

4

Cálculo de evaporadores de múltiple efecto en paralelo: Parte I modelo matemático y análisis del mismo

S. ESPLUGAS VIDAL
J. MATA ALVAREZ
J. COSTA LOPEZ

Departamento de Química Técnica de la Facultad
de Química de la Universidad de Barcelona

En el presente artículo se desarrolla el modelo matemático de un sistema de evaporadores de múltiple efecto operando en paralelo. Se analiza asimismo el modelo matemático para hallar el número de grados de libertad del sistema y la forma de consumir estos grados de libertad

INTRODUCCION

La evaporación es una operación unitaria consistente en separación de un líquido de una disolución, pasándolo a su forma gaseosa mediante un aporte de calor. Hay transferencia de calor; la presión para llevar a este componente a la fase gaseosa y transferencia de materia líquido-vapor. Como la transferencia de calor es limitante, la evaporación suele englobarse en las operaciones unitarias de transmisión de calor.

Generalmente, el aporte del calor necesario para llevar a cabo la evaporación suele realizarse con vapor de agua a presión. Si la disolución a evaporar es una solución acuosa, puede comprobarse numéricamente que por cada kilo de vapor de agua que condense se evaporará, aproximadamente, un kilo de agua de la disolución, pero este vapor que se formará irá a una presión más baja. Lógicamente, para realizarse el proceso de calor de la cámara de condensación del vapor a la cámara de evaporación de la disolución, la temperatura a que condense el vapor vivo debe ser superior a la de ebullición de la disolución en la cámara de evaporación, lo cual se puede lograr cuando en la cámara de condensación a una presión mayor que en la de ebullición. Algo análogo ocurrirá en el caso de disoluciones no acuosas, aunque en estos casos no necesariamente debe ser así. La presión en la cámara de condensación debe ser mayor que la de la cámara de evaporación. Como en la condensación de un vapor de una disolución la temperatura de ebullición de la disolución a la diferencia de temperaturas ΔT entre

ambas cámaras será constante; lo que constituye una de las principales diferencias entre un cambiador de calor y un evaporador.

Como se ha mencionado anteriormente, en la cámara de evaporación sale vapor a la temperatura de ebullición de la disolución. Este vapor tendrá un cierto contenido energético que puede aprovecharse. El aprovechamiento de esta energía mejorará la economía del proceso, sobre todo cuando deban eliminarse grandes cantidades de líquido de la solución a concentrar. Para aprovechar esta energía existen diversos procedimientos; uno posible consistiría en reciclar este vapor a la cámara de condensación del mismo evaporador; no obstante, este procedimiento tiene el inconveniente de la necesidad de un compresor para pasar este vapor a una presión más elevada, la de la cámara de condensación, con el problema adicional de un posible recalentamiento de este vapor debido a la compresión. Cuando la cantidad de líquido a evaporar no es muy grande, suele utilizarse lo anteriormente mencionado, que recibe el nombre de termocompresión. Pero cuando deben evaporarse grandes cantidades de líquido es preferible la utilización de múltiples efectos, es decir, evaporar la disolución en una cascada de evaporadores.

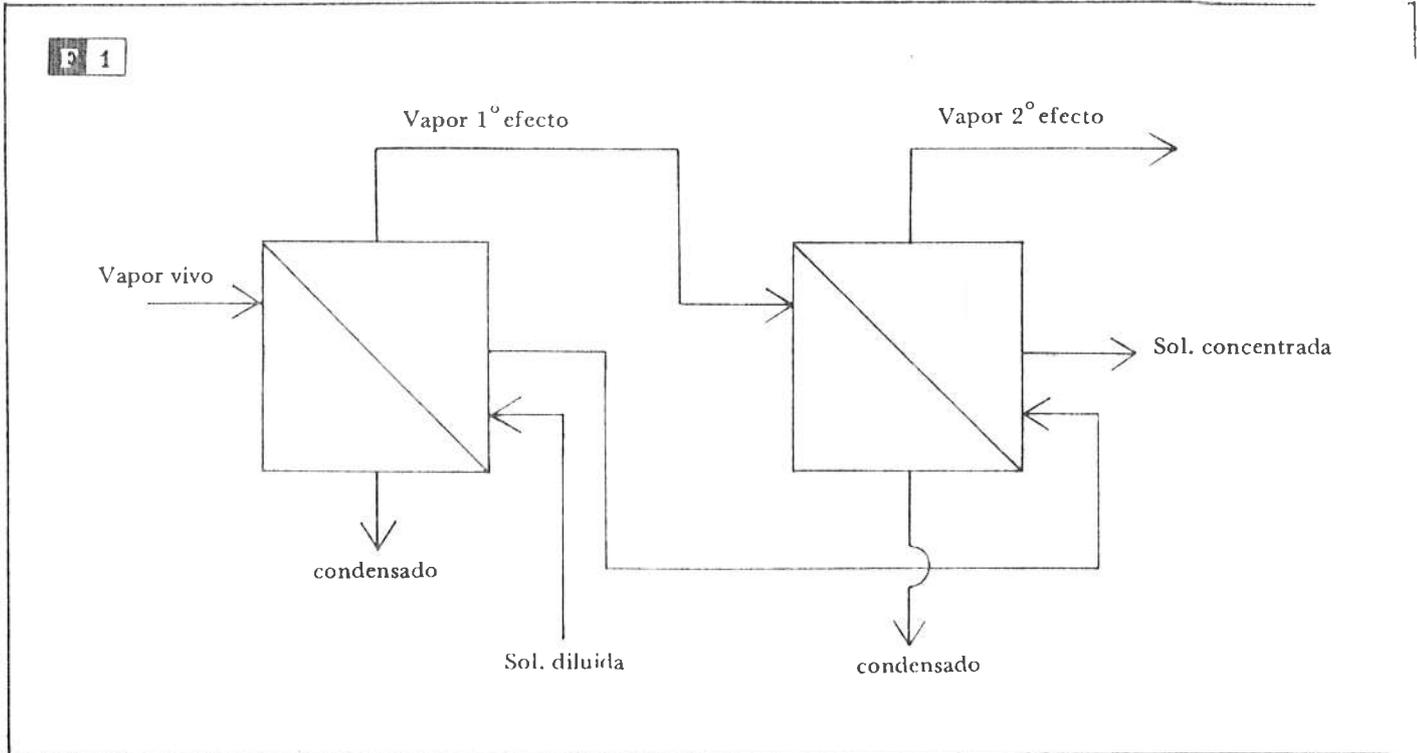
Hay diversas formas de evaporar en múltiple efecto, destacando la operación en paralelo o corriente directa y la operación en contracorriente.

La operación en paralelo, tal como se indica en la figura 1, consiste en utilizar el vapor producido en cada efecto (evaporador) como medio calefactor del efecto siguiente. Asimismo,

la solución a concentrar sigue el mismo recorrido que estos vapores y para lograr la necesaria diferencia de temperaturas entre las cámaras de condensación y evaporación debe realizarse un vacío en el último efecto, de forma que las presiones en las cámaras de evaporación sean menores a medida que aumente el número del efecto. En la figura 1 se muestra un evaporador de doble efecto y, de acuerdo con lo mencionado anterior-

mente, la presión en la cámara de evaporación del 2º efecto debe ser menor que la de la cámara de evaporación del primero.

La operación en contracorriente es análoga a la de corriente directa, con la diferencia de que la disolución a concentrar hace el recorrido al revés que el vapor, debido a lo necesario intercalar entre los evaporadores bombas para la circulación de la disolución a concentrar.



MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático consistirá en los diferentes balances de materia y energía y demás relaciones que se puedan realizar alrededor de cada efecto (Ver figura 2). Se supondrá alcanzado el estado estacionario.

Balances de materia

Si L_j es el caudal de disolución que sale del efecto i , y V_j el caudal de vapor producido en este efecto, el balance global de materias resulta:

$$L_{i-1} = L_i + V_i \quad (1)$$

Asimismo, si x_i es la fracción másica de soluto que sale del efecto i , el balance de soluto será:

$$L_{i-1} \cdot x_{i-1} = L_i \cdot x_i \quad (2)$$

Los balances de materias alrededor de los N efectos se obtendrán realizando el sumatorio desde 1 hasta N de las ecuaciones 1 y 2, resultando:

$$L_0 = L_N + \sum V_i \quad (3)$$

$$L_0 \cdot x_0 = L_N \cdot x_N \quad (4)$$

donde L_0 es el caudal de disolución alimentada al primer efecto que presenta una concentración en soluto de x_0 ; L_N y x_N son, respectivamente, el caudal y composición de la solución que sale del último efecto.

Estas ecuaciones 3 y 4, a pesar de ser combinación lineal de las anteriores, resultan de interés en el momento de resolver numéricamente el modelo matemático.

Balances de energía

Si Q_i es el caudal de calor transferido entre la cámara de condensación y la de evaporación del efecto i , H_i la entalpía del vapor que sale de la cámara de evaporación del efecto i y h_i la del líquido que condensa en la cámara de condensación del efecto i , al realizar un balance de Energía en la zona

de condensación resulta:

$$Q_i = V_{i-1} \cdot (H_{i-1} - h_i) \quad (5)$$

Este caudal de calor Q_i es función del coeficiente global de transmisión de calor en este efecto U_i , del área de intercambio A_i y de la diferencia entre la temperatura T_i de la cámara de condensación y la temperatura t_i de la cámara de evaporación; es decir:

$$Q_i = U_i \cdot A_i \cdot (T_i - t_i) \quad (6)$$

Conviene destacar que el valor del coeficiente global de transmisión de calor U_i viene determinado por el tipo de evaporador, temperatura en ambas cámaras, caudales y propiedades físicas de las corrientes de vapor y solución, etc... No obstante, para el diseño sólo es necesaria una buena estimación de los coeficientes U_i .

Definiendo h_i como la entalpía de la disolución que sale del efecto i , se puede realizar un balance de energía alrededor de la cámara de evaporación resultando:

$$Q_i = L_i \cdot h_i + V_i \cdot H_i - L_{i-1} \cdot h_{i-1} \quad (7)$$

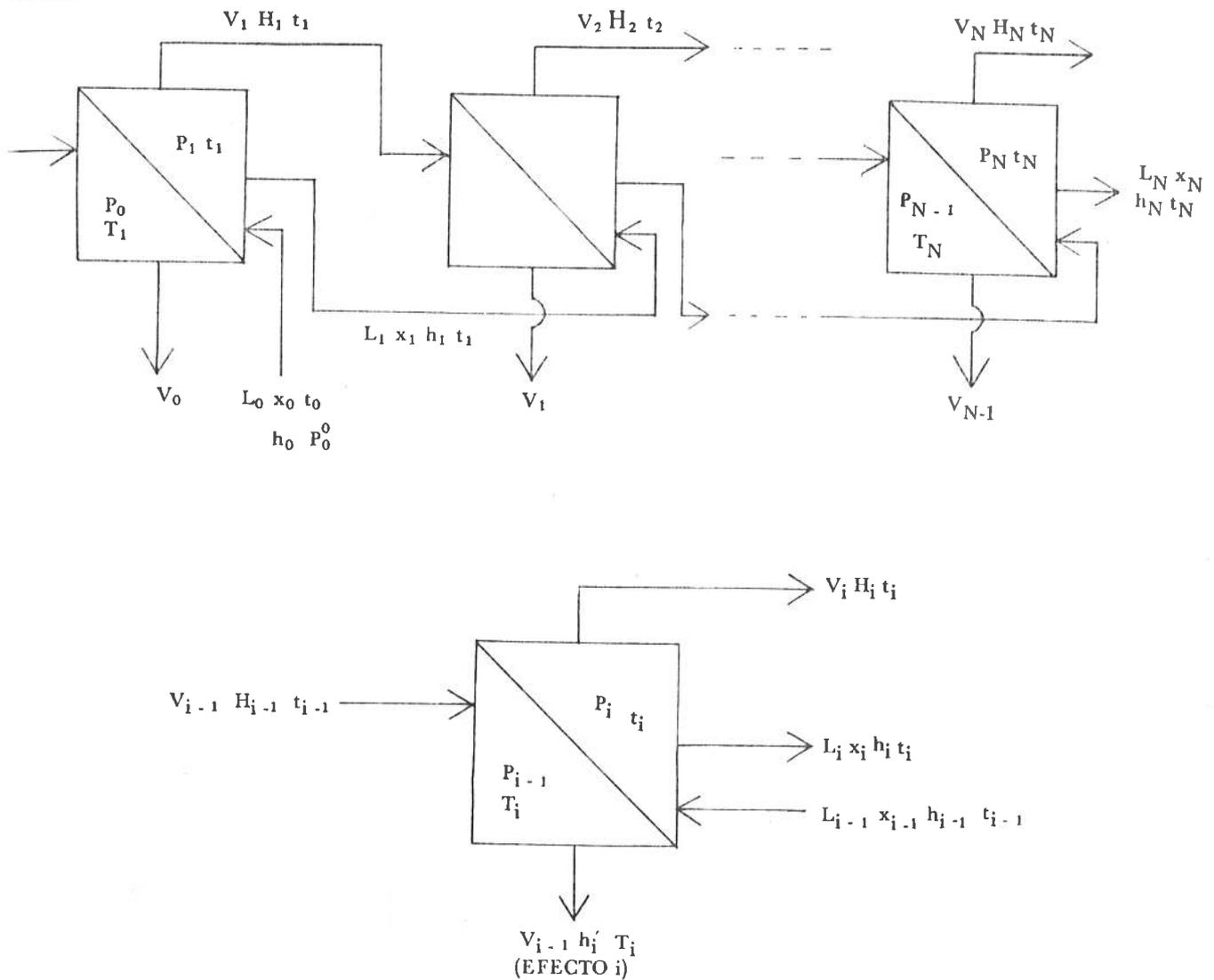
No resulta de utilidad la realización de un balance de energía alrededor de los N evaporadores.

Relaciones

Dentro de estas relaciones se incluyen ecuaciones de estado y condiciones de equilibrio en las cámaras de condensación y evaporación de cada efecto que deben tenerse en cuenta en el modelo matemático.

En la cámara de ebullición la temperatura t_i puede suponerse constante e igual a la ebullición del líquido que sale de dicha cámara. Esta temperatura t_i es función de la presión P_i a la que está sometida esta cámara, y para soluciones que presenten un aumento apreciable del punto de ebullición también será función de la composición en soluto x_i ; es decir,

F 2



general:

$$t_i = f_1(P_i, x_i) \quad (8)$$

En la cámara de evaporación del efecto i saldrá vapor a una presión P_i y temperatura t_i , vapor que, en caso de disoluciones con aumento del punto de ebullición: sobrecalentado y condensará, por tanto, en el efecto siguiente, a una temperatura T_{i+1} más baja, tal que:

$$T_{i+1} = t_i - (\Delta T_e)_i \quad (9)$$

La elevación de la temperatura de ebullición existente en el efecto i a las condiciones de presión y x_i de concentración respecto a la de ebullición del solvente puro libre de soluto a la misma presión general, esta elevación de la temperatura de ebullición es función de la composición, aunque a veces deba tenerse en cuenta la influencia de la presión. Para disoluciones acuosas la relación vendría expresada por la conocida ley de Raoult, por lo general:

$$t_i = f_2(P_i, x_i) \quad (10)$$

Por lo general, en el caso de que la disolución a tratar no presente un aumento apreciable en la temperatura de ebullición, las temperaturas en las cámaras de ebullición sólo serán

función de las presiones en dichas cámaras, cumpliéndose además que la temperatura de la cámara de evaporación de cada efecto será igual a la de la cámara de condensación en el efecto siguiente, es decir, $T_{i+1} = t_i$; obteniéndose además todas las corrientes de vapor como vapores saturados. Esta simplificación, que muchas veces puede realizarse, da lugar a una resolución del modelo matemático más sencilla.

Por lo que respecta al vapor saturado o sobrecalentado que salga de cada efecto, su entalpía H_i será función de la temperatura del mismo t_i y de la presión que posea P_i . Por tanto:

$$H_i = f_3(P_i, t_i) \quad (11)$$

La entalpía h_i de la disolución que sale de cada efecto es función de su presión P_i , temperatura t_i y composición x_i . Para muchas disoluciones acuosas puede considerarse con poco error coincidente este valor de la entalpía con la temperatura de la disolución t_i . Pero en general:

$$h_i = f_4(P_i, t_i, x_i) \quad (12)$$

La entalpía h'_i del condensado que sale del efecto i es función de su presión P_{i-1} y temperatura T_i , aunque análogamente, como en el caso anterior, puede en ciertos casos considerarse igual a la temperatura del condensado T_i . Por lo general:

$$h_i' = f_5 (P_{i-1}, T_i) \tag{13}$$

Se supondrá que en el primer efecto se introduce vapor de agua saturado a la presión P_0 , por lo cual la entalpía del mismo H_0 es función exclusiva de su presión P_0

$$H_0 = f_6 (P_0) \tag{14}$$

y la temperatura del mismo T_1 será función de su presión P_0

$$T_1 = f_7 (P_0) \tag{15}$$

temperatura que coincide con la de condensación en el primer efecto.

La entalpía de la alimentación h_0 es función de la presión de la disolución alimentada P_0^0 , de su temperatura t_0 y composición x_0

$$h_0 = f_8 (P_0, t_0, x_0) \tag{16}$$

ANÁLISIS DEL SISTEMA

En primer lugar, debe contarse el número de ecuaciones independientes existentes en el modelo matemático, para lo cual es conveniente agrupar estas ecuaciones independientes en una tabla. Se ha construido la tabla 1, en la cual se indica, además de la ecuación, el número de ecuaciones existentes de cada tipo.

T I		Ecuación	n° ecuaciones
(1)	$L_{j+1} = L_j + V_j$		N
(2)	$L_{j+1} \cdot x_{i+1} = L_j \cdot x_i$		N
(5)	$Q_j = V_{j+1} \cdot (H_j - h_j')$		N
(6)	$Q_j = U_j \cdot A_j \cdot (T_j - t_j)$		N
(7)	$Q_j = L_j \cdot h_j + V_j \cdot H_j + L_{j+1} \cdot h_{j+1}$		N
(8)	$t_j = f_1 (P_j, x_j)$		N
(9)	$T_{j+1} = t_j - (\Delta T_e)_j$		N-1
(10)	$(\Delta T_e)_j = f_2 (P_j, x_j)$		N
(11)	$H_j = f_3 (P_j, t_j)$		N
(12)	$h_j = f_4 (P_j, t_j, x_j)$		N
(13)	$h_j' = f_5 (P_{j-1}, T_j)$		N
(14)	$H_0 = f_6 (P_0)$		1
(15)	$T_1 = f_7 (P_0)$		1
(16)	$h_0 = f_8 (P_0^0, t_0, x_0)$		1
Total ecuaciones			11N + 2

De acuerdo con la tabla 1, el número total de ecuaciones que resultan es de $11.N+2$.

A continuación debe evaluarse el número de variables existentes en el modelo matemático; para lo cual se ha realizado la tabla 2, donde se indica el tipo de variable y el número de las mismas.

T II		Variables	L_j	V_j	x_i	H_j	h_j	h_j'	Q_j	U_j
Número		N+1	N+1	N+1	N+1	N+1	N	N	N	N
Variables		A_j	T_j	t_j	P_j	P_0^0	$(\Delta T_e)_j$			
Número		N	N	N+1	N+1	1	N			
Total variables.....13N+8										

el total de variable que resulta es $13.N+8$, lógicamente superior al de ecuaciones.

De acuerdo con el número de ecuaciones y el de variables, el número de grados de libertad resulta:

$$n^\circ \text{ grados libertad} = n^\circ \text{ ecuaciones} - n^\circ \text{ variables}$$

por tanto,

$$n^\circ \text{ grados libertad} = 2.N + 6$$

Para la resolución del modelo matemático deberán consumirse estos $2.N + 6$ grados de libertad, introduciendo un total de $2.N + 6$ relaciones conocidas entre las distintas variables.

Definiendo N relaciones que ligen los valores de U_j con las demás variables del sistema, se consumirán N grados de libertad. En ciertos casos estos valores de U_j pueden tomarse como constantes e iguales a ciertos valores numéricos.

Otra suposición bastante lógica consiste en considerar que las áreas de los diversos efectos sean iguales. Esto equivale a $N - 1$ relaciones.

$$A_i = A$$

tomando entonces el modelo matemático, como objetivo principal, el cálculo de estas áreas. La aplicación de esta suposición simplifica los cálculos del modelo, pues esta suposición implica que la diferencia de temperaturas entre la de condensación y evaporación sea:

$$T_j - t_j = \frac{(Q_j/U_j) \cdot \Delta T}{\sum_1 (Q_j/U_j)}$$

siendo

$$\Delta T = (T_1 - t_N) - \sum (\Delta T_e)_j \tag{19}$$

o sea, la diferencia entre la temperatura de condensación del primer efecto y la de ebullición en el último, menos los sucesivos incrementos de temperaturas de ebullición de las disoluciones, se reparte entre los diferentes efectos según el valor de (Q_j/U_j) .

De acuerdo con lo anterior, quedan todavía por consumir siete grados de libertad; cuatro de los cuales pueden consumirse definiendo la corriente de alimentación, es decir, el caudal de alimentación L_0 , su composición x_0 , temperatura t_0 y presión P_0 . Los tres grados de libertad restantes pueden consumirse definiendo la concentración de soluto a la salida del sistema de evaporadores x_N , la presión P_0 del vapor vivo al primer efecto y la presión P_N a la cual se operará en la cámara de evaporación del último efecto. Como puede observarse, todas estas condiciones vienen a ser las características de entrada y salida al sistema de evaporadores.

NOMENCLATURA

- A = área del evaporador, m^2
- H = entalpía del vapor, Kcal/Kg
- h = entalpía de la disolución, Kcal/Kg
- h' = entalpía del líquido, Kcal/Kg
- L = caudal de disolución, Kg/h.
- N = número de efectos
- P = presión, atm
- Q = caudal de calor transferido, Kcal/h
- T = temperatura en la cámara de condensación, °C.
- t = temperatura en la cámara de evaporación, °C.
- ΔT = diferencia real de temperaturas, °C.
- ΔT_e = incremento de la temperatura de ebullición, °C.
- U = coeficiente global de transmisión de calor, Kcal/($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$)
- V = caudal de vapor, Kg/h
- x = fracción másica
- Subíndices y superíndices
- i = número del efecto
- o = condiciones de entrada

BIBLIOGRAFIA

McCabe-Smith, Operaciones básicas de Ingeniería Química, Ed. Reverté (1975)
 Foust, Principios de Operaciones Unitarias, Ed. CECSA, (1970)
 Vián-Ocon, Elementos de Ingeniería Química, Ed. Aguilar, (1967)
 Kern, Procesos de transferencia de calor, Ed. CECSA, (1965)