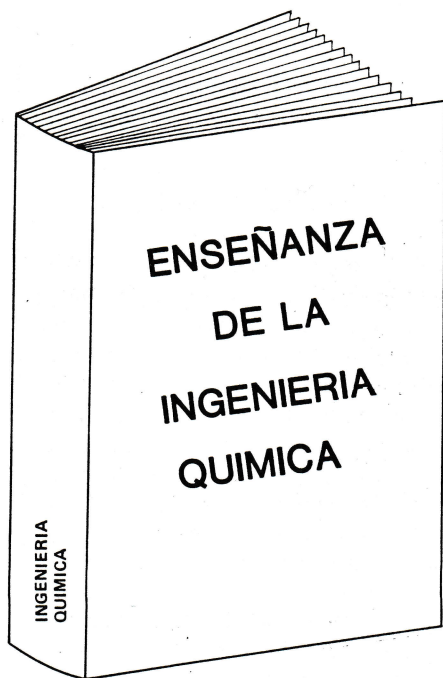




balances de
energía en un
destilador
de agua

Por:
C. MANS
R. SIMARRO
J. GIMENEZ
F. PUJOL

DEPARTAMENTO DE
QUIMICA TECNICA
FACULTAD DE QUIMICA
UNIVERSIDAD DE BARCELONA

estudios experimentales en transmisión de calor

1. Presentación

Un destilador de agua es un elemento común en muchos laboratorios. Con pequeñas modificaciones puede emplearse como práctica para visualizar los balances de energía y 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, y todo ello sin perder su funcionalidad.

El esquema del aparato modificado se presenta en la figura 1. Puede observarse que hay dos formas básicas de funcionamiento, que se aclaran en la figura 2. Puede trabajarse con circuitos en paralelo, o con un circuito integrado.

El presente trabajo es una versión modificada en la nota técnica aparecida en la revista "Quaderns d'Enginyeria", editada por la Universidad Politécnica de Barcelona. Referencia 3 (1981) 1, 329.

Con *circuitos en paralelo* el agua de alimentación entra por V4, sigue por V2 (con V3 cerrada) y pasa por C hasta la caldera A. El recipiente C es un rebosadero que permite que el exceso de agua de entrada vaya al desagüe. En la caldera hierve el agua, que condensa en el serpentín B refrigerado por agua fría que sigue el circuito V4-T1-B-T2-V1. El agua destilada y condensada en B sale por T7 y se acumula en F, pudiendo ser retirada por L.

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 C.

Como se puede apreciar, las modificaciones del aparato comercial han consistido simplemente en la adición de diversos medidores: de temperatura, para el agua de entrada (T1), agua destilada de salida (T7), agua de refrigeración de salida (T2) y agua del rebosadero (T4); y medidores de caudal, para el agua de refrigeración a la entra-

Para circuito integrado:

$$P = Q - (w_4 T_4 + w_7 T_7 - w_1 T_1) \cdot c_p \quad (3)$$

Estas ecuaciones son válidas en general en ausencia de restricciones físicas de funcionamiento. Si éstas existen, la validez de los resultados viene constreñida por tales restricciones. JENSON y JEFFRIES (1969) analizan el caso de circuito integrado, pero con las dos importantes simplificaciones siguientes: suponen que no hay pérdidas de calor al exterior y, además, que la temperatura de salida del condensado, en 7, coincidirá con la temperatura de salida del rebosadero, en 4. Resolviendo el balance de energía alrededor de la caldera y del condensador, tomando como parámetro el caudal de agua de entrada al sistema, w_1 , se tiene (Fig. 2b):

En la caldera:

$$Q + w_7 T_4 c_p = (100 c_p + \lambda) \cdot w_7 \quad (4)$$

En el condensador

$$w_1 (T_4 - T_1) c_p = w_7 (\lambda + 100 c_p - T_4 c_p) \quad (5)$$

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

$$w_7 = \frac{w_1 Q}{w_1 (100 c_p + \lambda - T_1 c_p) - Q} \quad (6)$$

Es decir, al disminuir w_1 el caudal de agua destilada w_7 aumenta.

Cuando $w_1 (100 c_p + \lambda - T_1 c_p) = Q$, w_7 sería infinito, lo cual es físicamente imposible. Para explicar este absurdo, debe tenerse en cuenta que se cumple:

$$T_4 = T_1 + \frac{Q}{w_1 c_p} \quad (7)$$

Como el valor máximo de T_4 es el de 100°C, para poder aplicar la ecuación (6) habrá de cumplirse que

$$w_1 \geq \frac{Q}{(100 - T_1) c_p} \quad (8)$$

Para valores de w_1 inferiores la condición que deberá cumplirse será que T_4 sea menor que 100°C, con lo que sustituyendo la igualdad de (8) en la ecuación (6) se tendrá:

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

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

$$w_7 = \frac{Q}{\lambda} \text{ para } T_4 = 100^\circ\text{C} \quad (10)$$

3. Resultados experimentales

La experimentación estará destinada a satisfacer dos objetivos. En primer lugar, a la realización de los balances de energía globales del sistema. En segundo lugar, a determinar la respuesta del aparato frente a la limitación del caudal de agua de entrada, tal como se ha descrito en el modelo matemático.

La instalación no está diseñada para determinar independientemente las pérdidas de calor al exterior de cada porción de sistema. Por ello la ejecución práctica tendrá por objetivo el cálculo de estas pérdidas a partir de los balances (2) y (3).

Hay diversas formas de trabajo posibles: con circuito integrado o con circuitos en paralelo; puede aislarse térmicamente la caldera o puede no hacerse; puede conectarse uno o dos calefactores de la caldera; 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 última variable, de magnitudes aproximadas de 1.000-1.500 W o 2.000-2.500 W. La combinación de estos modos de trabajo da 16 tipos de experimentos distintos.

En la Tabla I se muestran los valores medios de caudales y temperatura para algunos de los experimentos más significativos, así como las magnitudes de los diversos términos caloríficos y algunos índices representativos de la transferencia de calor.

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

Tabla I
Resultados experimentales

Tipo de experim.	T_1 °C	T_2 °C	T_4 °C	T_7 °C	q_2 l/h	q_4 l/h	q_7 l/h	E_c W	S_{cd} W	S_c W	P W	$\frac{Q}{q_7}$	$\frac{P}{q_7}$
A-2C-I	15,5	37,5	37,5	36,0	—	138	5,4	2.574	96	6.077	801	0,81	0,15
A-1C-I	15,5	26,0	26,0	28,5	—	140	2,6	2.574	46	4.252	476	0,85	0,18
A-1C-P	15,5	30,0	15,5	36,5	106	33	2,7	2.574	49	4.373	352	0,81	0,13
nA-1C-I	18,5	31,0	30,5	30,5	—	110	2,4	2.414	52	3.999	563	0,92	0,23
A-2C-I	16,5	57,0	57,0	43,0	—	75	5,4	1.412	102	4.973	739	0,81	0,14
A-1C-I	15,5	35,0	35,0	30,0	—	74	2,5	1.412	46	3.084	482	0,88	0,19
A-1C-P	15,0	41,0	15,0	31,5	60	18	2,7	1.420	46	3.246	328	0,81	0,12
nA-2C-I	18,5	61,5	61,5	48,5	—	67	5,5	1.510	115	4.869	926	0,80	0,17
nA-1C-P	18,5	18,5	18,5	32,0	505	18	2,4	1.530	53	3.233	444	0,92	0,19

A: Caldera con aislante térmico.

1C: Un calefactor en la caldera ($Q = 2.200$ W)

2C: Dos calefactores en la caldera ($Q = 4.400$ W)

nA: Caldera sin aislante térmico.

I: Circuito integrado.

P: Circuitos en paralelo.

— Sólo una pequeña parte de la energía suministrada sale del sistema con el destilado: oscila entre el 1 y el 2 por 100.

— La mayor parte de la energía suministrada al sistema sale en forma de salida convectiva, con el agua de refrigeración: entre un 80 y un 90 por 100 del total.

— Las pérdidas de calor al exterior son relativamente reducidas, entre el 9 y el 16 por 100.

Los diseños que tienen menores pérdidas de calor (índice P/q_7 bajo) son lógicamente los que tienen aislamiento térmico. En cambio, los diseños que mejor aprovechan la energía suministrada son los de circuito integrado con dos elementos calefactores, preferentemente con aislamiento; o bien los circuitos en paralelo con aislamiento.

La comprobación del balance de energía con la restricción del caudal de refrigeración se realiza con la caldera aislada y el circuito integrado. Se efectúan diversos experimentos con valores reducidos progresivamente del caudal de entrada 1. Los experimentos se realizan, como es obvio, para el estado estacionario de cada caudal.

La figura 3 muestra valores experimentales obtenidos, comparados con los valores pronosticados por el modelo (ecuaciones 8 y 9). El valor teórico crítico calculado para el aparato empleado es de $w_1 = 22,3$ kg/h, siendo w_7 máximo de 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 obtenidas son las mismas. Para los valores de w_1 inferiores al crítico se obtiene una buena concordancia, pero los valores obtenidos para caudales superiores son inferiores a los teóricos, hasta en un 20 por 100. Ello es explicable, pues las dos hipótesis principales supuestas —adiabaticidad 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 real.

4. Consideraciones finales

El montaje descrito en el presente trabajo es económico y sencillo de instalación. La manipulación no es compleja y el consumo de reactivos nulo. La duración de un experimento es reducida y pueden realizarse uno a con-

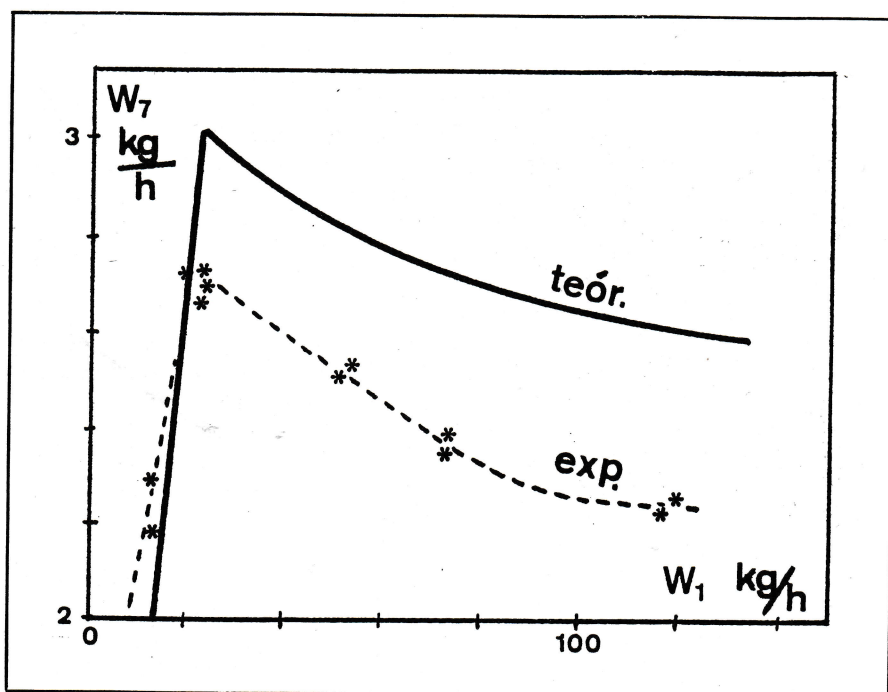


Fig. 3. Resultados calculados y experimentales en la operación del destilador con reducción del caudal de agua de refrigeración.

tinuación de otro, sin necesidad de parar la instalación. No es preciso que cada alumno realice todos los modos de operación posibles, pues sería una tarea tediosa. Distintos grupos pueden comparar los resultados obtenidos en los diversos experimentos.

Notación

c_p	Calor específico, J/(kg K).
D	Caudal de destilado líquido, kg/s.
EC	Entalpía de entrada con el líquido, W .
P	Calor perdido al exterior, W .
Q	Potencia del calderín, w .
SC	Salida de entalpía por la corrientes de líquido, W .
S_c	Salida de entalpía por el rebosadero, W .
S_{cd}	Salida de entalpía con el destilado, W .
T	Temperatura, °C.
W	Caudal, kg/s.

Referencia

JENSON, JEFFRIES (1969) "Métodos matemáticos en Ingeniería Química", Trad. Ed. Alhambra, Madrid.