



Nº2 Junio 2010

## CÁLCULO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO, UN MÉTODO SIMPLIFICADO

**Roberto Carrizales Martínez**

Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

[rcarriza@uaslp.mx](mailto:rcarriza@uaslp.mx)

### RESUMEN

En el presente trabajo, se propone un método corto para el diseño de evaporadores de múltiple efecto, enfocándose al caso del diseño de evaporadores en los que el licor concentrado presenta una elevación en el punto de ebullición ([EPE]). Este método se basa en algunas de las suposiciones comunes en la práctica industrial; que todos los evaporadores son de diseño idéntico y tienen la misma área de transferencia de calor, el número de efectos se ha asignado arbitrariamente, coeficientes globales de transferencia de calor constantes, y los flujos son fijos. El procedimiento del algoritmo de diseño aquí planteado no es iterativo como lo son los métodos tradicionales que se encuentran reportados en la literatura, lo que hace más rápida la resolución de este tipo de problemas.

**Palabras clave:** Evaporación, múltiple efecto, elevación en el punto de ebullición, algoritmo de diseño, coeficientes de transferencia de calor.

## INTRODUCCIÓN

La evaporación es una de las operaciones unitarias claves en la ingeniería química, ya que se utiliza para incrementar la concentración de sólidos de soluciones líquidas por eliminación de disolvente por ebullición. El objetivo de la evaporación es concentrar una disolución consistente en un soluto no volátil y un disolvente no volátil. En la mayoría de los casos, la evaporación se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa.

Entre las aplicaciones de la evaporación están; la concentración de soluciones acuosas de sal, azúcar, hidróxido de sodio, glicerina, leche y jugo de naranja.

Los sistemas de evaporadores industriales normalmente constan de: Un intercambiador de calor para aportar calor sensible y latente de evaporación al alimento líquido. Para lograr esto se utiliza generalmente vapor de agua. Un separador en el que el vapor se separa de la fase líquida concentrada, un condensador para condensar el vapor producido y una bomba de vacío.

En las plantas de proceso existen muchos tipos de evaporadores, cuya clasificación generalmente se basa en el diseño de su intercambiador de calor.

### ***Métodos de operación de evaporadores***

En cualquier operación de evaporación, el costo más importante del proceso es el vapor de agua consumido. Por lo tanto los métodos que tiendan a reducir este consumo (o de economía) son muy atractivos.

Cuando se utiliza un solo evaporador, el vapor procedente del líquido en ebullición se condensa y se desecha. Este método recibe el nombre de evaporación de *simple efecto*. De otra forma; si el calor suministrado en el primer efecto se utiliza para vaporizar al solvente; este vapor, a su vez, se utiliza como medio de calentamiento del siguiente efecto y así sucesivamente, hasta que el vapor generado en el último efecto se envía al condensador, este método de operación de evaporadores en serie es el llamado evaporación de *múltiple efecto*.

Es de esperar entonces que la presión en el efecto donde se produzca el calentamiento, tenga una presión inferior que el efecto anterior; normalmente, el primer efecto se encuentra a presión superior a la atmosférica o a la atmosférica y el segundo y los demás siguientes han de estar por ello al vacío.

Dada la naturaleza del proceso, la evaporación es una de las operaciones unitarias que requiere un mayor consumo de energía. Es por ello que la evaporación en múltiple efecto es comúnmente utilizada en las industrias químicas, ya que es una manera muy efectiva de minimizar el consumo de energía y el agua de enfriamiento empleada en el condensador.

Es conveniente señalar que debido a razones económicas, se acostumbra diseñar a estos evaporadores de tal manera que sean del mismo tamaño, es decir, que sus áreas de transferencia de calor sean iguales.

En el estudio de los evaporadores de múltiple efecto, cada uno se denomina "cuerpo o efecto" y se van a numerar siempre en la dirección del flujo del vapor de agua producida.

El presente trabajo se enfoca a los cálculos de diseño de este último tipo de arreglo, por lo que se describirá a continuación con mayor detalle.

### *Métodos de alimentación en evaporadores de múltiple efecto*

Para el diseño de un sistema de múltiple efecto se debe tomar una decisión para ensamblar el diagrama de flujo. Esto tiene que ver con la dirección del flujo del líquido a concentrar.

Existen diversas formas en que la solución a concentrar puede ser alimentada a los evaporadores de múltiple efecto, las más comunes pueden ser:

- 1) *Corriente directa o paralela*. La solución a concentrar se alimenta al primer efecto y fluye hacia el siguiente evaporador en la misma dirección que el vapor de calefacción. La concentración de la solución aumenta desde el primer efecto hasta el último.
- 2) *Contracorriente*. La alimentación entra en el último evaporador y se retira como producto concentrado en el primer efecto.
- 3) *Corrientes mixtas*. Se trata de una combinación de los tipos de arreglos anteriores para formar un arreglo diferente.

La elección de alguno de estos arreglos depende principalmente de las características de la solución a concentrar.

El problema de determinar la dirección de la alimentación es, como muchos problemas de transferencia de calor, una consideración económica. Los flujos a contracorriente pueden o no conducir a menor superficie de calentamiento, dependiendo de la cantidad de agua que vaya a evaporarse y de la viscosidad de la solución final. El costo de vapor será menor para flujos a contracorriente si la alimentación está fría, y menor para los flujos paralelos si el licor que se alimenta está aproximadamente a la temperatura de operación del primer efecto, o mayor. El cálculo de problemas para ambos métodos establecerá realmente las relaciones de operación más favorables.

A manera de ejemplo, un sistema de evaporación de tres efectos en corrientes paralelas se ilustra en la Figura 1.

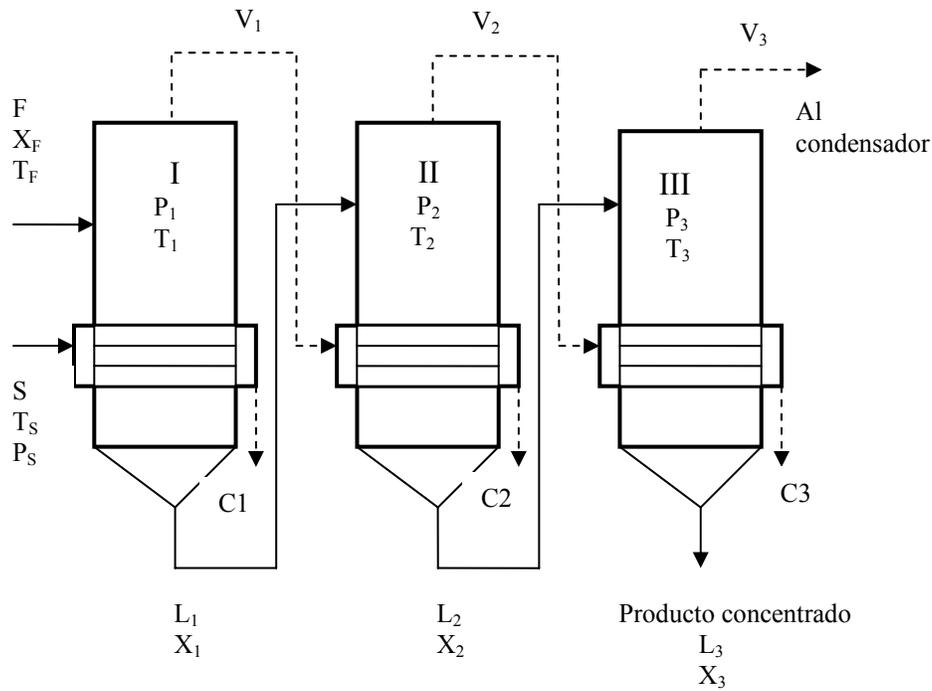


Figura 1. Triple efecto con flujo en paralelo

En la literatura se encuentran diversos autores que han propuesto distintos métodos para el diseño de evaporadores de múltiple efecto, por lo general estos métodos se basan en balances rigurosos de materia y energía que se utilizan para el diseño conceptual de sistemas de evaporación, estos métodos esencialmente son de prueba y error, de acuerdo el siguiente procedimiento; para tres efectos:

1. Proponer temperaturas de ebullición en el primer y segundo efecto.
2. Suponer las cantidades evaporadas en el primero y segundo efecto, obtener las corrientes de licor concentrado por efecto, así se obtendrán las composiciones aproximadas y las elevaciones también aproximadas de los puntos de ebullición.
3. Como se conocen ya las elevaciones, puede determinarse la caída efectiva de temperatura de trabajo y distribuirse entre los efectos.
4. Por las ecuaciones de los balances de energía calcular la evaporación en el primero y segundo efectos. Si difieren considerablemente de las propuestas en el paso 2, repetir los pasos 2 y 3 con las cantidades evaporadas que se acababan de calcular.
5. Con las ecuaciones de transmisión de calor, calcular la superficie de calefacción necesaria para cada efecto.

6. Si las superficies así calculadas no son esencialmente iguales para los tres efectos revise la distribución de temperaturas hecha en el paso 3. A no ser que las elevaciones en el punto de ebullición sean muy grandes, esto no afectara apreciablemente las elevaciones supuestas en el paso 2.

Repetir estos ajustes hasta que las superficies de calefacción sean iguales.

Los principales inconvenientes de este procedimiento son: Se requiere hacer una buena estimación en la primera etapa para evitar un número excesivo de iteraciones en la solución del problema.

Los cálculos de los balances de energía se hacen muy complejos si la solución 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 los EPE en cada efecto.

Debido a lo anterior, el método propuesto en este escrito simplifica notablemente el diseño de evaporadores de múltiple efecto.

### *Metodología*

El método propuesto en este trabajo, se basa en ciertas suposiciones generales, lo que hará la resolución del problema más rápida, aunque posiblemente sacrificando exactitud, pero es una forma ágil de calcular evaporadores de múltiple efecto.

El procedimiento completo del algoritmo en cuestión consta de las siguientes etapas:

1. Datos del problema. Los datos iniciales que se requieren en este caso son:
  - El número de efectos (N)
  - El tipo de sistema de alimentación (paralelo, contracorriente, etc)
  - El flujo de la alimentación(F)
  - La presión y/o temperatura del vapor vivo ( $P_S$  o  $T_S$ ) (se supone saturado)
  - La presión o temperatura de saturación del último efecto ( $P_N$  o  $T_{bN}$ )
  - Los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor para cada uno de los efectos ( $U_1, U_2, \dots, U_N$ )
  - La concentración de la alimentación ( $X_F$ ) y del producto o final ( $X_i$ )
2. Datos de tablas. Con los datos iniciales se puede recurrir a tablas de vapor para calcular los datos siguientes:
  - Calor latente de vaporización del vapor vivo ( $\lambda_S$ )
  - Calor latente de vaporización del vapor en el último efecto ( $\lambda_N$ )
  - Temperatura de ebullición del agua correspondiente a la presión de operación en el último efecto ( $T_{bN}$ )

3. Balances de materia. En esta etapa se calculan, mediante balances de materia, los flujos másicos de las corrientes del licor concentrado y del vapor total generado  $V_T$ . En el caso de la primera, la corriente de este producto puede salir en cualquier efecto, dependiendo del sistema de alimentación que se esté utilizando. Si la alimentación es en corriente directa, la disolución concentrada saldrá del último efecto  $L_N$ ; si es en contracorriente saldrá del primer efecto  $L_1$  y si es en corriente mixta podrá salir en cualquier efecto, inclusive efectos intermedios  $L_i$ . El cálculo es similar en todos los casos. En general:

$$F_{i-1} = L_i + V_i \quad \text{Balance de materia} \quad (1)$$

$$F_{i-1} X_{Fi-1} = L_i X_i \quad \text{Balance para el soluto} \quad (2)$$

$$\sum V_i = V_T = F_{i-1} - L_i \quad \text{Capacidad del sistema} \quad (3)$$

Posteriormente, se supone que existe la misma cantidad de agua evaporada en todos los efectos de forma que:

$$V_i = \frac{V_T}{N} \quad (4)$$

Con estos valores es posible calcular los valores de la concentración de la solución en cada efecto  $X_i$ , cabe señalar que estos valores obtenidos se tomarán constantes para los cálculos;

$$X_i = \frac{F_{i-1} X_{Fi-1}}{(F_{i-1} - \sum V_i)} \quad (5)$$

$$\sum V_i = F_{i-1} - L_i = F_{i-1} \left( \frac{X_i - X_{Fi-1}}{X_i} \right) \quad (6)$$

Estos valores podrían servir para calcular los valores faltantes de todas las  $L_i$ .

4. Cálculo de EPE. Mediante el dato de la concentración por efecto  $X_i$  y con la gráfica de Dühring, ecuación o nomograma se evalúa la EPE. Se supone por conveniencia que la EPE para cada efecto en operación de efecto múltiple, es constante e independiente de la presión. A una composición dada o a una fracción de masa  $X_j$ , la temperatura  $T_i$  y  $T_{bi}$  para el evaporador  $i$  están relacionadas por la línea de Dühring.

$$EPE_i = mX_i^2 + bX_i + c \quad (7)$$

donde

$m$ ,  $b$  y  $c$  son; pendiente, ordenada y constante de la línea de Dühring que dependen del tipo de sólidos; evaluadas a la fracción en masa  $X_i$  del soluto en el licor que sale del efecto  $i$ .

Por lo tanto

$$EPE_i = T_i - T_{bi} = \text{constante} \quad (8)$$

Con estos valores se calcula la sumatoria de las EPE.

$$\sum EPE = EPE_1 + EPE_2 + EPE_3 + \dots + EPE_N \quad (9)$$

5. Cálculo de  $\Delta T_E$ . Este parámetro se define como la diferencia de temperaturas efectivas o útiles en el sistema, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta T_E &= \Delta T_T - \sum EPE \\ \text{donde} & \\ \Delta T_T &= T_s - T_{bi} \end{aligned} \quad (10)$$

es decir, la  $\Delta T_T$  es la diferencia entre la temperatura del vapor vivo y la temperatura de ebullición del agua correspondiente a la presión en el efecto i.

6. Cálculo de  $\Delta T_i$ . Con el valor de  $\Delta T_E$ , calculado en la etapa anterior, se puede calcular la diferencia de temperatura entre el vapor de calentamiento y la de la solución en cada efecto, mediante las ecuaciones siguientes:

$$\Delta T_E = \Delta T_T - \sum EPE = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3$$

pero

$$\Delta T_1 = \frac{Q_1}{U_1 A_1}$$

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{U_2 A_2}$$

$$\Delta T_3 = \frac{Q_3}{U_3 A_3}$$

Considerando que la cantidad de calor transferido y que las áreas de transferencia de calor son iguales en todos los efectos, y sustituyendo,

$$\Delta T_E = \frac{Q}{A} \left( \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} \right)$$

Para el efecto i,  $\Delta T_i U_i = \frac{Q}{A}$

$$\Delta T_E = \Delta T_i U_i \left( \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3} \right)$$

Despejando,

$$\Delta T_i = \frac{\Delta T_E}{U_i \sum \left( \frac{1}{U_i} \right)} \quad (11)$$

Nota: Cuando se opera en corriente en paralelo, la alimentación entrará fría, por lo tanto será necesario tener un valor de  $\Delta T_1$  mayor que el obtenido en el cálculo (20 % mayor) esto hace que los demás se modifiquen, bajarlos en un 10 % cada uno.

7. Cálculo de  $T_i$ . Los valores calculados en la etapa anterior sirven para calcular las temperaturas de ebullición de la solución en cada efecto.

$$\Delta T_i = T_i - T_{bi-1}$$

Por ejemplo para el primer efecto

$$T_1 = T_s - \Delta T_1 \quad (12)$$

con este valor de temperatura y con la elevación en el punto de ebullición en el primer efecto  $EPE_1$  servirá para calcular la temperatura de saturación.

$$T_{b1} = T_1 - EPE_1 \quad (13)$$

8. Datos de tablas, ecuaciones o gráficas. Con los últimos datos obtenidos en la etapa anterior, se tienen todas las temperaturas de cada uno de los efectos del sistema de evaporación. Estos valores servirán para calcular, mediante tablas de vapor, las entalpías de vapor saturado y/o el calor latente de vaporización del vapor de agua generado en cada efecto ( $\lambda_i$ )

9. Cálculo del área de transferencia de calor en cada efecto  $A_i$ . El objetivo de los cálculos de diseño de un sistema de evaporación es la determinación del área de transferencia de calor en cada efecto. En esta etapa se tienen todos los datos para poder realizar este cálculo, mediante la ecuación siguiente:

$$A_i = \frac{Q_i}{U_i \Delta T_i} \quad (14)$$

Así,  $Q_1 = S \lambda_s$  (primer efecto) (15)

o en general  $Q_i = V_i \lambda_i$  (efecto i, donde  $i > 1$ ) (16)

Para calcular el calor  $Q_1$ , es necesario calcular la economía del sistema, y así evaluar  $S$ , y se define así,

$$\text{Economía} = E = \frac{\text{Capacidad}}{\text{Consumo}} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{S} \quad (17)$$

La economía del sistema, medida en kg de agua evaporada por kg de vapor de calefacción condensado, aumenta con el número de efectos, así, en forma ideal, en un sistema de N efectos, 1 kg de vapor de calefacción introducido en el primer efecto evaporará en total aproximadamente N kg de líquido. Esta es una cifra simplificada, pero se pone de manifiesto que una de las grandes ventajas de un sistema de múltiple efecto es precisamente ésta.

En consecuencia, cuando una solución presenta EPE debido al cambio de concentraciones, este concepto se modifica. Cualquiera que sea el valor de EPE para una disolución considerada, hace que la diferencia de temperatura útil disminuya con el número de efectos. Este hecho no solo influye sobre la economía por obligarnos a aumentar la superficie de calefacción de cada efecto, sino que puede anular la capacidad de evaporación del sistema cuando el número de efectos sea grande o el EPE sea muy grande. Bajo este argumento, se hace la siguiente consideración: 1 kg de vapor suministrado de una etapa rinde normalmente de 0.8 a 0.85 kg de vapor de la siguiente (para el algoritmo propuesto, se supone  $E = 0.83$ ). La cantidad de vapor  $V$  removida durante el primer efecto es; por tanto,

$$V_1 = SE \quad (18)$$

El vapor del segundo efecto es,

$$V_2 = V_1 E = SE^2 \quad (19)$$

o el vapor de cualquier efecto es

$$V_i = SE^i \quad (20)$$

donde  $i$  es el número de etapa. Si  $N$  representa el número total de etapas, el vapor combinado y removido de la corriente en todos los efectos es,

$$V_{,\Sigma} = \sum_{i=1}^N V_{,i} = S \sum_{i=1}^N E^i \quad (21)$$

Resulta que el consumo de vapor es;

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\sum_{i=1}^N E_i} \quad (22)$$

11. Cálculo del área promedio,  $A_m$ . El área a utilizar en el sistema de evaporación será el área media aritmética utilizando la siguiente ecuación:

$$A_m = \frac{\sum A_i}{N} \quad (23)$$

## Resultados

Con el fin de comprobar la efectividad de esta metodología, se resolvió un problema típico de evaporación cuyos resultados se encuentran en la literatura. Se utilizó un programa computacional llamado EES (Engineering Equation Solver) como herramienta para la solución de este problema. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1.

	Área promedio m <sup>2</sup>	Consumo de vapor kg/hr	Cantidad evaporada por efecto, kg/hr			Economía
Ejemplo 5-5 [1]	357	19340	13200	13650	13150	2.06
<b>Método propuesto</b>	<b>354</b>	<b>20492</b>	<b>13333</b>	<b>13333</b>	<b>13333</b>	<b>2.091</b>
Ejemplo 8.5-1 [5]	105	8960	5675	6053	6416	2.025
<b>Método propuesto</b>	<b>108.1</b>	<b>8678</b>	<b>6048</b>	<b>6048</b>	<b>6048</b>	<b>2.091</b>
Ejemplo 16.3 [6]	66.1	8786	6492	6492	7418	2.48
<b>Método propuesto</b>	<b>49.15</b>	<b>9772</b>	<b>6810</b>	<b>6810</b>	<b>6810</b>	<b>2.091</b>
Ejemplo 3-16 [7]	98	7220	6480	5580	4610	2.3
<b>Método propuesto</b>	<b>96.5</b>	<b>7972</b>	<b>5556</b>	<b>5556</b>	<b>5556</b>	<b>2.091</b>

## Conclusiones

El algoritmo que se propone en este trabajo ha sido probado y comparado con éxito utilizando diferentes problemas reportados en la literatura, alcanzando valores aceptables como resultado en mucho menos tiempo. Asimismo, ha funcionado adecuadamente para diferentes tipos de sistemas de alimentación, mediante ajustes correspondientes en los balances de materia y energía.

## Bibliografía:

1. Badger Walter/Banchero Julius. (1984) *Introducción a la Ingeniería Química*, México: Editorial Mc Graw Hill.
2. Edgar, T.F; Himmelblau, D.M. (1989) *Optimization of chemical processes*, NY, USA: Editorial McGraw Hill.
3. Estrada C. Alberto/Flores, L. A. (2000) "Algoritmo para el diseño conceptual de evaporadores de múltiple efecto" *Tecnología, Ciencia y Educación IMIQ*, México: Vol 15, Número 1. pp 12 – 22
4. Geankoplis, Ch. J. (2004) *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3ª Edición, México: Editorial CECSA.
5. Holland Ch. D. (1981) *Fundamentos y modelos de procesos de separación*, España: Editorial Dossat.

6. McCabe, Warren/Smith, Julian/Harriott, P. (2003) *Operaciones unitarias en ingeniería química*, México: Editorial McGraw Hill.
7. Ocon J, Tojo G; (1978) *Problemas de Ingeniería Química (operaciones básicas)* España: Editorial Aguilar.
8. Ulrich, G.D. (1986) *Diseño y economía de los procesos de ingeniería química*, México: Editorial Mc Graw Hill.