

NOTA TECNICA

UN DESTILADOR DE AGUA COMO EJEMPLO DE BALANCE DE ENERGIA

C. Mans*, J. Gimenez, R. Simarro y F. Pujol**

INTRODUCCION

En la mayor parte de los planes de estudio de las licenciaturas en Química de las Facultades españolas, o en las especialidades de Ingeniería Química, se imparte una disciplina de introducción a la Química Técnica. Su contenido es muy variado, pero un tema común a todas ellas es el de los balances de materia y energía. Estos serán la base imprescindible para el estudio posterior de cualquier operación unitaria. Los balances se introducen en la exposición teórica haciendo hincapié en su carácter experimental, y elevándolos a la categoría de Leyes de Conservación. Es del todo punto imprescindible el apoyo experimental para la completa comprensión y visualización de estos conceptos. Quizá sería más formativo para el alumno el planteo y realización de experimentos que permitieran inferir dichas leyes, más que su "comprobación" a posteriori, pero sería probablemente mucho más difícil esta metodología atendiendo a las limitaciones de la actual vida universitaria.

Es importante hacer descubrir al alumno que las leyes de conservación las encuentra en cada momento, a cada paso de su vida, y que muchas veces las aplica en forma automatizada. Un buen procedimiento para ello es el emplear en algunos de los estudios experimentales de laboratorio equipos y unidades próximos al alumno, e incluso de su vida cotidiana. Ello es especialmente válido cuando, para algunos alumnos y debido a la posterior especialización, no van a profundizar en Química Técnica o Ingeniería Química.

Uno de los estudios experimentales desarrollados en el Departamento de Química Técnica de la Facultad de Química de la Universidad de Barcelona como ejercicio para los alumnos de 3^{er} curso consiste en la realización del balance energético de un destilador comercial de agua, trabajando en régimen estacionario para distintas condiciones. Con este montaje se pretende, por un lado, visualizar un balance de energía y, por otro, hacer ver la influencia que sobre el rendimiento del aparato tienen las mejoras en el aislamiento, la integración de corrientes y la variación de parámetros exteriores.

* Dr. en Ciencias, esp. Química. Profesor Agregado del Depto. de Química Técnica.

** Ldo. en Química. Profesor Ayudante del Depto. de Química Técnica. Univ. Barcelona.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En la figura 1 se presenta un esquema del montaje . Puede observarse que hay dos formas básicas de funcionamiento: con circuitos en paralelo y con circuito integrado, que se muestran en las figuras 2 y 3.

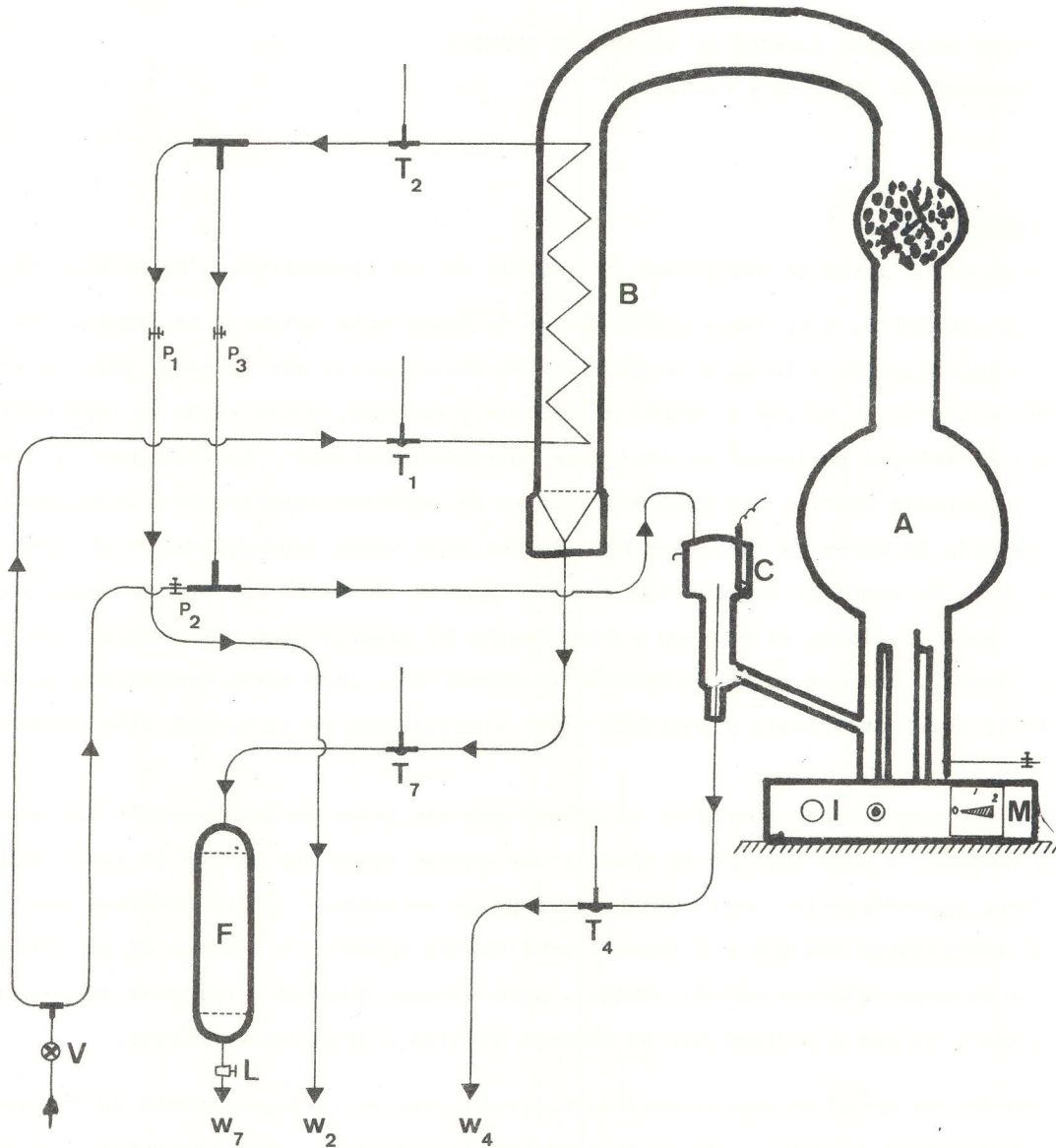


FIGURA 1 ESQUEMA GENERAL DEL DESTILADOR

A: Caldera B: Condensador C: Alimentación y nivel
F: Medidor de caudal

Con circuitos en paralelo el agua de alimentación entra por V_4 , sigue por V_2 (V_3 cerrada) y C hasta la caldera A. El recipiente C es un rebosadero que permite que el agua de entrada en exceso vaya al desagüe (w_4). En la caldera hierve el agua, que condensa en el serpentín B refrigerado por agua fría que sigue el circuito $V_4-T_1-B-T_2-V_1-w_2$. El

agua destilada y condensada en B sale por T₇ y se acumula en F, pudiendo ser retirada por L y w₇.

Con el circuito integrado es el agua de refrigeración del serpentín (V₄-T₁-B-T₂) la que, mediante la apertura de V₃ (V₁ y V₂ cerradas) se alimenta a la caldera, saliendo el exceso por el rebosadero w₄.

Los balances de energía para uno y otro casos consistirán simplemente en los términos siguientes (figuras 2 y 3) :

- Entrada de calor por la resistencia eléctrica de la caldera, Q
- Entrada convectiva de entalpía por las corrientes de entrada (1 y 3 en circuitos paralelos, 1 en circuito integrado).
- Salida convectiva de entalpía con las corrientes de salida (2,7 y 4 en circuitos en paralelo, y 7 y 4 en circuito integrado).
- Salida por pérdidas de calor al exterior por convección y radiación, P, ya que el sistema no es adiabático.

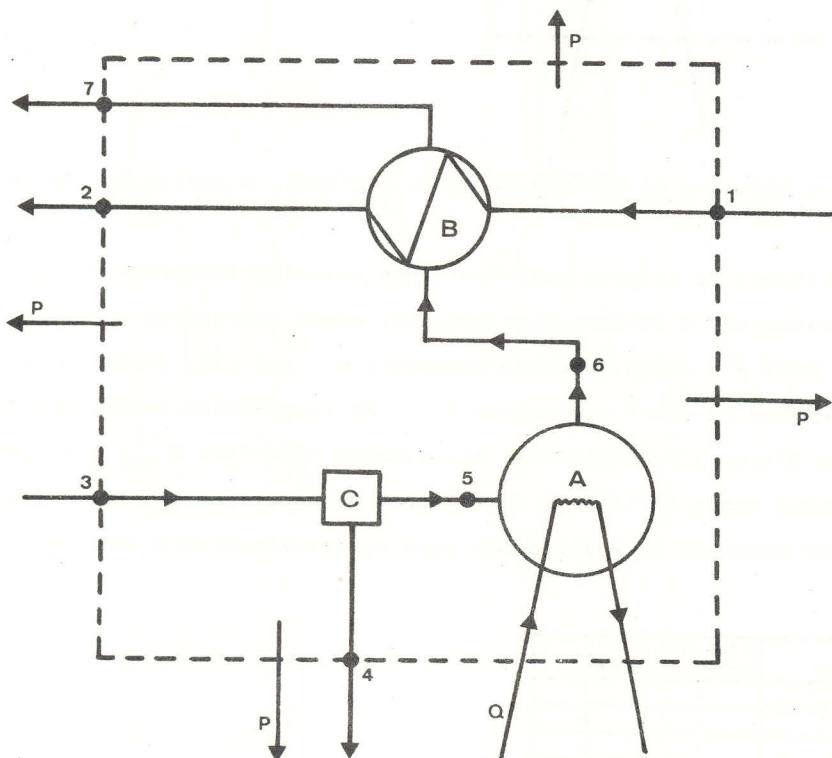


FIGURA 2
Circuitos en paralelo

En forma algébrica, podrá escribirse que:

$$\text{Para circuitos paralelos } P = Q - (w_2 T_2 + w_4 T_4 + w_7 T_7 - w_1 T_1 - w_3 T_3) \cdot C_p \quad (1)$$

$$\text{Para circuito integrado } P = Q - (w_4 T_4 + w_7 T_7 - w_1 T_1) \cdot C_p \quad (2)$$

EXPERIMENTACION

La instalación no está diseñada para la determinación independiente de los intercambios de calor con el exterior a través de las superficies de los aparatos. Por ello la

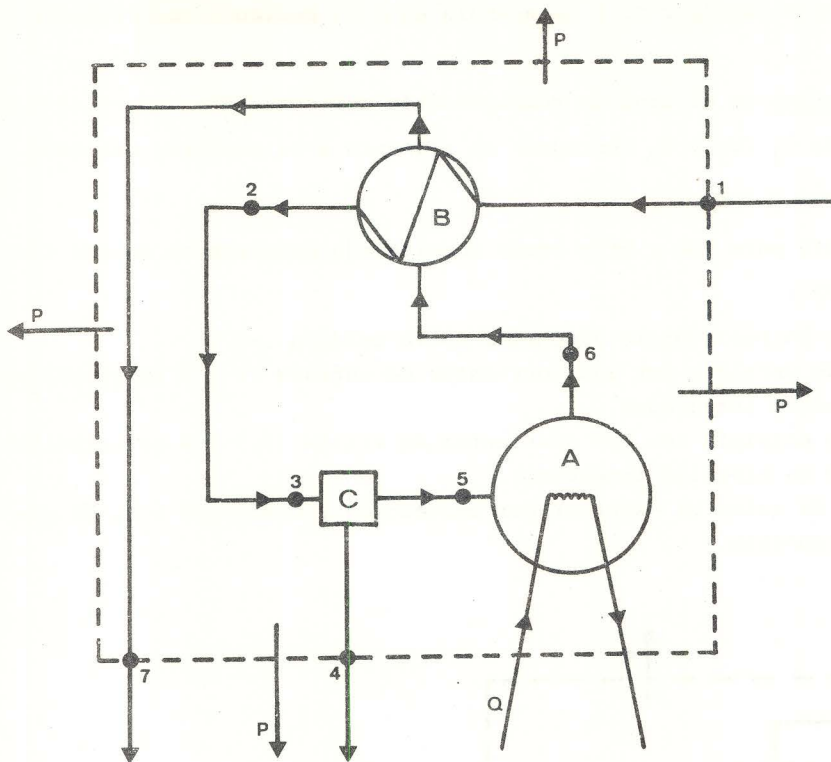


FIGURA 3
Circuito integrado .

ejecución práctica tendrá por objetivo el cálculo de estas pérdidas, a partir de los balances anteriores (1) y (2).

Hay diversas modalidades de trabajo posibles: con circuito integrado o con circuitos en paralelo ; puede aislarse la caldera o no hacerlo; puede conectarse uno o los dos calefactores de la caldera (2200 W o 4400W, respectivamente); y , por fin, puede variarse el valor de la entrada convectiva de calor (corriente 1) . En la práctica se trabaja con dos valores de esta variable última , de magnitudes aproximadas 1000-1500 W , o bien 2000-2500 W. La combinación de estos modos de trabajo da 16 tipos de experimentos, resumidos en la tabla 1, y por el orden adecuado de realización para un funcionamiento correcto.

| Entrada Convectiva | Aislamiento Térmico | Tipo Circuito | Nº Elementos Calefactores | Nº Exp. |
|------------------------|---------------------|---------------|---------------------------|---------|
| 2000 - 2500 w (aprox.) | SI | INTEGRADO | 2 | 1 |
| | | | 1 | 2 |
| | | PARALELO | 2 | 3 |
| | | | 1 | 4 |
| | NO | INTEGRADO | 2 | 5 |
| | | | 1 | 6 |
| | | PARALELO | 2 | 7 |
| | | | 1 | 8 |
| 1000 - 1500 w (aprox.) | SI | INTEGRADO | 2 | 9 |
| | | | 1 | 10 |
| | | PARALELO | 2 | 11 |
| | | | 1 | 12 |
| | NO | INTEGRADO | 2 | 13 |
| | | | 1 | 14 |
| | | PARALELO | 2 | 15 |
| | | | 1 | 16 |

Trabajando en circuitos en paralelo es conveniente que el caudal en 2 sea 4 veces el de 4. Cada experimento debe realizarse tres veces para asegurar resultados reproducibles.

Los resultados de algunos de los experimentos más significativos se presentan en la tabla 2.

| Nº exp. | E _C W | T _v °C | T ₁ °C | T ₂ °C | T ₄ °C | T ₇ °C | q ₂ l/h | q ₄ l/h | q ₇ l/h |
|---------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2574 | 99 | 15,5 | 37,5 | 37,5 | 36,0 | --- | 138 | 5,4 |
| 2 | 2574 | 99 | 15,5 | 26,0 | 26,0 | 28,5 | --- | 140 | 2,6 |
| 4 | 2574 | 99 | 15,5 | 30,0 | 15,5 | 36,5 | 106 | 33 | 2,7 |
| 6 | 2414 | 99 | 18,5 | 31,0 | 30,5 | 30,5 | --- | 110 | 2,4 |
| 9 | 1412 | 99 | 16,5 | 57,0 | 57,0 | 43,0 | --- | 75 | 5,4 |
| 10 | 1412 | 99 | 15,5 | 35,0 | 35,0 | 30,0 | --- | 74 | 2,5 |
| 12 | 1420 | 99 | 15,0 | 41,0 | 15,0 | 31,5 | 60 | 18 | 2,7 |
| 13 | 1510 | 99 | 18,5 | 61,5 | 61,5 | 48,5 | --- | 67 | 5,5 |
| 16 | 1530 | 99 | 18,5 | 18,5 | 18,5 | 32,0 | 50,5 | 18 | 2,4 |

TABLA 2

Resultados experimentales

E_C : energía convectiva

T_v : temperatura del vapor

E_C equivale a w₁C_pT₁.

A partir de estos datos se pro-

cede al cálculo de las pérdidas

P, de las salidas convectivas

con el destilado $S_{cd} = w_7 C_p T_7$ y con el refrigerante y por el rebosadero S_C, así como el porcentaje de cada término sobre el conjunto del balance.

Así, Entradas totales E_T = Q + E_C

Salidas totales S_T = S_{cd} + S_C + P, y obviamente S_T = E_T.

Los resultados de los cálculos se presentan en la tabla 3

| nº exp | Q W | P W | E _C W | S _{cd} W | S _C W | E _T W | %P -- | %E _C -- | %S _{cd} -- | %S _C -- |
|--------|--------|--------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 4400 | 801 | 2574 | 96 | 6077 | 6974 | 11,5 | 36,9 | 1,4 | 87,1 |
| 2 | 2200 | 476 | 2574 | 46 | 4252 | 4774 | 10,0 | 53,9 | 1,0 | 89,1 |
| 4 | 2200 | 352 | 2574 | 49 | 4373 | 4774 | 7,4 | 53,9 | 1,0 | 91,6 |
| 6 | 2200 | 563 | 2414 | 52 | 3999 | 4614 | 12,2 | 52,3 | 1,1 | 86,7 |
| 9 | 4400 | 738 | 1412 | 102 | 4973 | 5812 | 12,7 | 24,3 | 1,8 | 85,5 |
| 10 | 2200 | 482 | 1412 | 46 | 3084 | 3612 | 13,3 | 39,1 | 1,3 | 85,4 |
| 12 | 2200 | 328 | 1420 | 46 | 3246 | 3620 | 9,1 | 39,2 | 1,3 | 89,7 |
| 13 | 4400 | 926 | 1510 | 115 | 4869 | 5910 | 15,7 | 25,5 | 1,9 | 82,4 |
| 16 | 2200 | 444 | 1530 | 53 | 3233 | 3730 | 11,9 | 41,0 | 1,4 | 86,7 |

TABLA 3 Porcentaje de entalpía de cada una de las corrientes.

El análisis de los anteriores resultados nos permite deducir las siguientes conclusiones:

-Sólo una muy pequeña parte de la energía suministrada sale del sistema con el destilado.

-La mayor parte de la energía suministrada al sistema sale en forma de salida convectiva, con el agua de refrigeración. En algunos casos este calor puede ser aprovechable.

-Las pérdidas de calor al exterior son relativamente reducidas, entre el 9 y el 16%.

Finalmente en la tabla 4 se presenta el valor de algunos índices significativos para poder comparar el rendimiento de los distintos diseños.

| Nº exp. | Q | P | q ₇ | Q/q ₇ | P/q ₇ |
|---------|------|-----|----------------|------------------|------------------|
| | W | W | l/h | kWh/l | kWh/l |
| 1 | 4400 | 801 | 5,4 | 0,81 | 0,15 |
| 2 | 2200 | 476 | 2,6 | 0,85 | 0,18 |
| 4 | 2200 | 352 | 2,7 | 0,81 | 0,13 |
| 6 | 2200 | 563 | 2,4 | 0,92 | 0,23 |
| 9 | 4400 | 738 | 5,4 | 0,81 | 0,14 |
| 10 | 2200 | 482 | 2,5 | 0,88 | 0,19 |
| 12 | 2200 | 328 | 2,7 | 0,81 | 0,12 |
| 13 | 4400 | 926 | 5,5 | 0,80 | 0,17 |
| 16 | 2200 | 444 | 2,4 | 0,92 | 0,19 |

TABLA 4

Indices comparativos del rendimiento de distintos diseños.

Los diseños que tienen menores pérdidas de calor al exterior (índice P/q₇ bajo) son lógicamente los que disponen de aislamiento térmico. En cambio, los diseños que mejor aprovechan la energía eléctrica suministrada (índice Q/q₇ bajo) son los de circuito integrado con dos elementos calefactores (experimentos 1,9 y 13), preferentemente con aislamiento; o bien los dos circuitos en paralelo con un solo elemento calefactor y aislamiento (experimentos 4 y 12).

BALANCE DE ENERGIA RESTRINGIDO POR LIMITACIONES

Es muy interesante destacar que si bien los modelos matemáticos obtenidos a partir de los balances de materia y energía son matemáticamente correctos, pueden estar limitados físicamente en la realidad. Un ejemplo se tiene en el análisis que sigue tomado de la referencia indicada al pie (1). JENSON y JEFFRIES analizan el caso de circuito integrado con las dos importantes simplificaciones siguientes: suponen que no hay pérdidas de calor al exterior, y además que la temperatura de salida del condensado T₇ coincidirá con la temperatura de salida del rebosadero T₄. Resolviendo los balances de energía alrededor de la caldera y del condensador, tomando como parámetro el caudal de agua de entrada al sistema, w₁ se tiene:

$$\text{en la caldera} \quad Q + w_7 \cdot T_4 = (100 + L) \cdot w_7 \quad (3)$$

$$\text{en el condensador} \quad w_1 \cdot (T_4 - T_1) = w_7 \cdot (L + 100 - T_4) \quad (4)$$

siendo L el calor latente de vaporización del agua, y tomando como temperatura de referencia del agua 0°C.

$$\text{Por tanto} \quad w_7 = \frac{w_1 \cdot Q}{w_1 \cdot (100 + L - T_1) - H} \quad (5)$$

Es decir, al disminuir w₁ el caudal de agua destilada w₇ aumenta.

Cuando w₁ · (100 + L - T₁) = H, w₇ sería infinito lo cual es físicamente imposible.

Para explicar esta contradicción debe tenerse en cuenta que se cumple

$$T_4 = T_1 + \frac{H}{w_1} \quad (6)$$

El valor máximo de T₄ es el de 100°C; para poder aplicar la ecuación (5) habrá de cumplirse que

ref.1 JENSON, JEFFRIES; "Métodos matemáticos en Ingeniería Química", trad. Ed. Alhambra. 1969.

$$w_1 \geq \frac{H}{100 - T_1} \quad (7)$$

Para valores de w_1 inferiores la condición a cumplirse será que T_4 sea menor de 100°C , con lo que sustituyendo la igualdad de (7) en la ecuación (5) se tendrá :

$$w_7 = \frac{Q}{L} \quad \text{para } T_4 = 100^\circ\text{C}. \quad (8)$$

No todo el vapor que produzca la caldera podrá ser condensado por el líquido de entrada , y se obtendrá sólo un caudal de destilado D tal que

$$D = (100 - T_1) \cdot \frac{w_1}{L} \quad (9)$$

La representación gráfica de estos resultados se hace en la figura 4, en la que se observa la variación del caudal de destilado con w_1 . Para valores de w_1 superiores al crítico (ecuación 7) se aplica la ecuación 5, y para valores inferiores la ecuación 5.

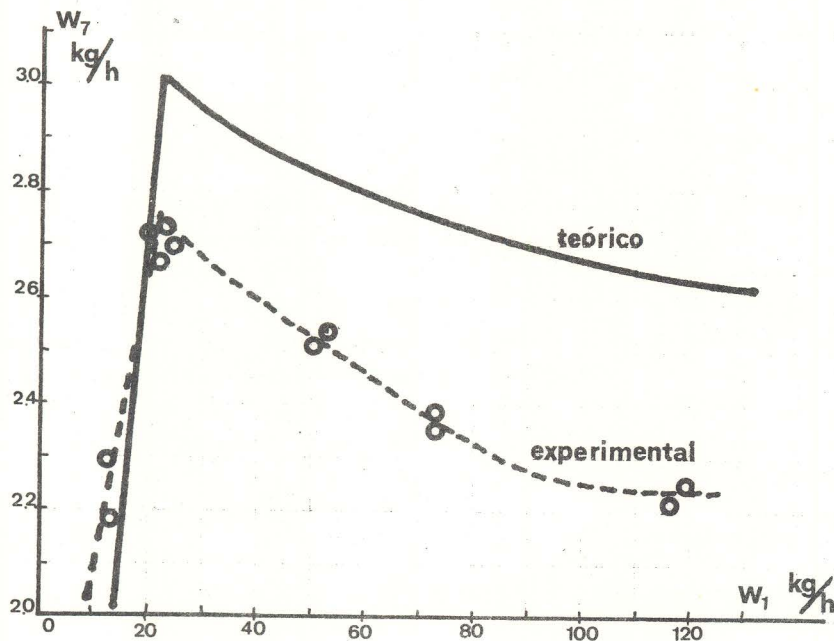


Figura 4
Resolución gráfica del modelo matemático y comparación con los resultados experimentales.

Puede comprobarse este modelo con el dispositivo experimental descrito , reduciendo el caudal de entrada w_1 . Los puntos experimentales obtenidos se presentan también en la figura 4. Se ha trabajado con la caldera aislada para acercarse al máximo a las hipótesis de partida.

El valor crítico de w_1 calculado para este aparato es $w_1 = 22,26$ kg/h. siendo w_7 máximo $3,00$ kg/h. El caudal de destilado para elevados valores de w_1 es de $2,59$ kg/h.

Los valores experimentales obtenidos reproducen cualitativamente los predichos por el modelo : las formas de las líneas son las mismas. Para los valores de w_1 inferiores al crítico se obtiene una buena concordancia, pero los valores obtenidos para caudales mayores son inferiores a los teóricos , hasta en un 20% . Ello es explicable pues las dos hipótesis realizadas - adiabatismo total y coincidencia de T_4 y T_7 - no se cumplen en el sistema real . De todos modos el valor crítico predicho por el modelo concuerda con el obtenido en la realidad.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a los señores Pedro Manuel Rodrigo, M^a Gloria Oranias y David Fornals su colaboración en la realización de parte del trabajo experimental.

