

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.

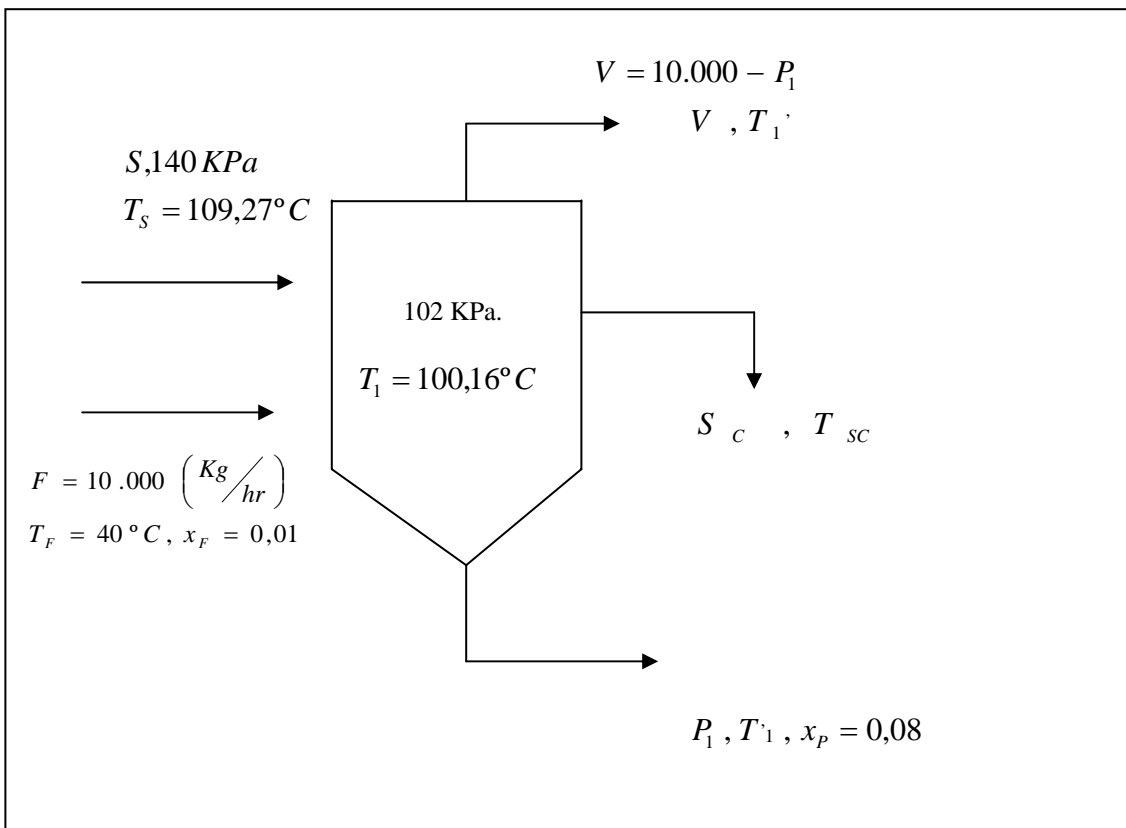


FIGURA 1. Evaporador continuo de efecto simple

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:

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

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.

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

$$x = 1000 \text{ g de solvente}$$

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

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 :

$$T_1 = T_i + EPE$$

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

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 :

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

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

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.

$$T_F = 40^\circ C$$

$$T_1 = 100,91^\circ C$$

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

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

$$T_P = 100,91^\circ C$$

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

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

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

$$h_s = 2690 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

$$h_v = 2677 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

$$h_{sc} = 458 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

$$\text{donde } \Delta T = T_S - T_1' \quad \Delta T = 109,27^\circ C - 100,56^\circ C \quad \Delta T = 8,71^\circ C$$

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:

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

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:

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

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

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

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 m². 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.

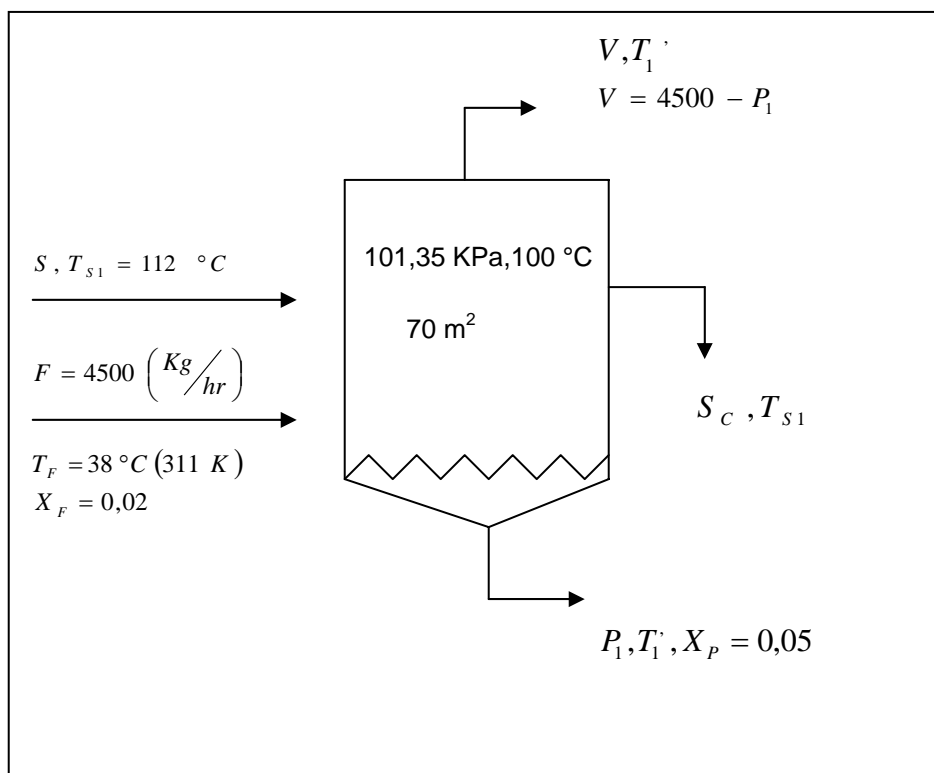


FIGURA 2. Evaporador continuo de efecto simple

Información entregada:

- Flujo másico de alimentación: $4500 \left(\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right)$
- 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: $T_S = 112^\circ\text{C}$

- 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:

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

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 $EPE = 0,45^\circ \text{C}$

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

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

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

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

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

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

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

Paso 6. Cálculo de entalpías h para las corrientes de vapor con respecto al agua a 0°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.

$$F \cdot h_F + S \cdot h_s = P \cdot h_P + V \cdot h_v + S_c \cdot h_{sc} \dots\dots (8)$$

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

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

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

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

si despejamos la incógnita S , tendremos que:

$$S = \frac{P \cdot C_{p_P} \cdot (T_P - T_{ref}) + V \cdot h_v - F \cdot C_{p_F} \cdot (T_F - T_{ref})}{(h_s - h_{sc})} \dots\dots (10)$$

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: $U = 2429 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \right)$

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:

$$\begin{aligned} F \cdot X_F &= P \cdot X_P && \text{.....(4)} \\ 6800 \cdot 0,02 &= P \cdot 0,05 \\ P &= 2720 \left(\frac{g}{hr} \right) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} V &= F - P && \text{.....(5)} \\ V &= (6800 - 2720) \left(\frac{kg}{hr} \right) \\ V &= 4080 \left(\frac{kg}{hr} \right) \end{aligned}$$

Paso 4. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$\begin{aligned} T_F &= 38^\circ C & T_1 &= 100,45^\circ C \\ T_S &= 112^\circ C & T_{SC} &= 112^\circ C \\ T_P &= 100,45^\circ C \end{aligned}$$

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.

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

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

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

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

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

si despejamos la incógnita S , tendremos que:

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

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.

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

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

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

Paso 8. Calculo de la velocidad y concentración del producto

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

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

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

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.

- a) Determine la nueva capacidad o velocidad de alimentación con estas condiciones. La composición del líquido es la misma de antes**
- b) 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:
 $C_{p_P} = 0,78 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad C_{p_F} = 0,77 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$
- 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.

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

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

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

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 con esto reemplazamos los valores conocidos y obtenemos el valor de P :

$$\begin{aligned} F \cdot X_F &= P \cdot X_P & \text{.....(4)} \\ 5000 \cdot 0,01 &= P \cdot 0,08 \\ P &= 625 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \right) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} V &= F - P & \text{.....(5)} \\ V &= (5000 - 625) \left(\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \\ V &= 4375 \left(\frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right) \end{aligned}$$

Paso 3. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$\begin{aligned} T_F &= 40^\circ \text{C} & T_1 &= 77,65^\circ \text{C} \\ T_S &= 109,27^\circ \text{C} & T_{SC} &= 109,27^\circ \text{C} \\ T_P &= 77,65^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Paso 4. Cálculo de entalpías h para las corrientes de vapor con respecto al agua a 0°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.

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

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

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

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

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

si despejamos la incógnita S , tendremos que:

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

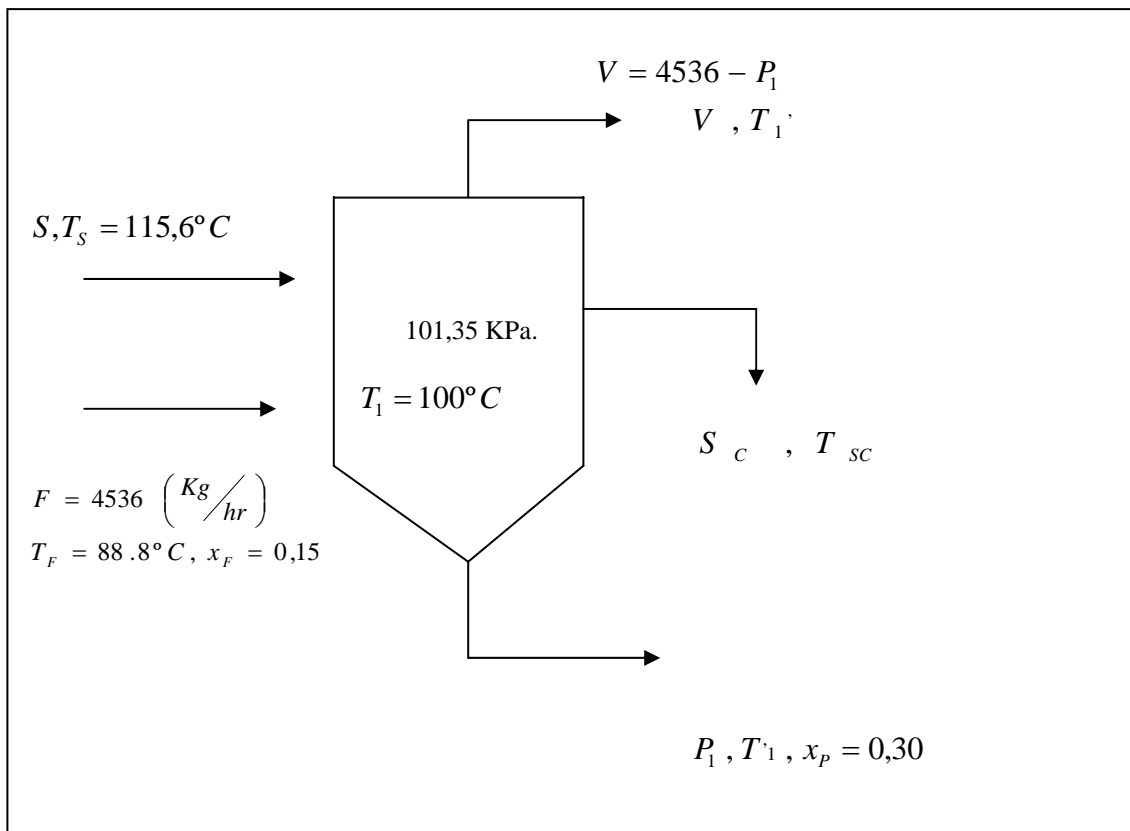


FIGURA 5. Evaporador continuo de efecto simple

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: $T_F = 88.8^\circ\text{C}$
- 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 :

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

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

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

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

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

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

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

Paso 4. Resumen de temperaturas en el equipo.

$$T_F = 88,8^\circ C \quad T_1 = 103,55^\circ C$$

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

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

Paso 5. La capacidad calorífica del liquido 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

$$C_p = 1.0 - 0.56x \quad \rightarrow \quad C_p = 1.0 - 0.56 \cdot 0,15$$

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

Para el producto

$$C_p = 1.0 - 0.56x \quad \rightarrow \quad C_p = 1.0 - 0.56 \cdot 0,30$$

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

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

$h_s = \text{Entalpía del vapor de agua saturado que ingresa al equipo a } T_s$

$h_v = \text{Entalpía del vapor saturado que sale del equipo a } T_1'$

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

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

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

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

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

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

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

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

si despejamos la incógnita S , tendremos que:

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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):

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

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