

## BALANCES TEORICOS DE MATERIA Y ENERGIA

Para ilustración de los cálculos hechos se muestra un balance de materia y energía, tomando como base los valores mínimos y máximos de concentración de las aguas de colas, que se tienen; así como el máximo de flujo de entrada, en condiciones normales de operación del sistema de evaporación de doble efecto con precalentador tubular instalado en la Planta PITXAS, S.A. en el Parque Industrial Guaymas, Sonora.

Se alimentan 3600 lts/Hr de agua de cola a una concentración de 7% de sólidos y se concentran hasta 50%.

Haciendo un balance global de materia se puede calcular la velocidad total de evaporación así como también el flujo de concentrado.

Considerando la densidad del agua de cola a la del agua, se tiene:

$$3600 \text{ lts/Hr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ lts}} = 3600 \text{ kg/Hr}$$

$$\text{Sólidos} = (3600 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}}) (0.07) = 252 \text{ kg/Hr}$$

## Velocidad de Flujo kg/Hr

Material	Total	Sólidos	Agua
Alimentación de agua de cola	3600	252	3348
Solución Concentrada	504	252	252
Agua Evaporada	3096		3096

Para conocer el consumo de vapor vivo, se desarrollan los balances de energía como siguen:

EFEECTO I

$$q_1 = m_s \lambda_s = (m_f - m_1) \lambda_1 + m_f C_{pf} (T_1 - T_f) \quad \text{Ec. (1)}$$

EFEECTO II

$$q_2 = (m_f - m_1) \lambda_1 = (m_1 - m_2) \lambda_2 + m_1 C_{pl} (T_2 - T_1) \quad \text{Ec. (2)}$$

$m_f$  = Velocidad de flujo de alimentación, kg/Hr

$m_s$  = Velocidad de flujo del vapor vivo, kg/Hr

$m_1$  y  $m_2$  = Velocidad de flujo de las soluciones que salen de los efectos I y II, kg/Hr.

$\lambda_s$  = Calor latente del vapor vivo, kcal/kg

$\lambda_1$  y  $\lambda_2$  = Calores latentes de vaporización en los efectos I y II kcal/kg

$T_f$  = Temperatura de la alimentación, °C

$T_s$  = Temperatura de condensación del vapor vivo, °C

$T_1$  ,  $T_2$  = Temperaturas de ebullición en los efectos I y II, °C

$C_{pf}$  = Calor específico de la alimentación,  $\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$

$C_{p1}$  y  $C_{p2}$  = Calores específicos de las soluciones que salen de los efectos I y II,  $\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$

$q_1$  ,  $q_2$  = Velocidades de transmisión de calor en los efectos I y II,  $\frac{\text{kcal}}{\text{Hr}}$

#### Temperaturas y Calores Latentes del caso Teórico

Concepto	Temp. °C	Calor Latente kcal/kg	Flujo kg/Hr
Vapor vivo	153 = $T_s$	502 = $\lambda_s$	$M_s$
Alimentación a I	90 = $T_f$		$m_f = 3600$
Concentrado de I vapor a II	134 = $T_1$	516 = $\lambda_1$	$m_1$
Concentrado de II	100 = $T_2$	538.7 = $\lambda_2$	$m_2 = 504$

Sustituyendo en la ecuación 1 y 2 y tomado el calor específico del agua de cola igual al del agua.

EFEECTO I;

$$q_1 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}} \right) = m_s \left( 502 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = \left( 3600 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} - m_1 \right) 516 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \\ + \left( 3600 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} \right) \left( 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (134 - 90) ^\circ\text{C}$$

EFEECTO II;

$$q_2 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}} \right) = \left( 3600 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} - m_1 \right) 516 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = \left( m_1 - 504 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} \right) \\ \left( 538.7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) + m_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (100 - 134) ^\circ\text{C}$$

$$1,857,600 \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}} - 516 m_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 538.7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} - 271,504.8 \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}} \\ - 34 m_1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$1020.7 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} m_1 = 2,129,104.8 \text{ kcal/Hr}$$

$$m_1 = 2085.9 \text{ kg/Hr}$$

$$502 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} m_s = 781275.6 \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}} + 158,900 \frac{\text{kcal}}{\text{Hr}}$$

$$m_s = \frac{939675.6 \text{ kcal/Hr}}{502 \text{ kcal/kg}} = 1871.86 \text{ kg/Hr}$$

$$m_s = 1872 \text{ kg/Hr vapor utilizado para evaporar } 3096 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} \text{ de agua.}$$

Balance en el Precalentador.- El agua de cola se precalienta antes de entrar al primer efecto, de 60 a 90°C en un precalentador espiral utilizando como medio de calefacción los condensados del segundo efecto, y de 90 a 120°C, aproximadamente, en un precalentador tubular donde se usa vapor saturado como-

medio de calefacción. Se hicieron balances en el precalentador tubular con el fin de conocer la cantidad de vapor utilizado para elevar la temperatura del agua de cola de la siguiente manera:

$$m_s \lambda_s = m_f (c_f) (T_{f2} - T_{f1}) \quad \text{Ec. (3)}$$

$m_f$  = Velocidad de flujo de la solución, kg/Hr

$m_s$  = Velocidad de flujo del vapor, kg/Hr

$\lambda_s$  = Calor latente de vaporización, kcal/kg

$T_{f1}$ ,  $T_{f2}$  = Temperatura de la solución a la entrada y a la salida del precalentador, °C

$c_f$  = Calor específico de la solución, kcal/kg °C

Ejemplo de un caso real precalentando el agua de colas.

Balance en el precalentador:

Alimentando 3,856 lts/Hr de agua de colas con 8% de sólidos, tomando la densidad de la tabla V tenemos:

$$(3856 \text{ lts/Hr}) (1,002 \text{ kg/lts}) = 3864 \text{ kg/Hr}$$

$m_f = 3864 \text{ kg/Hr}$

$T_{f1} = 90^\circ\text{C}$

$$T_{f2} = 120^{\circ}\text{C}$$

$$= 492 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

sustituyendo en la ecuación (3), y tomando los calores específicos de la tabla VI tenemos:

$$m_s \left( 492 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = (3864 \text{ kg/Hr}) \left( 0.93 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right) (120-90)^{\circ}\text{C}$$

$$\underline{m_s = 219 \text{ kg/Hr}}$$

De donde obtenemos que se están utilizando 219 kg/Hr de vapor para precalentar el agua de cola de 90 a 120°C.

Balance en el evaporador.

Concepto	Temp. °C	Calor latente kcal/kg
Vapor vivo	148	502
Temperatura de Alimentación	120	
Concentrado de I	142	510
Concentrado de II	122	523

obteniendo 617 lts/Hr de concentrado de 46% de sólidos con una alimentación del agua de cola de 8% de sólidos se tiene:

$$(617 \text{ lts/Hr}) (1.09 \text{ kg/lts}) = 672. \text{ kg/Hr}$$

La densidad fué tomada de la Tabla VI.

Haciendo un balance de masa

$$(672 \text{ kg/Hr}) (0.46) = (X) (0.08); X = 3864 \text{ kg/Hr de agua de cola.}$$

$$\text{Agua Evaporada} = 3864 - 672 = 3192 \text{ kg/Hr}$$

Sustituyendo en las ecuaciones 1 y 2

$$q_1 = m_s \left( 502 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = \left( 3864 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} - m_1 \right) 510 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} + 3864 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} \left( 0.93 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \right) (142 - 120) ^\circ\text{C}$$

$$q_1 = \left( 3864 \frac{\text{kg}}{\text{Hr}} - m_1 \right) 510 \text{ kcal/kg} = (m_1 - 672 \text{ kg/Hr}) 523 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} + m_1 \left( 0.90 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \right) (122 - 142) ^\circ\text{C}$$

Resolviendo y tomando los Cp de la Tabla IV se obtuvo:

$$m_s = 2288 \text{ kg/Hr de vapor utilizado para evaporar } 3192 \text{ kg/Hr de agua}$$

en total se utilizan 3411 kg/Hr de vapor.

#### Plan de Experimentación.

Es conocido que en el proceso de evaporación inter<sub>u</sub> vienen las siguientes variables: Presión, temperatura, flujo y concentración. En este caso la experimentación se limitará a dos variables: Temperatura y Flujo, debido a que se puede tener control sobre ellas, además la concentración se mantendrá constante a la entrada y a la salida. La experimentación se realizará de acuerdo a la técnica de optimización EVOP-SSD.

(Operaciones Evolucionarias Autodirigidas Simplex), por ser uno de los métodos mas sencillos y prácticos que pueden usarse en este caso; para iniciarla se tomaron como referencia datos de operación de la misma planta así como de la misma técnica (7).

El equipo que se usará para llevar a cabo la experimentación es un sistema de evaporación de doble efecto, instalado en la Planta PITXAS, S.A. en Guaymas, Sonora, descrito anteriormente.

#### Metodología del Trabajo.

El agua de cola que se utilizó en las corridas experimentales se tomó de las extracciones efectuadas en la misma planta con una concentración del 7 al 9% de sólidos, conservándose en buenas condiciones.

El medio de calefacción utilizado fué vapor producido en la misma planta por dos unidades de calderas de 300 y 150 H.P. La experimentación aquí reportada se realizó bajo las siguientes condiciones: La concentración a la salida del segundo efecto se fijó entre 46-48% de sólidos, por ser esta concentración la adecuada para usar los concentrados de solubles de pescado, además se observó en la Tabla V y Bibliografía revisada que a mayores concentraciones la solución es muy viscosa, lo que hace que no haya buena transferencia de calor en el equipo. También se tomaron en cuenta las concentracio-

nes de entrada al evaporador que estaban entre 7-9% de sólidos.

La presión de entrada del vapor se controló con el controlador de presión PC-1 que es el que va directamente al primer efecto.

La temperatura de entrada del agua de cola se varió, haciéndose varias corridas; utilizando el precalentador espiral unicamente, y utilizado el precalentador espiral y tubular juntos, para precalentar la solución. La solución se alimenta al sistema de evaporación con una presión de 8.5 a 9 kg/cm<sup>2</sup>.

El flujo de concentrado de solubles de pescado se midió a la salida del segundo efecto: Al estabilizar el sistema se estuvo midiendo y controlando la concentración de la solución hasta 46-47% de sólidos. Ya estabilizada se midió en tanques de 200 lts tomando el tiempo de llenado, ésto se hizo algunas veces para cada corrida hasta obtener un flujo constante.

Se hicieron algunas corridas variando la temperatura del agua de cola, precalentándose ésta a una temperatura usando el precalentador espiral, y se aumenta la temperatura utilizando, además del precalentador espiral, el precalentador tubular.

La técnica utilizada para realizar el trabajo fué la ilustrada en la Fig. 3.

- a) Se llenan las botellas de los evaporadores hasta un nivel determinado de agua de cola, utilizando la bomba de alimentación.
- b) Se purgan las líneas de vapor de la caldera al sistema de evaporación y se empieza a alimentar vapor al aparato según la corrida que se trate.
- c) Se purga el condensado del primer efecto al desagüe y ya que está limpio se bombea el condensado a la caldera.
- d) Ya que está controlado el vapor se abren las válvulas de entrada y salida de las aguas de cola del intercambiador espiral y del intercambiador tubular, para aumentar la temperatura de la solución a la entrada del evaporador.
- e) Se controlan los niveles de agua de cola en el primer y segundo efectos con los controladores de nivel LC-1 y LC-2.
- f) Cuando la circulación del agua de cola es continua, o sea que la evaporación es constante se abren las válvulas de entrada y salida del condensado del precalentador espiral.

- g) Se chequean las concentraciones de entrada y salida de la solución, hasta obtener y mantener la concentración deseada, se abren las válvulas de salida del efecto No. 2 y se arranca el motor de la bomba de salida del concentrado (13).
- h) Se alimenta vapor al precalentador tubular. Cuando ya se está produciendo concentrado se controla el vapor de entrada con PC-1 a la presión indicada por la corrida, para mantener la concentración constante.
- i) Una vez que se ha estabilizado la temperatura y la presión en cada efecto; éstas, dependiendo de la corrida que se trate, y que se esté produciendo concentrado a la concentración deseada, se tomaron lectura de los datos de presión y temperatura en cada efecto, en la cámara de vapor y en la cámara de agua de cola, también se midió el flujo de concentrado a la salida del segundo efecto; las concentraciones a la entrada y a la salida del sistema de evaporación. Así como también se tomaron lectura de la temperatura del agua de cola en todo el sistema. Estas lecturas se hicieron por lo menos una cada

hora.

Esta técnica es general para todas las corridas. En base a la técnica de optimización utilizada (7), se determinaron las condiciones de 4 corridas, las cuales se llevaron a la práctica de acuerdo a la técnica antes citada. Las otras corridas fueron hechas con las variaciones que permitía el aparato. Con los datos obtenidos de cada corrida por medio de balances de materia y energía se obtuvo la cantidad de vapor requerida para cada flujo como se puede ver en la Tabla VII.

Los datos reportados en esta Tabla VII y en la Tabla VIII son lecturas que se tomaron directamente del evaporador como las temperaturas de entrada del vapor y del agua de cola, las concentraciones a la entrada y a la salida del aparato, el flujo de entrada del agua de cola se obtuvo por balances ya que se conocía solo el flujo de salida del concentrado. El agua evaporada y el vapor requerido se obtuvieron de los balances.