

# PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE UNA ESTACIÓN EVAPORADORA DE MÚLTIPLE EFECTO CON CIRCULACIÓN FORZADA

Ing. Javier Díaz Pineda <sup>1</sup>, Dr.C. Yoney López Hervis <sup>2</sup>

1, 2. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”,  
Vía Blanca Km.3, Matanzas, Cuba. [javier.pineda@umcc.cu](mailto:javier.pineda@umcc.cu)

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para la evaluación de una estación evaporadora de múltiple efecto con circulación forzada, que se emplea en la concentración de puré de tomate en la UEB Combinado Industrial “Héroes de Girón”. Con el propósito de conocer los requerimientos de calor del sistema a través de balances de masa y energía, el área de transferencia de calor en cada efecto, las pérdidas térmicas por elevación del punto de ebullición en los mismos; así como la capacidad y economía de evaporación del múltiple efecto. Esta propuesta metodológica permitirá reunir varias herramientas necesarias para evaluar el funcionamiento de este tipo de equipo, imprescindible en los procesos de producción actuales de la Industria Química.

*Palabras claves:* Evaporadores; Múltiple efectos; Circulación forzada; Puré de tomate.

---

## Cuerpo de la monografía

Muñoz (2016), refiere que en la literatura, varios autores han propuesto diversas metodologías para la evaluación y diseño de evaporadores de múltiple efecto con circulación forzada. Por lo general, estos métodos son de dos tipos: los cortos o aproximados (Anaya-Durand, 1996) y los detallados (Pavlov, 1981; Kern, 1999; McCabe *et al.*, 2007). Los primeros son métodos en los que se estiman las variables y parámetros más importantes del sistema y son utilizados, por lo general, para efectuar comparaciones económicas entre alternativas de diseño. Los otros son métodos basados en balances rigurosos de materia y energía, que se utilizan para el diseño conceptual de sistemas de evaporación. Estos últimos métodos esencialmente son de prueba y error, según el procedimiento que se indica a continuación:



1. Se suponen valores para las temperaturas de ebullición, en los efectos en donde no se conocen, generalmente del primero al penúltimo efecto.
2. Se aplican los balances de materia y energía para calcular los flujos y composiciones en el sistema.
3. Se calcula el área de transferencia de calor requeridas en cada efecto.
4. Si estas superficies de calentamiento, no son aproximadamente iguales, se estiman nuevos valores para las temperaturas de ebullición y se repiten los cálculos de los puntos 2 y 3 hasta que las áreas sean iguales.

Este procedimiento presenta varias desventajas, puesto que se requiere hacer una buena estimación en la primera etapa, para evitar un número excesivo de iteraciones en la resolución del problema. Además, los cálculos de los balances de energía se hacen muy complejos si la disolución a concentrar presenta elevación en el punto de ebullición (EPE). Esto es debido a que en el paso número uno, además de estimar la distribución de temperaturas en el sistema, se debe tomar en cuenta también las EPE en cada efecto (Geankoplis, 2006).

Sin embargo, para poder calcular con exactitud los valores de estas EPE, es necesario conocer las concentraciones exactas en cada efecto. Esto no es posible debido a que los balances de materia del paso dos, se obtienen de los valores supuestos en el paso uno; esto provoca que la convergencia de la solución sea más difícil. Debido a todo lo anterior, generalmente se simplifica el problema considerando que las EPE son despreciables, lo que causa un error considerable en la solución final (Geankoplis, 2006).

Pavlov (1981), considera que para realizar la evaluación de una estación evaporadora de múltiple efecto con circulación forzada, es necesario conocer los requerimientos de calor del sistema, la distribución de temperaturas y presiones, el área de intercambio de calor en cada efecto, así como la capacidad y economía de evaporación del sistema. Para ello, propone una metodología de cálculo para la determinación de estas y otras variables, como se muestra a continuación:

1. Determinar la cantidad total de agua a evaporar en el sistema.
2. Determinar la cantidad de agua evaporada en cada efecto y las concentraciones a la salida de cada vaso.
3. Determinar la caída de presión de la estación evaporadora.
4. Realizar la distribución de presiones en cada efecto para determinar las temperaturas de saturación del vapor secundario.
5. Determinar las pérdidas térmicas producidas a partir de la EPE.

6. Determinar la diferencia total de temperatura y la diferencia útil de la estación evaporadora.
7. Determinar la temperatura de ebullición real de la disolución en cada efecto.
8. Determinar los coeficientes de transmisión de calor en cada efecto.
9. Determinar la cantidad de vapor primario que se necesita en el primer efecto.
10. Determinar la carga térmica y los coeficientes globales de transferencia de calor.
11. Determinar el área de transferencia de calor de cada cuerpo y del sistema.

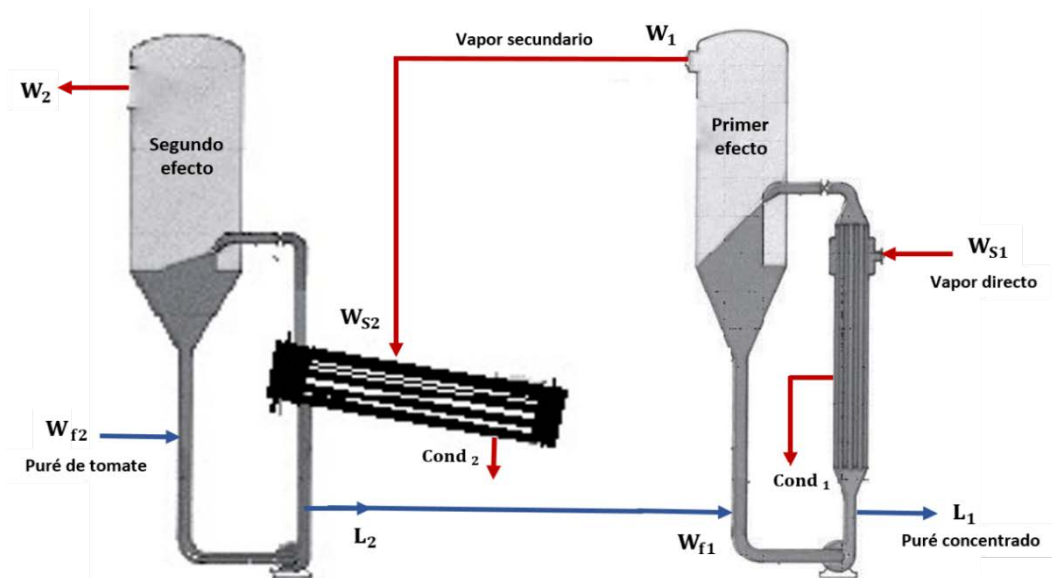
McCabe *et al.* (2007), plantea que en el diseño de un evaporador de múltiple efecto, los resultados generalmente deseados son la cantidad de vapor de agua consumido, el área de la superficie de calentamiento que se requiere, las temperaturas aproximadas en los distintos efectos y la cantidad de vapor que abandona el último efecto. Lo mismo que en un evaporador de simple efecto, estos valores se obtienen a partir de balances de masa y energía. Sin embargo, en un evaporador de múltiple efecto se utiliza un método de aproximaciones sucesivas en vez de una solución algebraica directa.

### **Metodología para la evaluación de la estación evaporadora de múltiple efecto con circulación forzada**

Para efectuar la evaluación de la estación evaporadora de efecto múltiple con circulación forzada, se propone la metodología de cálculo que se plantea a continuación; con el propósito de conocer los requerimientos de calor del sistema, la superficie de intercambio de calor en cada efecto, las pérdidas térmicas por elevación del punto de ebullición; así como la capacidad y economía de evaporación del sistema.

### **Balances de masa y energía en la estación evaporadora**

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para la realización de los balances de masa y energía en la estación evaporadora, con el objetivo de determinar los flujos desconocidos que intervienen en el proceso. En la figura 1.1, se muestra el diagrama de la estación evaporadora.



**Figura 1.1.** Diagrama de la estación evaporadora de doble efecto con circulación forzada.

**Fuente:** Elaboración propia.

Balance de masa total en el primer efecto del evaporador:

$$W_{f1} = L_1 + W_1 \quad (1.1)$$

Balance de masa por componentes en el primer efecto del evaporador:

$$W_{f1} \cdot Bx_{f1} = L_1 \cdot Bx_{L1} \quad (1.2)$$

Donde:

$W_{f1}$ : Flujo másico de puré de tomate a la entrada del primer efecto, [kg/h].

$W_1$ : Flujo másico de agua evaporada en el primer efecto, [kg/h].

$L_1$ : Flujo másico de puré de tomate a la salida del primer efecto, [kg/h].

$Bx_{f1}$ : Composición másica de puré de tomate a la entrada del primer efecto, [%].

$Bx_{L1}$ : Composición másica de puré de tomate concentrado a la salida del primer efecto, [%].

Balance de masa total en el segundo efecto del evaporador:

$$W_{f2} = L_2 + W_2 \quad (1.3)$$

Balance de masa por componentes en el segundo efecto del evaporador:

$$W_{f2} \cdot Bx_{f2} = L_2 \cdot Bx_{L2} \quad (1.4)$$

Donde:

$W_{f2}$ : Flujo másico de puré de tomate a la entrada del segundo efecto, [kg/h].

$L_2$ : Flujo másico de puré de tomate a la salida del segundo efecto, [kg/h].

$W_2$ : Flujo másico de agua evaporada en el segundo efecto, [kg/h].

$Bx_{f2}$ : Composición másica de puré de tomate a la entrada del segundo efecto, [%].

$Bx_{L2}$ : Composición másica de puré de tomate concentrado a la salida del segundo efecto, [%].

Para determinar la cantidad de agua que se evapora en cada uno de los cuerpos del evaporador de múltiple efectos, se combinan las ecuaciones de balance de masa total y por componentes para cada efecto, dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$W_1 = W_{f1} \cdot \left(1 - \frac{Bx_{f1}}{Bx_{L1}}\right) \quad (1.5)$$

$$W_2 = W_{f2} \cdot \left(1 - \frac{Bx_{f2}}{Bx_{L2}}\right) \quad (1.6)$$

El flujo de puré de tomate concentrado a la salida de cada efecto del evaporador, se obtiene despejando  $L_1$  y  $L_2$  en las ecuaciones (1.1) y (1.3) respectivamente. El valor del flujo másico de puré de tomate a la entrada del primer efecto va a ser igual al flujo másico de puré de tomate a la salida del segundo efecto ( $W_{f1} = L_2$ ). Así como el valor del flujo másico de agua evaporada en el primer efecto va a ser igual al flujo másico de vapor secundario utilizado por el segundo efecto ( $W_1 = W_{S2}$ ).

A continuación, se muestra el balance de energía realizado al primer efecto del evaporador:

$$W_{S1} \cdot \lambda_{S1} = W_{f1} \cdot Cp_{f1} \cdot (T_{b1} - T_{b2}) + W_1 \cdot \lambda_1 \quad (1.7)$$

Como se puede apreciar en la ecuación anterior, el calor cedido por el agente de calentamiento (vapor saturado) debe ser suficiente para elevar la temperatura de la alimentación hasta la temperatura de ebullición y además producir vapor secundario.

Según Kern (1999), los evaporadores químicos presentan entre 3 – 5 % de pérdidas de calor respecto a la cantidad de calor absorbido por la disolución. En los cálculos para el primer efecto del evaporador caso de estudio, se considera un 3% de pérdidas de calor al medio.

$$W_{S1} \cdot \lambda_{S1} = 1.03 \cdot [W_{f1} \cdot Cp_{f1} \cdot (T_{b1} - T_{b2}) + W_1 \cdot \lambda_1] \quad (1.8)$$

Donde:

$\lambda_{S1}$ : Calor latente de vaporización del vapor directo, [kJ/kg]. Se determina a la presión de saturación del vapor directo (absoluta).

$T_{b1}$ : Temperatura de ebullición del puré de tomate en el primer efecto, considerando la elevación del punto de ebullición, [°C]. Su valor se obtiene a partir de la ecuación (1.9).

$$T_{b1} = T_{sat(1)} + EPE_1 \quad (1.9)$$

$T_{sat(1)}$ : Temperatura de saturación del agua, [°C]. Se determina a la presión de operación del primer efecto del evaporador (absoluta).

$EPE_1$ : Elevación del punto de ebullición de la disolución en el primer efecto del evaporador, [°C].

$T_{b2}$ : Temperatura de ebullición del puré de tomate en el segundo efecto, considerando la elevación del punto de ebullición, [°C]. Su valor se obtiene a partir de la ecuación (1.10).

$$T_{b2} = T_{sat(2)} + EPE_2 \quad (1.10)$$

$EPE_2$ : Elevación del punto de ebullición de la disolución en el segundo efecto del evaporador, [°C].

$T_{sat(2)}$ : Temperatura de saturación del agua, [°C]. Se determina a la presión de operación del segundo efecto del evaporador (absoluta).

$Cp_{f1}$ : Calor específico del puré de tomate en el primer efecto, [kJ/kg°C].

$\lambda_1$ : Calor latente de vaporización del agua evaporada considerando la elevación del punto de ebullición, [kJ/kg]. Su valor se obtiene a partir de la ecuación (1.11).

$$\lambda_1 = \lambda_{op} + Cp_{vapor} \cdot EPE_1 \quad (1.11)$$

Donde:

$\lambda_{op}$ : Calor latente de vaporización del agua evaporada a la presión de operación del primer efecto, [kJ/kg].

$C_{p_{vapor}}$ : Calor específico del agua evaporada a la presión de operación del primer efecto, [kJ/kg°C].

Para determinar el calor específico del puré de tomate ( $C_{p_{f1}}$ ), se emplea la ecuación (1.12) propuesta por Choi y Okos (1986), que se encuentra en función de la concentración de sólidos solubles y la temperatura de la disolución.

$$C_p = C_{p_w} \cdot (1 - X_S) + C_{p_S} \cdot X_S \quad (1.12)$$

Donde:

$$C_{p_w} = 4.1878 - 0.000745 \cdot T + 0.000009859 \cdot T^2 \quad (1.13)$$

$$C_{p_S} = 1.5785 + 0.01096 \cdot T + 0.00002163 \cdot T^2 \quad (1.14)$$

$C_{p_w}$ : Calor específico del agua presente en el puré de tomate, [kJ/kg°C].

$C_{p_S}$ : Calor específico de los sólidos solubles presentes en el puré de tomate, [kJ/kg°C].

$X_S$ : Fracción másica de sólidos solubles en el puré de tomate (°Brix).

$T$ : Temperatura media del puré de tomate entre  $T_{b1}$  y  $T_{b2}$ , [°C].

El consumo de vapor directo en el primer efecto del evaporador, puede ser calculado despejando  $W_{S1}$  en la ecuación (1.8).

$$W_{S1} = \frac{1.03 \cdot [W_{f1} \cdot C_{p_{f1}} \cdot (T_{b1} - T_{b2}) + W_1 \cdot \lambda_1]}{\lambda_{S1}} \quad (1.15)$$

### **Cálculo de las pérdidas térmicas por elevación del punto de ebullición**

La presión de vapor de la mayoría de las disoluciones acuosas, es menor que la del agua a la misma temperatura. Por tanto, para una presión dada, la temperatura de ebullición de las disoluciones es mayor que la del agua pura. Cuando se trabaja con disoluciones diluidas el punto de ebullición de estas es cercano al del agua pura, y se puede obtener su valor en función de la presión en las tablas de vapor. Pero si se trata de disoluciones concentradas el punto de

ebullición aumenta. El incremento del punto de ebullición con respecto al del agua, se conoce con el nombre de elevación del punto de ebullición de la disolución (EPE) (Geankoplis, 2006; Berk, 2013).

La elevación del punto de ebullición (EPE) de la disolución de puré de tomate que se concentra en cada uno de los efectos del evaporador, se calcula a partir de la ecuación (1.16).

$$EPE = EPE_{\text{concentración}} + EPE_{\text{hidrodinámica}} + EPE_{\text{hidrostática}} \quad (1.16)$$

Donde:

$EPE_{\text{concentración}}$ : Elevación del punto de ebullición debido a la concentración de la disolución, [°C].

$EPE_{\text{hidrodinámica}}$ : Elevación del punto de ebullición producto a la hidrodinámica del fluido, [°C].

$EPE_{\text{hidrostática}}$ : Elevación del punto de ebullición debido al efecto de la presión hidrostática, [°C].

La  $EPE_{\text{hidrodinámica}}$  es un incremento de la temperatura ocasionado por la fricción resultante de la circulación del fluido. Producto a que esta pérdida es casi imposible de determinar, Kern (1999) considera que para evaporadores químicos los valores se encuentran entre 1 – 1,5 °C. Para la evaluación del evaporador de circulación forzada se considerará una  $EPE_{\text{hidrodinámica}} = 1,3$  °C.

Para calcular la  $EPE_{\text{concentración}}$  se emplea la ecuación (1.17).

$$EPE_{\text{concentración}} = T_{\text{eb (puré tomate)}} - T_{\text{eb (agua pura)}} \quad (1.17)$$

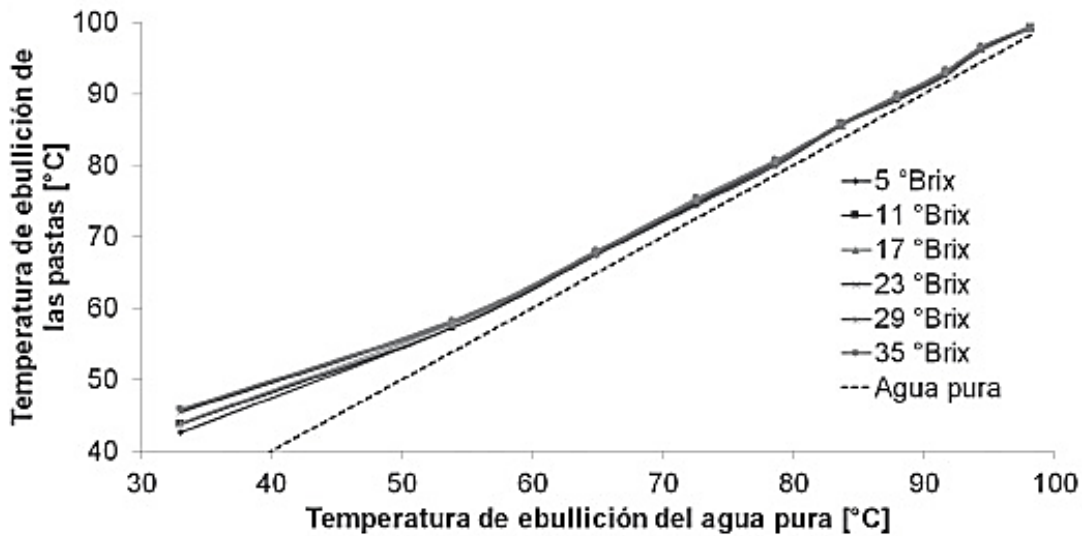
Donde:

$T_{\text{eb (puré tomate)}}$ : Temperatura de ebullición del puré de tomate, [°C].

$T_{\text{eb (agua pura)}}$ : Temperatura de ebullición del agua pura a la presión de operación del efecto del evaporador, [°C].

Con la temperatura de ebullición del agua pura y la concentración de sólidos solubles en el puré de tomate, se obtiene la  $T_{\text{eb (puré tomate)}}$  a partir del diagrama de *Dühring* para pastas de tomate que se muestra en la figura 1.2, propuesto por Ortega *et al.* (2015).





**Figura 1.2.** Diagrama de *Dühring* para pastas de tomate a diferentes concentraciones. Fuente: Ortega *et al.*, 2015.

El valor de la  $EPE_{hidrostática}$  se puede obtener a partir de la ecuación (1.18) y su efecto solamente se tendrá en cuenta en el primer efecto, puesto que es el único que se encuentra dispuesto de forma vertical.

$$EPE_{hidrostática} = T_m - T_{eb} \quad (1.18)$$

Donde:

$T_{eb}$ : Temperatura de ebullición del agua a la presión de operación del efecto ( $P_s$ ), [°C].

$T_m$ : Temperatura de ebullición del agua a la presión en la capa media del líquido ( $P_m$ ), [°C].

La presión en la capa media del líquido se calcula a partir de la ecuación (1.19).

$$P_m = P_s + \Delta P_h \quad (1.19)$$

Donde:

$P_s$ : Presión de saturación del vapor en el efecto del evaporador, [MPa].

$\Delta P_h$ : Caída de presión hidrostática, [MPa]. Se calcula a partir de la ecuación (1.20).

$$\Delta P_h = \rho \cdot g \cdot H_m \quad (1.20)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad de la disolución (puré de tomate), [kg/m<sup>3</sup>].

Hm: Altura desde el nivel superior del líquido en el evaporador hasta el centro de la superficie de calentamiento bañada por el líquido, [m]. Para la evaluación del evaporador se utiliza 0,7 m.

g: Constante de aceleración de la gravedad, [9,8 m/s<sup>2</sup>].

Para determinar la densidad del puré de tomate ( $\rho$ ), se utiliza la ecuación (1.21) propuesta por Choi y Okos (1986), que depende de los valores de concentración de los sólidos solubles y la temperatura de la disolución.

$$\rho = \rho_w \cdot (1 - X_S) + \rho_S \cdot X_S \quad (1.21)$$

Donde:

$$\rho_w = 999.89 - 0.06033 \cdot T - 0.003671 \cdot T^2 \quad (1.22)$$

$$\rho_S = 1469.3 + 0.5467 \cdot T - 0.06965 \cdot T^2 \quad (1.23)$$

$\rho_w$ : Densidad del agua presente en el puré de tomate, [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_S$ : Densidad de los sólidos solubles presentes en el puré de tomate, [kg/m<sup>3</sup>].

$X_S$ : Fracción másica de sólidos solubles en el puré de tomate (°Brix).

T: Temperatura de ebullición de la disolución de puré de tomate, [°C].

### **Determinación del área de transferencia de calor de la estación evaporadora**

La superficie de calentamiento del evaporador de múltiple efectos ( $A_{TC}$ ), se determina utilizando la ecuación (1.24).

$$A_{TC} = A_1 + A_2 \quad (1.24)$$

Donde:

$A_1$ : Área de transferencia de calor del primer efecto, [m<sup>2</sup>].

$A_2$ : Área de transferencia de calor del segundo efecto, [m<sup>2</sup>].

Para calcular el área de transferencia de calor en el primer efecto del evaporador se emplea la ecuación (1.25).

$$A_1 = \frac{W_{S1} \cdot \lambda_{S1}}{U_{D(1)} \cdot (T_S - T_{b1})} \quad (1.25)$$

Donde:

$W_{S1}$ : Flujo másico de vapor directo consumido por el primer efecto, [kg/h].

$U_{D(1)}$ : Coeficiente global de transferencia de calor de operación del primer efecto, [W/m<sup>2</sup> °C]. Este valor fue suministrado por el Departamento de Diseño e Ingeniería de la compañía FBR – ELPO, Parma, Italia a partir de ensayos realizados en sus instalaciones para puré concentrado de tomate.

$\lambda_{S1}$ : Calor latente de vaporización del vapor directo, [kJ/kg].

$T_S$ : Temperatura de saturación del vapor directo, [°C]. Se determina a la presión de saturación del vapor directo (absoluta).

$T_{b1}$ : Temperatura de ebullición del puré de tomate en el primer efecto, considerando la elevación del punto de ebullición, [°C].

El área de transferencia de calor en el segundo efecto del evaporador, se calcula a través de la ecuación (1.26).

$$A_2 = \frac{W_{S2} \cdot \lambda_{S2}}{U_{D(2)} \cdot (T_{b1} - T_{b2})} \quad (1.26)$$

Donde:

$W_{S2}$ : Flujo másico de vapor secundario consumido por el segundo efecto, [kg/h].

$U_{D(2)}$ : Coeficiente global de transferencia de calor de operación del segundo efecto, [W/m<sup>2</sup> °C]. Este valor fue suministrado por el Departamento de Diseño e Ingeniería de la compañía FBR – ELPO, Parma, Italia a partir de ensayos realizados en sus instalaciones para puré concentrado de tomate.

$\lambda_{S2}$ : Calor latente de vaporización a la presión del vapor secundario proveniente del primer efecto, [kJ/kg].

$T_{b2}$ : Temperatura de ebullición del puré de tomate en el segundo efecto, considerando la elevación del punto de ebullición, [°C].

### Determinación de la capacidad y economía de evaporación

La capacidad de un evaporador, se define como el número de kilogramos de agua evaporados por unidad de tiempo. La economía, por lo contrario, es el número de kilogramos de agua evaporada en todos los efectos por kilogramos de vapor primario utilizado. En los sistemas de múltiple efecto se consigue una gran economía, dado que la variación de la entalpía de vaporización al pasar de un efecto a otro es muy pequeña, cuando se condensa un kilogramo de vapor de calefacción, se evapora en la disolución hirviendo aproximadamente un kilogramo de agua, y así, aumenta la economía N veces (Duran, 2010; Muñoz, 2016).

La economía (E) del evaporador de doble efecto con circulación forzada, se puede calcular a partir de la ecuación (1.27).

$$E = \frac{W_T}{W_{S1}} \cdot 100 \quad (1.27)$$

$W_T$ : Flujo total de agua evaporada, [kg/h].

$$W_T = W_1 + W_2 \quad (1.28)$$

La capacidad de evaporación (C) de la estación evaporadora, se puede conocer mediante la ecuación (1.28).

$$C = \frac{W_T}{t} \cdot 100 \quad (1.29)$$

La evaporación constituye una operación de vital importancia en el procesamiento industrial de jugos de frutas y hortalizas, con el propósito de obtenerlos concentrados y alcanzar los parámetros de calidad requeridos. Los evaporadores de circulación forzada, se emplean con gran frecuencia en la industria alimentaria, para la concentración de fluidos viscosos con características incrustantes, como son los jugos de frutas tropicales y vegetales. La utilización de evaporadores de múltiples efectos, implica un mejor uso de la energía disponible; puesto que se reduce notablemente el consumo de vapor y se incrementa la eficiencia y economía de estos equipos. La propuesta metodológica descrita anteriormente permitirá reunir varias herramientas necesarias para evaluar el funcionamiento del evaporador de doble efecto con circulación forzada. Esta metodología de cálculo es rigurosa y relativamente sencilla de aplicar.

## Bibliografía

ANAYA DURAND, A. *A shortcut for designing evaporators*. Chemical Engineering. [on-line], 1996, Vol.103, p.123-126. [Citado: 26 marzo 2017]. Disponible en: <http://www.chemengonline.com>.

BERK, Z. *Food Process Engineering and Technology*. 2da ed. Berlin: Editorial Academic Press, 2013.

CHOI, Y. Y M. R. OKOS. *Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods*. New York: Editorial Elsevier, 1986.

DURAN, E. Determinación de la eficiencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América, Colombia, 2010.

GEANKOPLIS, CH. J. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3ra ed. México: Editorial CECSA, 2006.

KERN, D. Q. *Procesos de Transferencia de Calor*. México: Editorial McGraw-Hill, 1999.

MCCABE, W.; SMITH, J. Y HARRIOTT, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7ma ed. México D.F.: Editorial McGraw-Hill, 1999.

MUÑOZ, A. Aplicación informática para el diseño y operación de evaporadores de múltiple efecto en la industria. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Energética. Sevilla, España. 2016.

ORTEGA, F.; ISAZA, Y.; TIRADO, T. Y MONTES. Efecto de la concentración y presión sobre la elevación del punto de ebullición de pasta de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Revista ION [on-line], 2015, Vol.28, No.2, p.1–12, [citado: 29 marzo 2017]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v28n2-2015004>.

PAVLOV, K. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. Moscú: Editorial Mir, 1981.