

## Modelamiento de un evaporador de triple efecto en corriente directa para la concentración de soluciones azucaradas.

Wilson Daniel Símpalo López<sup>1</sup>

### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo realizar un modelamiento de un evaporador de triple efecto en corriente directa para la concentración de soluciones azucaradas. A partir de un balance de materia y energía se estableció los modelos matemáticos no lineales que describen el proceso de evaporación, el número de ecuaciones planteadas fueron 6. La solución de este sistema de ecuaciones nos permitió determinar variables de proceso como flujo de vapor de calentamiento (F), el área de transferencia de calor (A), la temperatura del primer efecto (T1), la temperatura del segundo efecto (T2), el licor concentrado que sale del efecto 1 (L1), licor concentrado que sale del efecto 2 (L2), la concentración en el efecto 1 y 2 y la concentración del producto final. Para probar los modelos matemáticos establecidos en esta investigación se resolvió un sistema de evaporadores de triple efecto en corriente directa y los resultados se compararon con los reportados por otros investigadores, los cuales fueron similares, indicando de esta manera que los modelos son acertados para la descripción del sistema de evaporación analizado.

*Palabras clave:* Modelamiento, evaporador, evaporación, soluciones azucaradas.

## Modeling of a triple effect evaporator in direct current for the concentration of sugary solutions.

### Abstract

The present research had as objective to make a model of a triple effect evaporator in direct current for the concentration of sugary solutions. From a balance of matter and energy we established non-linear mathematical models that describe the evaporation process, the number of equations raised were 6. The solution of this system of equations allowed us to determine process variables such as heating steam flow (F), the heat transfer area (A), the temperature of the first effect (T1), the temperature of the second effect (T2), the concentrated liquor leaving the effect 1 (L1), concentrated liquor leaving the effect 2 (L2), the concentration in effect 1 and 2 and the concentration of the final product. In order to test the mathematical models established in this research, a system of triple effect direct current evaporators was solved and the results were compared with those reported by other researchers, which were similar, indicating that the models are correct for the description Of the analyzed evaporation system.

*Keywords:* Modeling, evaporator, evaporation, sugary solutions.

## Modelação de um evaporador de efeito triplo em corrente contínua para que a concentração de soluções de açúcar.

### Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo realizar a modelagem de um evaporador de efeito triplo em corrente contínua para a concentração de soluções de açúcar. A partir de um equilíbrio e não-lineares de energia materiais modelos matemáticos que descrevem o processo de evaporação foi estabelecida, o número de equações levantadas foram 6. A solução deste sistema equação permitiu determinar as variáveis do processo de fluxo, tais como vapor de aquecimento (F), a área de transferência de calor (a), a temperatura do primeiro efeito (T1), a temperatura do segundo efeito (T2), o licor concentrado deixa o efeito um (L1), licor concentrado que sai do efeito 2 (L2), o efeito da concentração de 1 e 2 e concentração do produto final. Para testar os modelos matemáticos estabelecidos neste evaporadores do sistema de pesquisa triplo efeito em corrente contínua, e os resultados foram comparados com os obtidos por outros pesquisadores, que foram semelhantes, indicando assim que os modelos são precisos para descrever resolvido sistema de evaporação analisados

*Palavras-chave:* Modelando, evaporador, soluções de açúcar evaporação.

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional del Santa. Chimote, Perú.  
Recibido: 05/12/2016 Aceptado: 19/12/2016

## Introducción

La evaporación es una de las principales operaciones unitarias en la agroindustria, esta operación consiste básicamente en la separación de un disolvente volátil de un soluto no volátil por evaporación del disolvente. El agua es el disolvente que con más frecuencia hemos de separar. La calefacción se efectúa por medio de vapor condensante generado por un caldero (Ocon, J. y Tojo, G. 1975).

Esta operación se emplea principalmente cuando se quiere concentrar pulpas de frutas, producción de leche evaporada, concentración de soluciones azucaradas como en el caso de la producción de azúcar de caña, entre otros. Puesto que esta operación es de suma importancia para los procesos antes mencionados, es importante mantener un riguroso control de los parámetros de los procesos para obtener una mayor eficiencia en la producción de productos concentrados. Si no se hace un efectivo control de este proceso es probable que el gasto energético sea mayor además de obtener productos poco concentrados no cumpliendo así los parámetros de calidad. Dentro de los parámetros de control tenemos el flujo de vapor de calefacción, la concentración de las corrientes internas del líquido concentrado, las temperaturas en los diferentes tachos del evaporador, el flujo de alimentación de la solución a concentrar, el flujo de solución concentrada, etc. Son varios factores que debería ser evaluados para controlar esta operación; pero es muy riesgoso manipularlos y evaluarlos durante un proceso real de producción ya que podría afectar la calidad del producto terminado, es por ello que este trabajo de investigación plantea modelar esta operación con la finalidad que podamos evaluar y manipular las variables de manera virtual y poder predecir una operación real. De esta manera se podría mejorar la eficiencia de esta operación.

**Evaporación:** Esta operación consiste en la separación de un disolvente volátil de un soluto no volátil por vaporización del disolvente, el agua es un disolvente que con más frecuencia hemos de separar. La calefacción se efectúa por medio del vapor condensante. (Ocon, Tojo 1975).

**Evaporador:** Un evaporador consta, esencialmente, de dos cámaras, una de condensación y otra de evaporación. En la de condensación un vapor de agua se transforma en líquido con lo que cede su calor latente de condensación, el cual es captado en la cámara de evaporación por el alimento, del que se desea eliminar el agua. El agua evaporada abandona la cámara de evaporación a la temperatura de ebullición, al mismo tiempo que se obtiene una corriente de solución concentrada. Es importante resaltar que muchas soluciones alimentarias son termolábiles, y pueden quedar afectadas si son expuestas a una temperatura demasiado elevada. Es por ello que en muchos casos es conveniente operar a vacío en la cámara de evaporación, lo que hace que la temperatura de ebullición de la solución acuosa sea menor, y el fluido se vea afectado por el calor en menor grado. Si se opera a vacío, es necesario disponer de un dispositivo que lo realice. Asimismo, será necesario que, en el condensador utilizado en la condensación del vapor desprendido en la cámara de evaporación, se disponga de una columna barométrica que compense la diferencia de presiones con el exterior (Ibarz, Gustavo y Barbosa. 2011).

**Economía de un evaporador:** Se define la capacidad del evaporador ( $V$ ) como la cantidad de agua evaporada del alimento por unidad de tiempo. El consumo ( $w_V$ ) es la cantidad de vapor de calefacción consumida por unidad de tiempo. La economía ( $E$ ) es la cantidad de disolvente evaporado por unidad de vapor de calefacción (Ibarz, Gustavo y Barbosa. 2011):

$$E = \frac{\text{Capacidad}}{\text{Consumo}} = \frac{V}{w_V}$$

**Evaporador simple:** En la Figura N° 1, se halla esquematizado un evaporador simple, en este se incluyen las diferentes variables de cada una de las corrientes. En la cámara de condensación se alimenta una corriente de vapor saturado  $w_V$ , que posee una temperatura  $T$ , siendo  $\hat{H}_w$  su entalpía. El vapor condensa, y el único calor que cede es el de condensación, por lo que de esta cámara sale una corriente  $w_V$  de agua líquida a la temperatura de condensación  $T$ , siendo su

entalpía  $\hat{h}_w$ , que se corresponde a la de agua a su punto de ebullición. El calor de condensación  $\dot{Q}$  es transferido a través del área de intercambio del evaporador, y es captado por la corriente del alimento en la cámara de evaporación (Ibarz, Gustavo y Barbosa. 2011)..

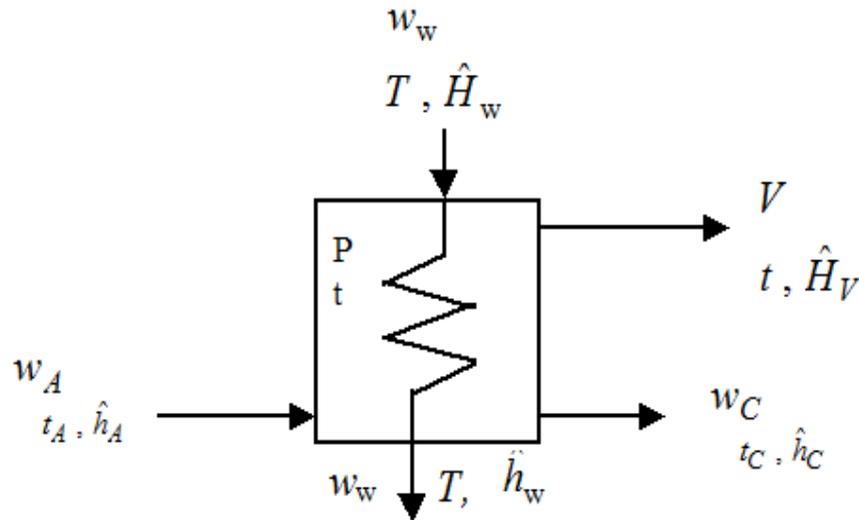


Figura 1: Evaporador simple

En la cámara de evaporación se alimenta una corriente  $w_A$ , que se halla a una temperatura  $t_A$ , siendo su entalpía  $\hat{h}_A$ . Debido al calor que cede el vapor condensado ( $\dot{Q}$ ), se obtiene una corriente concentrada  $w_C$ , cuya temperatura es  $t_C$  y  $\hat{h}_C$  es su entalpía. Además, se obtiene una corriente de vapor  $V$ , a una temperatura  $t_V$  y cuya entalpía es. Es importante resaltar que las temperaturas de las corrientes de concentrado y de vapor  $\hat{H}_V$  que abandonan la cámara de evaporación son iguales, y se corresponden a la temperatura de ebullición de la disolución concentrada que abandona esta cámara.

**Evaporación en múltiple efecto:** Un múltiple efecto consta de un conjunto de evaporadores, denominándose primer efecto al primer evaporador, segundo efecto al segundo evaporador, etc., siendo el primero el que recibe el vapor vivo procedente de un generador de vapor.

Durante el funcionamiento, el vapor procedente de la evaporación en el primer efecto se emplea como vapor de calefacción del segundo, y el producto en este se emplea como calefacción del tercero, etc.; es evidente que para su funcionamiento se necesita que el vapor de calefacción de cada efecto condense a temperatura superior a la de ebullición en este efecto, lo cual exige que exista entre los distintos efectos una diferencia de presión suficiente para que se produzca la ebullición.

**Sistemas de alimentación:** Los sistemas de alimentación reciben nombre distinto según el sistema de circulación seguido por el líquido a concentrar, denominándose (Ocon, Tojo 1975):

**Alimentación directa:** Cuando la dirección de la corriente de vapor de calefacción y de líquido a concentrar es la misma, circulando el líquido en el sentido de presiones decrecientes.

**Alimentación en contracorriente:** Cuando la dirección de la corriente del vapor de calefacción y de líquido a concentrar son contrarias, entrando el líquido por el último efecto.

**Alimentación mixta:** Cuando en una parte del sistema la dirección de las corrientes es directa y en otra parte es en contracorriente.

**Alimentación en paralelo:** Cuando la alimentación entra simultáneamente en todos los efectos y el líquido concentrado procedente de cada efecto se une en una sola corriente.

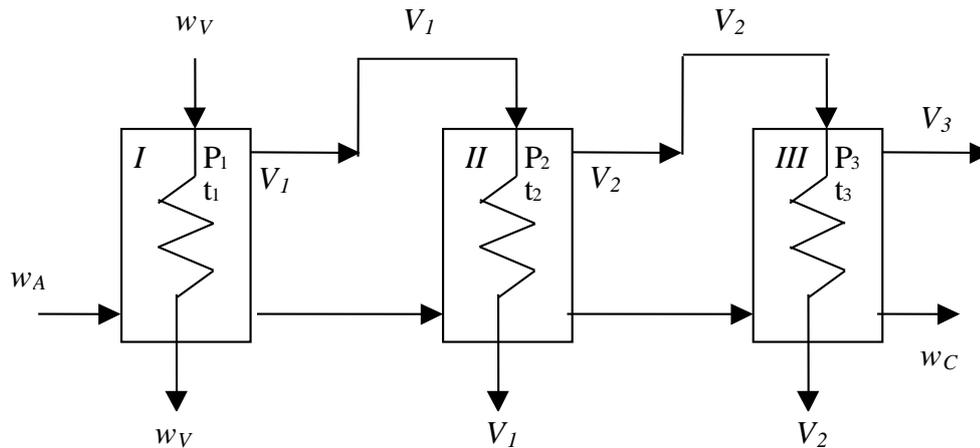


Figura 2. Evaporador de múltiple efecto

### Factores que afectan el proceso de evaporación

Las siguientes propiedades fisicoquímicas de la solución a concentrar y del vapor que se separa tienen un efecto considerable sobre el tipo de evaporador a usar, así como en la presión y temperatura del proceso (Urbicain, 1999):

**Concentración en el líquido:** Al comenzar el proceso de evaporación, la solución entrante es bastante diluida, a medida que ocurre su concentración, la solución aumenta su viscosidad disminuyendo el coeficiente de transferencia de calor.

**Sensibilidad térmica de los materiales:** Los alimentos son sensibles a la temperatura y se degradan cuando ésta aumenta o el calentamiento es muy prolongado.

**Formación de espumas:** Algunos materiales forman espuma durante la ebullición, esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede producir pérdidas del material.

**Presión y temperatura:** A mayor presión de operación del evaporador mayor será la temperatura de ebullición. Por otra parte, la temperatura de ebullición aumenta a mayor concentración del material disuelto por la acción de la evaporación; este fenómeno es conocido como elevación del punto de ebullición (EPE). Para operar un evaporador a temperaturas relativamente bajas y evitar degradación en materiales termosensibles usualmente se trabaja al vacío.

**Formación de incrustaciones:** estas reducen el coeficiente de transferencia de calor disminuyendo la eficiencia del equipo. Al aumentar la velocidad de circulación del líquido, la formación de incrustaciones se reduce notablemente.

### Materiales y métodos

La presente investigación se realizó siguiendo un conjunto de etapas presentadas a continuación:

**Revisión bibliográfica:** Empleando fuentes físicas y virtuales.

**Definir el sistema de evaporación:** Se definió para el estudio un arreglo de evaporador de triple efecto en corriente directa.

**Definición de variables a evaluar:** Las variables de entrada (datos) son fluido de alimentación (F), la capacidad calorífica del fluido (C<sub>p</sub>), la concentración de solutos en la alimentación (XF), y la concentración de solutos en la corriente final (X<sub>3</sub>), la temperaturas de alimentación (TF), la temperatura del vapor vivo proveniente del caldero (T<sub>0</sub>), la temperatura de operación del tercer

efecto (T3), los coeficientes totales de transferencia de calor en cada uno de los efectos (U1, U2, U3). Las Variables de salida (resultados) son flujo de vapor de calentamiento (F), el área de transferencia de calor (A), la temperatura del primer efecto (T1), la temperatura del segundo efecto (T2), el licor concentrado que sale del efecto 1 (L1), licor concentrado que sale del efecto 2 (L2) y la concentración en el efecto 1 y 2.

**Balance de materia y energía:** Realizó un balance de materia y energía para cada uno de los efectos y un balance total de masa de todo el sistema.

**Establecer modelos Matemáticos:** En base al balance de materia y energía, se establecen los modelos matemáticos que definen el proceso de evaporación. Para estos modelos se han establecidos algunos supuestos como la igualdad de las áreas de transferencia en cada efecto son iguales y la igualdad del calor latente de vaporización para todos los flúos.

**Ejecución del modelo:** El modelo se ejecutó con diferentes datos y los resultados se compararon con resultados encontrados en diferentes bibliografías.

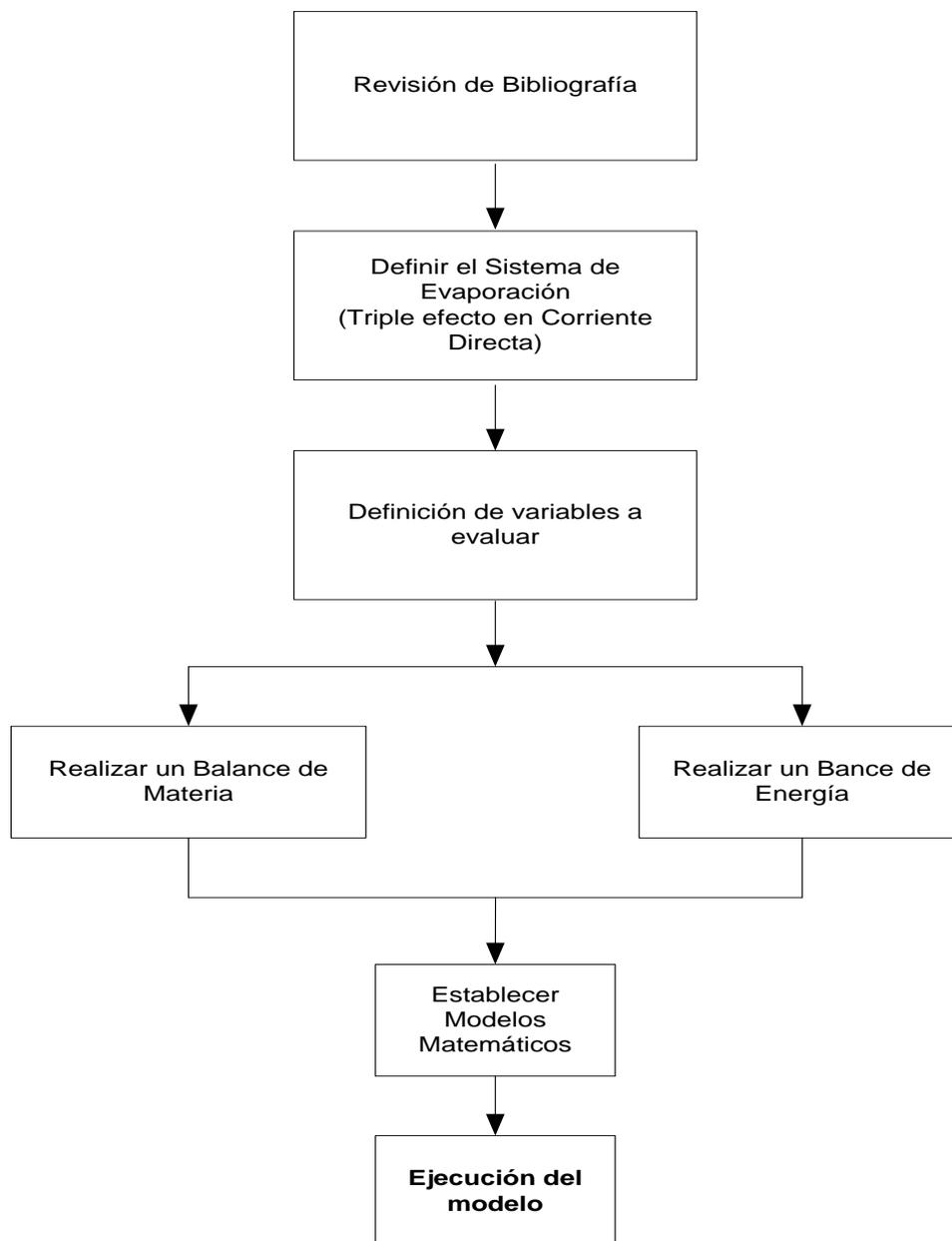
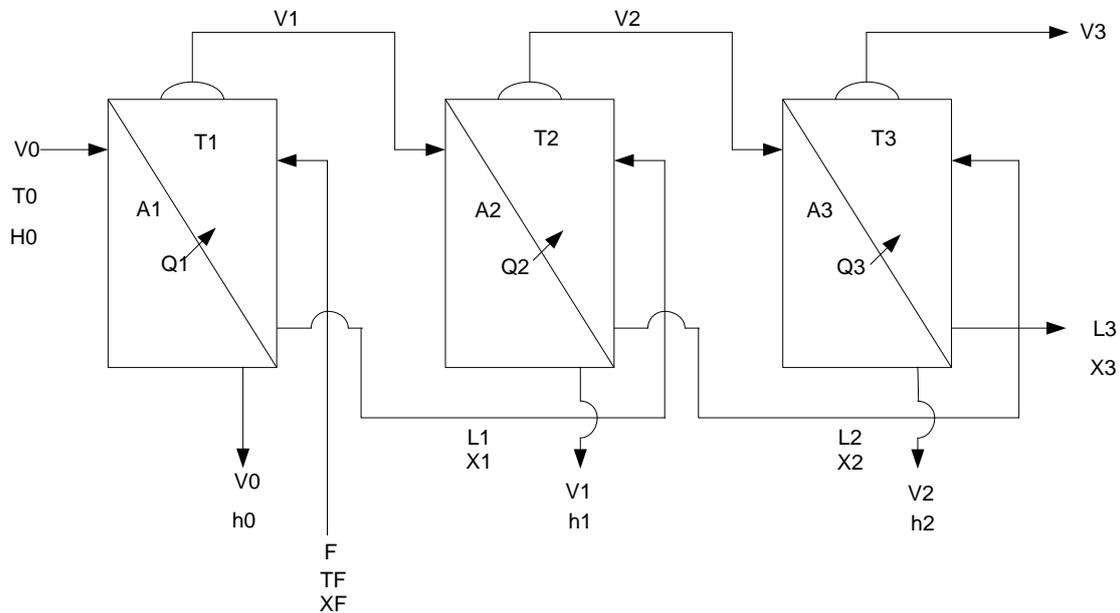


Figura 3. Diseño de investigación.

**Resultados**

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la siguiente investigación:

**Definir el sistema de evaporación:** Para el presente estudio se empleara el arreglo de evaporadores de triple efecto en corriente directa. A Continuación se muestra el esquema de un evaporador de triple efecto en corriente directa:



**Figura 1. Evaporadores de triple efecto en corriente directa**

Fuente: Elaboración propia

**Definición de variables a evaluar:** Las variables a evaluar serán:

Variables de entrada: Son aquellas variables que se pueden manipular, estas son:

- Temperatura de entrada de la alimentación (TF).
- Temperatura en la cámara de evaporación del tercer efecto (T3).
- Temperatura del vapor vivo proveniente del caldero (T0).
- Flujo de alimentación de la solución azucarada (F).
- Capacidad calorífica de los fluidos (Cp).
- Concentración de la solución azucarada en la alimentación (XF).
- Concentración del soluto en el producto final (X3).
- Coefficiente global de transferencia de calor en el efecto 1 (U1)
- Coefficiente global de transferencia de calor en el efecto 2 (U2)
- Coefficiente global de transferencia de calor en el efecto 3 (U3)
- Calor latente de vaporización de los fluidos ( $\lambda$ )

Variables de salida: Son aquellas variables que se obtendrán como respuesta, estas son:

- Flujo de vapor vivo proveniente del caldero (V0)
- Área de transferencia de calor para el efecto 1 (A1)
- Área de transferencia de calor para el efecto 2 (A2)
- Área de transferencia de calor para el efecto 3 (A3)
- Temperatura para el primer efecto (T1)
- Temperatura para el segundo efecto (T2)
- Flujo de la solución azucarada que sale del primer efecto (L1)
- Flujo de la solución azucarada que sale del segundo efecto (L2)
- Flujo de la solución azucarada que sale del tercer efecto (L3)
- Concentración de la solución azucarada que sale del efecto 1 (X1)
- Concentración de la solución azucarada que sale del efecto 2 (X2)

**Balance de materia y energía:** Se procedió a realizar un balance de materia y energía con la finalidad de encontrar ecuaciones que describan el proceso de evaporación.

**Balance de Materia y energía en el primer efecto:**

**Balance de Masa Total:**  $F = V_1 + L_1$  (1)

**Bance Parcial de solutos:**  $F X_F = L_1 X_1 \implies X_1 = (F / L_1) X_F$  (2)

**Balance de energía:**  $F h_F + V_0 H_0 = V_1 H_1 + L_1 h_1 + V_0 h_0$  (3)

Ordenando y reemplazando (1) en (3)

$$F h_F + V_0 (H_0 - h_0) = (F - L_1) H_1 + L_1 h_1$$
 (4)

Sabemos que:  $Q_1 = V_0 (H_0 - h_0)$  (5)

Remplazando (5) en (4)

$$F h_F + Q_1 - (F - L_1) H_1 - L_1 h_1 = 0$$

Sumando y restando ( $F h_1$ )

$$F h_F - F h_1 + Q_1 - (F - L_1) H_1 - L_1 h_1 + F h_1 = 0$$

Ordenando

$$F (h_F - h_1) + Q_1 - F H_1 + L_1 H_1 + F h_1 - L_1 h_1 = 0$$

$$F (h_F - h_1) + Q_1 - (F - L_1) (H_1 - h_1) = 0$$
 (6)

Sabemos que:  $(H_1 - h_1) = \lambda_1$  (7)

Remplazando (VII) en (VI)

$$F (h_F - h_1) + Q_1 - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (8)

Sabemos que:

$$Q_1 = V_0 (H_0 - h_0) = V_0 \lambda_0$$
 (9)

$$Q_1 = U_1 A_1 (T_0 - T_1)$$
 (10)

Remplazando (9) en (8):

$$F (h_F - h_1) + V_0 \lambda_0 - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (11)

Remplazando (9) en (10):

$$U_1 A_1 (T_0 - T_1) - V_0 \lambda_0 = 0$$
 (I)

Sabemos que:  $(h_F - h_1) = Cp (T_F - T_1)$  (12)

Remplazando (12) en (11)

$$F Cp (T_F - T_1) + V_0 \lambda_0 - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (II)

**Balance de Materia y energía en el segundo efecto:**

**Balance de Masa Total:**  $V_2 = L_1 - L_2$  (1)

**Bance Parcial de solutos:**

$$L_1 X_1 = L_2 X_2 \implies X_2 = (L_1 / L_2) X_1$$
 (2)

**Balance de energía:**  $L_1 h_1 + V_1 H_1 = V_2 H_2 + L_2 h_2 + V_1 h_1$  (3)

Ordenando y reemplazando (1) en (3)

$$L_1 h_1 + V_1 (H_1 - h_1) = (L_1 - L_2) H_2 + L_2 h_2$$
 (4)

Sabemos que:  $Q_2 = V_1 (H_1 - h_1)$  (5)

Reemplazando (5) en (4)

$$L_1 h_1 + Q_2 - (L_1 - L_2) H_2 - L_2 h_2 = 0$$

Sumando y restando ( $L_1 h_2$ )

$$L_1 h_1 - L_1 h_2 + Q_2 - (L_1 - L_2) H_2 - L_2 h_2 + L_1 h_2 = 0$$

Ordenando

$$L_1 (h_1 - h_2) + Q_2 - L_1 H_2 + L_2 H_2 + L_1 h_2 - L_2 h_2 = 0$$

$$L_1 (h_1 - h_2) + Q_2 - (L_1 - L_2) (H_2 - h_2) = 0$$
 (6)

Sabemos que:  $(H_2 - h_2) = \lambda_2$  (7)

Reemplazando (7) en (6)

$$L_1 (h_1 - h_2) + Q_2 - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (8)

Sabemos que:

$$Q_2 = V_1 (H_1 - h_1) = V_1 \lambda_1$$
 (9)

$$Q_2 = U_2 A_2 (T_1 - T_2)$$
 (10)

Reemplazando (9) en (8):

$$L_1 (h_1 - h_2) + V_1 \lambda_1 - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (11)

Reemplazando (9) en (10):

$$U_2 A_2 (T_1 - T_2) - V_1 \lambda_1 = 0$$
 (12)

Sabemos que:  $(h_1 - h_2) = Cp (T_1 - T_2)$  (13)

Sabemos que:  $V_1 = (F - L_1)$  (14)

Reemplazando (14) en (12)

$$U_2 A_2 (T_1 - T_2) - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (III)

Reemplazando (13) Y (14) en (11)

$$L_1 Cp (T_1 - T_2) + (F - L_1) \lambda_1 - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (IV)

**Balance de Materia y energía en el tercer efecto:**

**Balance de Masa Total:**  $V_3 = L_2 - L_3$  (1)

**Bance Parcial de solutos:**  $L_2 X_2 = L_3 X_3 \implies X_3 = (L_2 / L_3) X_2$  (2)

**Balance de energía:**

$$L_2 h_2 + V_2 H_2 = V_3 H_3 + L_3 h_3 + V_2 h_2$$
 (3)

Ordenando y reemplazando (1) en (3)

$$L_2 h_2 + V_2 (H_2 - h_2) = (L_2 - L_3) H_3 + L_3 h_3$$
 (4)

Sabemos que:  $Q_3 = V_2(H_2 - h_2)$  (5)

Remplazando (5) en (4)

$$L_2 h_2 + Q_3 - (L_2 - L_3) H_3 - L_3 h_3 = 0$$

Sumando y restando ( $L_2 h_3$ )

$$L_2 h_2 - L_2 h_3 + Q_3 - (L_2 - L_3) H_3 - L_3 h_3 + L_2 h_3 = 0$$

Ordenando

$$L_2 (h_2 - h_3) + Q_3 - L_2 H_3 + L_3 H_3 + L_2 h_3 - L_3 h_3 = 0$$

$$L_2 (h_2 - h_3) + Q_3 - (L_2 - L_3) (H_3 - h_3) = 0$$
 (6)

Sabemos que:  $(H_3 - h_3) = \lambda_3$  (7)

Remplazando (7) en (6)

$$L_2 (h_2 - h_3) + Q_3 - (L_2 - L_3) \lambda_3 = 0$$
 (8)

Sabemos que:

$$Q_3 = V_2 (H_2 - h_2) = V_2 \lambda_2$$
 (9)

$$Q_3 = U_3 A_3 (T_2 - T_3)$$
 (10)

Remplazando (9) en (8):

$$L_2 (h_2 - h_3) + V_2 \lambda_2 - (L_2 - L_3) \lambda_3 = 0$$
 (11)

Remplazando (9) en (10):

$$U_3 A_3 (T_2 - T_3) - V_2 \lambda_2 = 0$$
 (12)

Sabemos que:  $(h_2 - h_3) = Cp (T_2 - T_3)$  (13)

Sabemos que:  $V_2 = (L_1 - L_2)$  (14)

Remplazando (14) en (12)

$$U_3 A_3 (T_2 - T_3) - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (V)

Remplazando (12) Y (13) en (11)

$$L_2 Cp (T_2 - T_3) + (L_1 - L_2) \lambda_2 - (L_2 - L_3) \lambda_3 = 0$$
 (VI)

Las ecuaciones que describen el proceso de evaporación son:

$$U_1 A_1 (T_0 - T_1) - V_0 \lambda_0 = 0$$
 (I)

$$F Cp (T_F - T_1) + V_0 \lambda_0 - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (II)

$$U_2 A_2 (T_1 - T_2) - (F - L_1) \lambda_1 = 0$$
 (III)

$$L_1 Cp (T_1 - T_2) + (F - L_1) \lambda_1 - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (IV)

$$U_3 A_3 (T_2 - T_3) - (L_1 - L_2) \lambda_2 = 0$$
 (V)

$$L_2 Cp (T_2 - T_3) + (L_1 - L_2) \lambda_2 - (L_2 - L_3) \lambda_3 = 0$$
 (VI)

De las ecuaciones anteriores se considerara dos supuestos:

Las áreas en cada efecto serán iguales:  $A_1 = A_2 = A_3$

El calor latente de vaporización:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$

Los modelos matemáticos quedarían de la siguiente forma:

$$U_1 A (T_0 - T_1) - V_0 \lambda = 0$$
 (I)

$$F C_p (T_F - T_1) + V_0 \lambda - (F - L_1) \lambda = 0 \quad \text{(II)}$$

$$U_2 A (T_1 - T_2) - (F - L_1) \lambda = 0 \quad \text{(III)}$$

$$L_1 C_p (T_1 - T_2) + (F - L_1) \lambda - (L_1 - L_2) \lambda = 0 \quad \text{(IV)}$$

$$U_3 A (T_2 - T_3) - (L_1 - L_2) \lambda = 0 \quad \text{(V)}$$

$$L_2 C_p (T_2 - T_3) + (L_1 - L_2) \lambda - (L_2 - L_3) \lambda = 0 \quad \text{(VI)}$$

Para comprobar los modelos matemáticos se resolvieron algunos ejemplos de operaciones de evaporación y se compararon con los resultados de libros (Fundamentos y métodos de proceso de separación, Charles D. Holland) y de otros investigadores (Evangelista Benites). Empleando para resolver el sistema de ecuaciones el software POLYMATH. Se probó los modelos con los siguientes datos:

$c = 1000 \text{ Btu / lb.}$

$CP = 1.0 \text{ Btu / (lb } ^\circ\text{F)}$

$U_1 = 500 \text{ Btu / (h. pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F)}$

$U_2 = 300 \text{ Btu / (h. pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F)}$

$U_3 = 200 \text{ Btu / (h. pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F)}$

$XF = 0.1$

$X_3 = 0.5$

$F = 50000 \text{ lb/ h}$

$TF = 100 \text{ } ^\circ\text{F}$

$T_0 = 250 \text{ } ^\circ\text{F}$

$T_3 = 125 \text{ } ^\circ\text{F}$

Solución empleando como software POLYMATH

**Cuadro N° 1: Valores calculados de variables no lineales por el software POLYMATH**

	Variable	Value	f(x)	Initial Guess
1	V0	1.789E+04	0	2.0E+04
2	T1	218.5346	0	200.
3	L1	3.804E+04	-5.588E-09	4.0E+04
4	T2	183.467	1.863E-09	150.
5	L2	2.474E+04	3.725E-09	3.0E+04
6	A	1137.031	1.863E-09	1000.
	Variable	Value		
1	LAMDA	1000.		
2	CP	1.		
3	U1	500.		
4	U2	300.		
5	U3	200.		
6	XF	0.1		
7	X3	0.5		
8	F	5.0E+04		
9	TF	100.		
10	T0	250.		
11	T3	125.		
12	L3	10000.		

Fuente: POLYMATH

**Cuadro 2. A continuación se presenta una cuadro comparativo desarrollado con otros modelos o procedimientos:**

<b>Variable</b>	<b>Resultados por el modelo propuesto</b>	<b>Resultado por el Dr. Guillermo Evangelista Benites (UNT). Empleando el software Matlab</b>	<b>Solución del libro: Fundamentos y métodos de proceso de separación, Charles D. Holland.</b>
Flujo de vapor vivo proveniente del caldero (V0)	17890 lb/h	17888 lb/h	17888.5 lb/h
Temperatura para el primer efecto (T1)	218.53 °F	218.53 °F	218.534°F
Flujo de la solución azucarada que sale del primer efecto (L1)	38040 lb/h	38038.14 lb/h	38038.1 lb/h
Temperatura para el segundo efecto (T2)	183.46 °F	183.47 °F	183.46 °F
Flujo de la solución azucarada que sale del segundo efecto (L2)	24740 lb/h	24742.38 lb/h	24742.40
Área de transferencia de calor para el efecto 2 (A)	1137 pie <sup>2</sup>	1137 pie <sup>2</sup>	1137 pie <sup>2</sup>
Flujo de la solución azucarada que sale del tercer efecto (L3)	10000 lb/h	10000 lb/h	10000 lb/h

Fuente: Elaboración propia

### Discusión

Para la presente investigación se seleccionó como sistema de análisis a un evaporador de triple efecto en corriente directa. Según Ocon y Tojo (1975), los sistemas de alimentación reciben nombre distinto según el sistema de circulación seguido por el líquido a concentrar, denominándose alimentación directa cuando la dirección de la corriente de vapor de calefacción y de líquido a concentrar es la misma, alimentación en contracorriente cuando la dirección de la corriente del vapor de calefacción y de líquido a concentrar son contrarias, alimentación mixta cuando en una parte del sistema la dirección de las corrientes es directa y en otra parte es en contracorriente, alimentación en paralelo cuando la alimentación entra simultáneamente en todos los efectos y el líquido concentrado procedente de cada efecto se une en una sola corriente.

Para establecer los modelos matemáticos que describen la operación de evaporador de triple efecto en corriente directa para soluciones azucaradas se realizaron balances de materia y energía para cada evaporador, estableciéndose de esta manera un sistema de seis ecuaciones que describen el proceso de evaporación. Pérez, Berná y Gil (2004), también establecieron un modelo lineal de proceso a partir de un balance de materia y energía su trabajo fue titulado “Modelado Análisis y control de un evaporador de doble efecto”. En este trabajo se presentó el

desarrollo del modelo matemático y el sistema de control de un evaporador de doble efecto utilizado para concentrar mezclas de trietilen-glicol en agua.

En la presente investigación se establecieron variables de entrada como: Temperatura de entrada de la alimentación (TF), temperatura en la cámara de evaporación del tercer efecto (T3), temperatura del vapor vivo proveniente del caldero (T0), flujo de alimentación de la solución azucarada (F), capacidad calorífica de los fluidos ( $C_p$ ), concentración de la solución azucarada en la alimentación (XF), concentración del soluto en el producto final (X3) y los coeficientes globales de transferencia de calor en cada efecto. Y como variables respuesta tenemos: flujo de vapor vivo proveniente del caldero (V0), el área de transferencia de calor, temperatura para el primer efecto (T1), temperatura para el segundo efecto (T2), flujo de la solución azucarada que sale del primer efecto (L1), flujo de la solución azucarada que sale del segundo efecto (L2), flujo de la solución azucarada que sale del tercer efecto (L3), concentración de la solución azucarada que sale del efecto 1 (X1) y concentración de la solución azucarada que sale del efecto 2 (X2). Rojero y Padilla (2008), realizaron el trabajo titulado: "Simulación de un evaporador de doble efecto. Caso de estudio: jarabe de azúcar" donde las variables de salida fueron el área de transferencia necesaria de calor, el gasto (consumo) de vapor de calefacción y la economía de un evaporador de doble efecto, especificando flujo, concentración y temperatura de entrada para obtener una solución de salida también especificada igualmente, se tendrá como información de entrada, la presión de saturación del segundo efecto, para determinar la temperatura de saturación. De esta manera podemos decir que las variables definidas en este estudio son similares a las consideradas por Rojero (2008).

Los resultados que plantea esta investigación es solo para evaporadores de tres efectos, sin embargo hay investigaciones que han establecidos modelos para el desarrollo de n efectos, como es el caso de Fernández (2006) quien realizó un trabajo de investigación titulado "Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto" el algoritmo desarrollado en esta investigación, presentó la capacidad de resolver sistema de evaporación de múltiple efecto, para n efectos, siendo n cualquier entero positivo mayor que uno.

En un proceso de evaporación los fluidos a evaporar pueden sufrir algunos cambios en su estructura química que también se podría evaluar. En la presente investigación no se consideran estos cambios asumiendo una conservación de su estructura química. En algunas otras investigaciones si consideran los cambios químicos del fluido a concentrar como Núñez, Tarifa, y Farfán (2011), quienes presentaron un trabajo de investigación titulado "Simulación estacionaria de un evaporador de doble efecto para jugo de tomate" en dicho trabajo se desarrolló un modelo de evaporador de dos efectos en el que se incluye la velocidad de degradación del licopeno. Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables más importante con el objeto de poder ajustar dichos parámetros y optimizar el desempeño del sistema.

Para probar los modelos matemáticos establecidos en esta investigación se resolvió un sistema de evaporadores de triple efecto en corriente directa y los resultados se compararon con los reportados por Holland y Charles (1981), los cuales fueron similares, indicando de esta manera, que los modelos son acertados para la descripción del sistema de evaporación analizado.

## Conclusiones

Los modelos matemáticos planteados para la operación de evaporación de triple efecto en corriente directa, describen de manera acertada el fenómeno de evaporación de soluciones azucaradas, obteniendo como variables de respuesta: flujo de vapor vivo proveniente del caldero (V0), temperatura para el primer efecto (T1), temperatura para el segundo efecto (T2), flujo de la solución azucarada en las corrientes intermedias (L1 y L2), concentración de las corrientes intermedias (X1, X2), el área de transferencia de calor (A) y el flujo de producto final (L3).

### Referencias bibliográficas

- Núñez, A., Tarifa, E., Farfán, N. (2011). Simulación estacionario de un evaporador de doble efecto para jugo de tomate. Universidad Nacional de Jujuy– Argentina.
- Belkis Avalo y Alfredo Varela. (2008). Modelación y simulación de un evaporador de triple efecto para la concentración de jugos naturales. Universidad Simón Rodríguez-Venezuela.
- Fernández, F. (2006). Diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto. Universidad de San Carlos. Guatemala.
- Holland, C., Charles, D. (1981). Fundamentos y modelos de procesos de separación. Ed. Prentice Hall Internacional.
- Ibarz, A., Gustavo, V., Barbosa-Cánovas. (2011). Operaciones unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Universidad de Lleida. Washington State University. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Ocon, J. y Tojo, G. (1975). Problemas de ingeniería química. Tomos I y II.
- Pérez, M., Berná, J., Gil, J. (2004). Modelado análisis y control de un evaporador de doble efecto. Universidad de Alicante. España.
- Rojero, M. (2008). Simulación de un evaporador de doble efecto. Caso de estudio: Jarabe de azúcar. Universidad Autónoma de Zacatecas. España.
- Urbicain, E. Ugrin, M. (1999). Design and Simulation of Multieffect Evaporators. Heat Transfer Engineering 20.4 (1999): 38-44p.