

6

Cálculo de evaporadores de múltiple efecto en paralelo: Parte II

(resolución del modelo matemático y un ejemplo numérico)

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 expone la resolución mediante calculador digital, del modelo matemático de evaporadores de múltiple efecto que fue publicado en Química e Industria, en el número del pasado mes de febrero

INTRODUCCION

En el anterior artículo "Cálculo de evaporadores de múltiple efecto en paralelo, parte I, se analizó el modelo matemático derivado de los balances de materia y energía, y relaciones de equilibrio aplicados a un evaporador con N efectos. Asimismo se calcularon los grados de libertad del sistema ($2N + 6$), y se indicó la forma más usual de disponer de ellos. Así, normalmente, se suelen fijar los siguientes parámetros: Caudal (L_0), concentración (x_0), temperatura (t_0) y presión (P_0^g) de la solución a evaporar. Concentración de la disolución (x_N) y presión de la cámara de evaporación (P_N) en el último efecto. Presión del vapor vivo a la entrada del primer efecto (P_0). N relaciones para el cálculo de los N coeficientes globales de transmisión de calor U_i . N áreas A_i iguales a un valor constante A. De esta forma queda completamente determinado el modelo matemático de los evaporadores de múltiple efecto.

En el presente trabajo se ha elaborado un algoritmo para la resolución del referido modelo, así como un completo programa de cálculo, el cual ha sido procesado en un calculador HP 9825 (lenguaje HPL).

RESOLUCION DEL MODELO MATEMATICO. EL PROGRAMA DE CALCULO

Como ya se expuso, el modelo matemático está constituido

do por las siguientes ecuaciones, derivadas de los balances de materia y energía:

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

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

$$Q_i = V_{i-1} (H_{i-1} - h_i) \quad (3)$$

$$Q_i = U_i A_i (T_i - t_i) \quad (4)$$

$$Q_i = L_i h_i + V_i H_i - L_{i-1} h_{i-1} \quad (5)$$

y las siguientes relaciones derivadas de las ecuaciones de estado y condiciones de equilibrio en las cámaras de evaporación y condensación:

$$t_i = f_1 (P_i, x_i) \quad (6)$$

$$T_{i+1} = t_i - (\Delta T_e)_i \quad (7)$$

$$(\Delta T_e)_i = f_2 (P_i, x_i) \quad (8)$$

$$H_i = f_3 (P_i, t_i) \quad (9)$$

$$h_i = f_4 (P_i, t_i, x_i) \quad (10)$$

$$h_i' = f_5 (P_{i-1}, T_i) \quad (11)$$

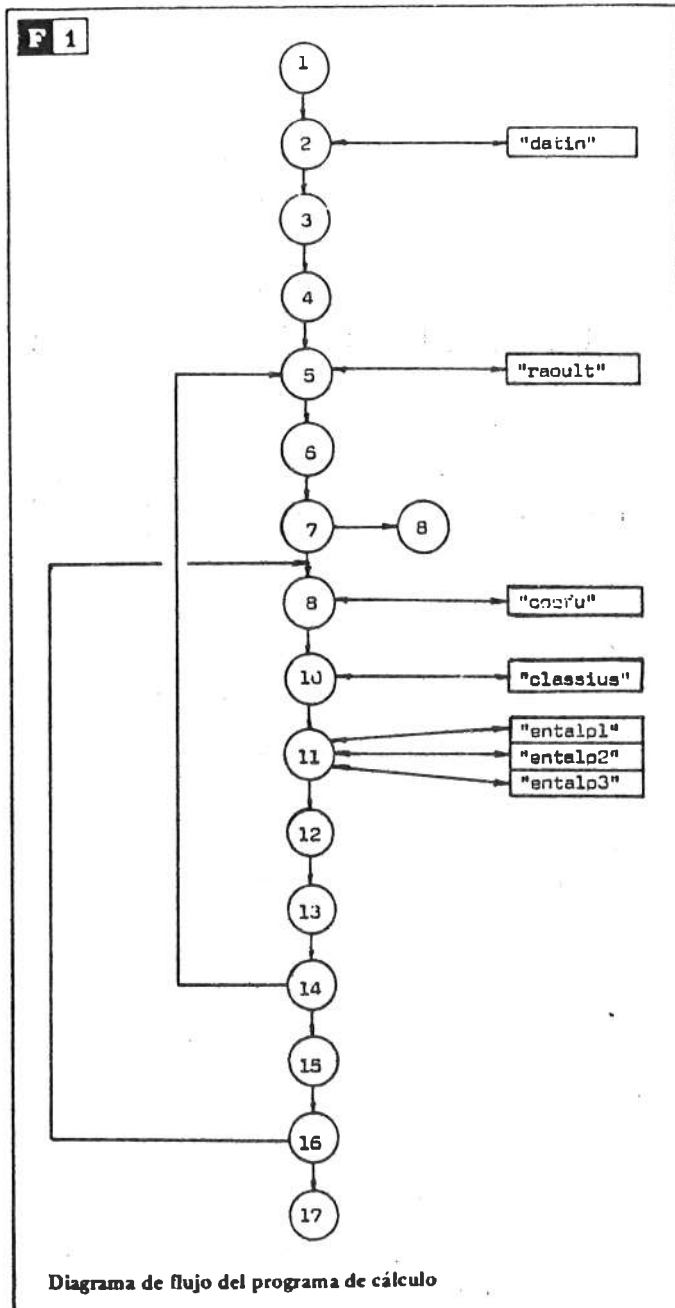
$$H_0 = f_6 (P_0) \quad (12)$$

$$T_0 = f_7 (P_0) \quad (13)$$

$$h_0 = f_8 (P_0, t_0^g, x_0) \quad (14)$$

$$U_i = f_9 (T_i, t_i, \text{fact. geom. y fluidodinam.}) \quad (15)$$

Estas relaciones resultan, claro está, específicas para cada problema y por tanto han sido introducidas como subprogramas en el programa de cálculo. En el ejemplo que se expone más adelante se ofrecen datos concretos acerca de las mismas.



Dado que la resolución de este modelo es necesariamente iterativa se ha procedido a elaborar un programa de cálculo, cuyo diagrama de flujo se expone en la Figura 1. Para facilitar la descripción del mismo, se han señalado mediante números los distintos bloques que lo forman:

Paso 1: Entrada del número de efectos

Paso 2: Entrada de datos para consumir los grados de libertad del sistema. Corresponden a los descritos anteriormente. Asimismo, y mediante la subrutina "datin" se calcula la temperatura del vapor vivo, su entalpía, y la temperatura del líquido concentrado que abandona el último efecto.

Paso 3: Listado de los datos de entrada

Paso 4: Cálculo inicial de un perfil de concentraciones lineal.

Paso 5: De acuerdo con los valores de las concentraciones x_i de soluto en cada efecto, se estima, mediante el subprograma "raoult", el incremento en el punto de ebullición de la disolución.

Paso 6: Cálculo de ΔT definido mediante la ecuación:

$$\Delta T = (T_1 - T_N) - \sum_i (\Delta T_{e_i}) \quad (16)$$

y que, como puede comprobarse corresponde al sumatorio:

$$\Delta T = \sum_i \Delta t_i = \sum_i (T_i - t_i) \quad (17)$$

De esta forma se estima el potencial térmico global del sistema de evaporadores.

Pasos 7 y 8: Cálculo en la 1ª iteración de unos valores para los t_i y los T_i , de acuerdo con una variación lineal de ΔT en el sistema. Se suponen unos valores de Q_i arbitrarios e iguales para todos los efectos.

Paso 9: Cálculo de unos valores para los Δt_i definidos en la ecuación (17) de acuerdo con la relación:

$$T_i - t_i = \frac{(Q_i/U_i)\Delta T}{\sum_i (Q_i/U_i)} \quad (18)$$

Esta última ecuación resulta de aplicar al modelo matemático la simplificación de considerar todas las áreas iguales, y supone que ΔT se reparte entre los sucesivos efectos de acuerdo con el valor de Q_i/U_i .

Los valores de U_i son suministrados por el subprograma "coefu".

Paso 10: De acuerdo con los valores estimados para t_i y con la definición de (ΔT_{e_i}) , se estiman los valores para T_i y para t_i . Asimismo, y con el concurso del subprograma "classius", se calculan los valores correspondientes a las presiones de las cámaras de ebullición P_i de cada efecto.

Paso 11: Cálculo mediante los subprogramas "entalp1", "entalp2" y "entalp3" de las entalpías H_i , h_i y h_i' correspondientes al vapor, líquido en ebullición y condensado respectivamente. Mediante la ecuación 14 se calcula la entalpía del condensado del vapor vivo.

Paso 12: Cálculo iterativo de los valores de V_i y L_i mediante las ecuaciones 1 y la que resulta de igualar la 3 con la 5.

Paso 13: Cálculo mediante la ecuación 3 de los valores de Q_i , y mediante la ecuación 2 de los nuevos valores estimados para las x_i .

Pasos 14 y 15: Si los (ΔT_{e_i}) resultantes al aplicar el subprograma "raoult" los nuevos x_i , son los mismos que en la anterior iteración, se procede al cálculo de las áreas de cada efecto A_i de acuerdo con la ecuación 4, así como del área media resultante. En caso contrario se vuelve al paso 5.

Paso 16: Si las áreas de cada efecto difieren en un valor inferior al 1 por 1000 del valor del área media la iteración se da por finalizada y se procede a la escritura de resultados. En caso contrario se vuelve al paso 9.

Paso 17: Escritura de resultados.

Los subprogramas que intervienen y que han sido mencionados en la descripción del diagrama de flujo, se comentarán brevemente a continuación. Un ejemplo de ellos se encuentra en el estudio de un caso concreto que se realiza más adelante.

Subprograma "raoult". Calcula la elevación del punto de ebullición del líquido por la presencia del soluto. En general se trata de una función de la composición, aunque, a veces, debe considerarse la influencia de la presión (véase ecuación 8). Debe señalarse que, salvo en las disoluciones diluidas en las que se pueden aplicar ecuaciones teóricas, la función deberá basarse en datos experimentales.

Subprograma "coefu". Calcula el valor del coeficiente global de transmisión de calor en cada efecto. En general es una función de las temperaturas en ambas cámaras, de factores geométricos así como de factores fluidodinámicos (ecuación 15). En la bibliografía vienen descritas ecuaciones para su estimación en distintas situaciones experimentales.

Subprograma "classius". Calcula la temperatura en la

globales de transmisión de calor:

- 1^{er} efecto = 1280 Kcal/hr m² °C
- 2^o efecto = 1440 Kcal/hr m² °C
- 3^{er} efecto = 1230 Kcal/hr m² °C
- 4^o efecto = 1230 Kcal/hr m² °C
- Otros efectos = 1080 Kcal/hr m² °C

T I

VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Número de etapas: 5
 Caudal de la alimentación: 65000
 Fracción másica a la entrada: 0.15
 Fracción másica a la salida: 0.40
 Presión del vapor vivo: 2.50
 Presión del vapor en el último efecto: 0.10
 Presión de la alimentación: 1.00
 Temperatura de entrada de la alimentación: 75
 Temperatura de salida de la sol. conc.: 52

RESULTADOS OBTENIDOS

RELACION DE LAS DISTINTAS VARIABLES EN CADA ETAPA

Etapa	Area Estim.	Calor Interc.	Frac. másica Salida	Caudal Líquid.
1	400	9723464	0.17	58856
2	400	3300785	0.19	51694
3	400	3901729	0.22	43482
4	400	4549922	0.28	34935
5	400	5166998	0.40	24375

Etapa	Caudal Vap.	T. Vap. Entr.	T. Líq. Sal.	Pres. Cam. Evapor.
1	6144	126	107	1.14
2	7162	103	97	0.77
3	8212	92	84	0.46
4	9147	79	70	0.24
5	9960	64	52	0.10

Consumo de vapor vivo: 18745
 Cantidad de líquido evaporado: 40625
 Economía del vapor: 2.17

RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha procesado el programa para cinco, seis y siete efectos, hallándose los resultados, expuestos en las tablas 1, 2 y 3 respectivamente. Como puede observarse, la cantidad de líquido evaporado referido al consumo de vapor economía del vapor - aumenta con el número de efectos. De igual forma aumenta, sin embargo, el coste del equipo, pues se requiere mayor número de evaporadores y de mayor área. El número de efectos óptimo es un problema económico y sólo con datos concretos y suficientes se puede resolver. No obstante, entre los sistemas calculados puede asegurarse que, con toda probabilidad, se hallará el mejor. En la figura 2 se halla una representación del sistema de seis evaporadores con los valores de las distintas magnitudes estudiadas. En todas las figuras las unidades empleadas corresponden a las expuestas en la nomenclatura.

NOMENCLATURA

- A = área del evaporador, m²
- H = entalpia del vapor, Kcal/kg
- h = entalpia de la disolución, Kcal/kg
- h^c = entalpia del condensado, Kcal/kg
- L = caudal de disolución, kg/hr
- N = número de efectos
- P = presión, atm.

- Q = caudal de calor transferible, Kcal/hr.
- T = temperatura en la cámara de condensación, °C
- t = temperatura en la cámara de ebullición, °C
- ΔT = diferencia real de temperaturas, °C
- ΔT_c = incremento del punto de ebullición, °C
- U = coeficiente global de transferencia de calor, Kcal/hr m² °C
- V = caudal de vapor, kg/hr
- x = fracción másica

Subíndices y superíndices

- i = número del efecto
- o = condiciones de entrada

El listado del programa puede enviarse a quién esté interesado en el mismo, bajo simple petición a "Química e Industria."

T II

VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Número de etapas: 6
 Caudal de la alimentación: 65000
 Fracción másica a la entrada: 0.15
 Fracción másica a la salida: 0.40
 Presión del vapor vivo: 2.50
 Presión del vapor en el último efecto: 0.10
 Presión de la alimentación: 1.00
 Temperatura de entrada de la alimentación: 75
 Temperatura de salida de la sol. conc.: 52

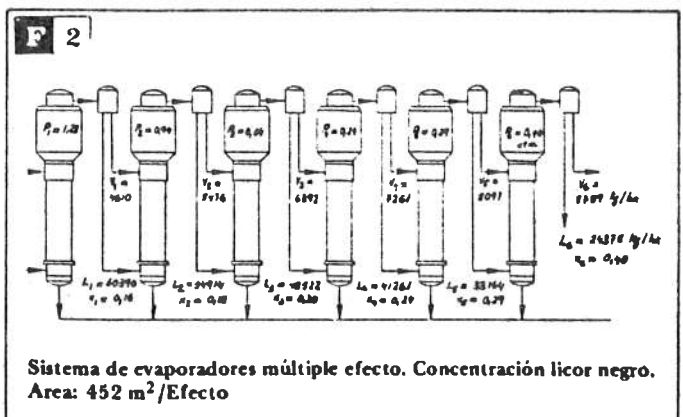
RESULTADOS OBTENIDOS

RELACION DE LAS DISTINTAS VARIABLES EN CADA ETAPA

Etapa	Area Estim.	Calor Interc.	Frac. másica Salida	Caudal Líquid.
1	452	9094873	0.16	60390
2	452	2466051	0.18	54914
3	452	2962474	0.20	48522
4	452	3504174	0.24	41261
5	452	4040871	0.29	33164
6	452	4588502	0.40	24375

Etapa	Caudal Vap.	T. Vap. Entr.	T. Líq. Sal.	Pres. Cam. Evapor.
1	4610	126	111	1.28
2	5476	106	102	0.94
3	6392	97	92	0.64
4	7261	87	81	0.40
5	8097	75	67	0.22
6	8789	61	52	0.10

Consumo de vapor vivo: 17533
 Cantidad de líquido evaporado: 40625
 Economía del vapor: 2.32



T III

VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Número de etapas: 7
 Caudal de la alimentación: 65000
 Fracción másica a la entrada: 0.15
 Fracción másica a la salida: 0.40
 Presión del vapor vivo: 2.50
 Presión del vapor en el último efecto: 0.10
 Presión de la alimentación: 1.00
 Temperatura de entrada de la alimentación: 75
 Temperatura de salida de la sol. conc.: 52

RESULTADOS OBTENIDOS

RELACION DE LAS DISTINTAS VARIABLES EN CADA ETAPA

Etapa	Area Estim.	Calor Interc.	Frac. másica Salida	Caudal Líquid.
1	512	8648199	0.16	61510
2	512	1860816	0.17	57262
3	512	2286021	0.19	52208
4	512	2750263	0.21	46362
5	512	3220582	0.25	39718
6	512	3713384	0.30	32351
7	512	4184428	0.40	24375

Etapa	Caudal Vap.	T. Vap. Entr.	T. Líq. Sal.	Pres. Cam. Evapor.
1	3490	126	113	1.40
2	4247	109	106	1.08
3	5054	101	98	0.79
4	5846	93	89	0.55
5	6644	83	78	0.35
6	7367	72	65	0.20
7	7976	59	52	0.10

Consumo de vapor vivo: 16672

Cantidad de líquido evaporado: 40625

Economía del vapor: 2.44

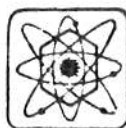
BIBLIOGRAFIA

Esplugas, S., Mata, J. y Costa J.; "Cálculo de evaporadores de múltiple efecto en paralelo. Parte I: Modelo matemático y análisis del mismo. "Química e Industria". Febrero 1980.

Kern, "Procesos de transferencia de calor". Ed. CECSA, 1965

Perry, R.H., "Chemical Engineers' Handbook". Ed. McGraw-Hill, 5ª ed., 1973.

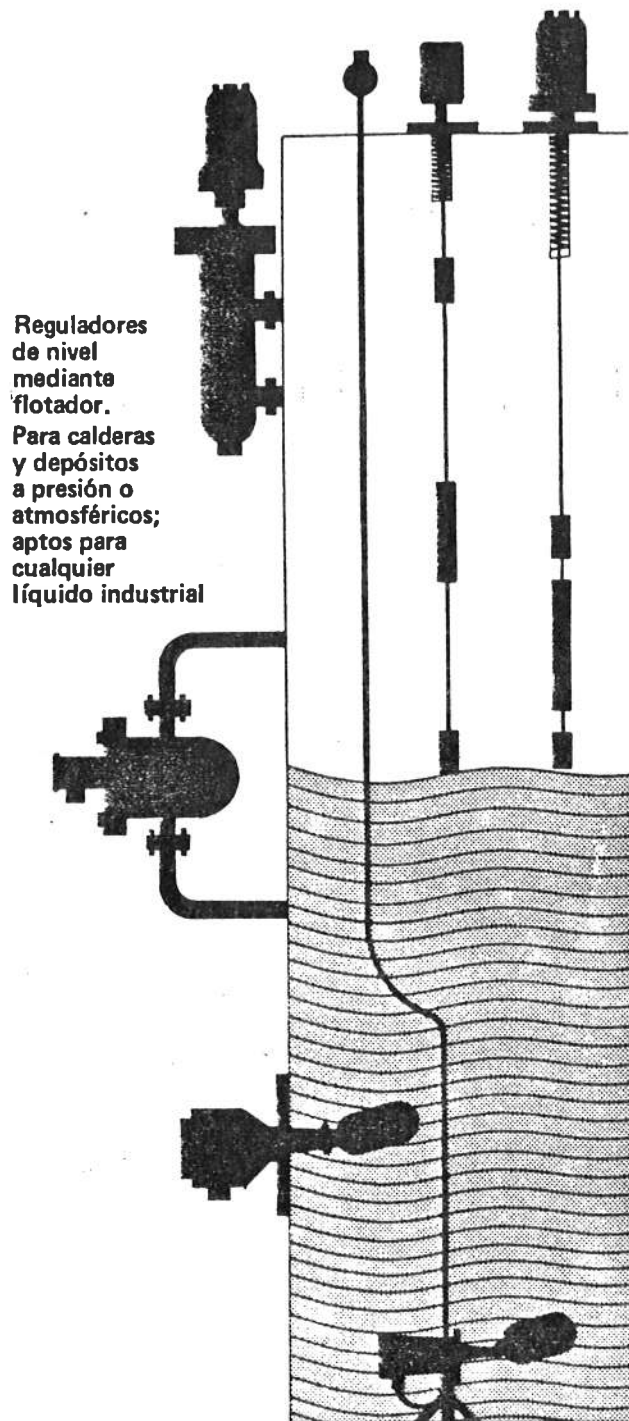
Gel'perin, N.J., "Calculation of the heating surface of multistage evaporators", Int. Chem. Engng. 9, (1969).



ANQUE

QUÍMICA E
INDUSTRIA

LA PUBLICACION QUE, EN
EL CAMPO QUÍMICO, TIENE
MAYOR PENETRACION Y DI-
FUSION EN EL PAIS.

Tirada 9.300
ejemplaresBestobell
Mobreysoluciones seguras en
regulación de niveles

Reguladores
de nivel
mediante
flotador.
Para calderas
y depósitos
a presión o
atmosféricos;
aptos para
cualquier
líquido industrial

En España:

SAUTER
IBERICA, S. A.

Lauria, 120 Telf. (93) 207 09 50/54 BARCELONA-37
Colombia, 45 Telf. (91) 404 14 00 MADRID-16