc} \dots\dots (7)$$

se conoce a  $h_F$  y a  $h_P$ , como las entalpías del líquido diluido y concentrado con las siguientes expresiones:

$$h_F = C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f}) \quad h_P = C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f})$$

Luego el balance de energía se expresa con la siguiente ecuación:

$$F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f}) + S \cdot h_s = P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f}) + V \cdot h_v + S \cdot h_{sc} \dots\dots (8)$$

si despejamos la incógnita  $S$ , tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{Re f}) + V \cdot h_v - F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{Re f})}{(h_s - h_{sc})} \dots\dots (9)$$

si se reemplazan todos los valores antes calculados en la ecuación (9) tenemos que el valor de  $S$  corresponde a

$$S = 2451 \left( \frac{kg}{hr} \right)$$

Paso 8. Cálculo del vapor  $q$  transferido en el equipo y área de transferencia de calor.

Mediante las siguientes ecuaciones se pueden obtener los valores de  $q$ , donde  $q$  es el calor transferido por el equipo y  $A$  es el área de transferencia de calor del equipo.

$$q = A \cdot U \cdot (\Delta T) = S \cdot (h_s - h_{sc}) = S \cdot \lambda_s \dots\dots (10)$$

$$\text{donde } \Delta T = T_s - T_1' \rightarrow \Delta T = 115,6(^{\circ}C) - 103,55(^{\circ}C) \quad \Delta T = 12,05(^{\circ}C)$$

de la ecuación (10) podemos obtener el valor de  $q$  es igual a:  $q = 1,48 \times 10^6 W$ .

Luego para el cálculo del área solo necesitamos reemplazar este valor en la ecuación siguiente.

$$A = \frac{q}{U \cdot \Delta T} \quad \dots (11)$$

$$A = \frac{1,48 \times 10^6 \text{ W}}{1987,2 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \right) \cdot 12,05 (^\circ \text{C})}$$

El valor del área de transferencia de calor es:  $A = 62 \text{ m}^2$

Paso 9. Cálculo de la economía de vapor ( $E.V$ )

Se entiende por economía de vapor de agua a la relación, existente entre el agua evaporada total y el vapor consumido, entendiéndose entonces como el rendimiento de operación de un sistema de evaporación. Esto en un lenguaje matemático se expresa con la ecuación (12):

$$E.V = \frac{\text{agua evaporada total}}{\text{vapor consumido}} = \frac{V}{S} \left( \frac{\text{Kg agua evaporada}}{\text{Kg de vapor}} \right) \quad \dots (12)$$

$$E.V = \frac{2268}{2451} = 0,92$$