

SISTEMAS MULTIEFECTO DE UNA ETAPA PARA PURIFICACION DE AGUAS SALOBRES

R. Román R. Corvalán D. Ponce

Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Chile

J. Doria

Grupo de Energía Solar

Facultad de Físicas

Universidad Complutense de Madrid

RESUMEN

En este trabajo se dan los fundamentos físicos de los destiladores multiefecto, a presión atmosférica y se describe un prototipo de destilador de una sola etapa, realizado con materiales de bajo costo, pero que, trabajando a temperaturas de $75^{\circ}C$, pueden dar un GOR del orden de 5, con producciones de más de 6 l/h , para un volumen total de destilador de 1 m^3 .

La pureza del agua destilada es de $100\ \mu\text{S/cm}$, a pesar de ser el contenedor de fibrocemento.

INTRODUCCION

Desde hace más de cien años, la desalinización del agua de mar o aguas salobres de algunos pozos, ha sido un problema estudiado con gran interés por técnicas solares, [1,2].

En la actualidad, cuando los costos energéticos y el tema medioambiental tienen tanta importancia, se están buscando soluciones que cumplan estos requisitos [3].

En los destiladores simples, la obtención de un gramo de agua destilada supone un aporte energético de más de 600 cal , si el calor de condensación es completamente eliminado, o lo que es igual, para producir 1 m^3 de agua, se necesitan de 115 a 120 Kw h térmicos.

En los sistemas multiefecto, el calor de cambio de fase de la condensación, en vez de ser eliminado, se utiliza para precalentar la disolución salina, con lo cual se reduce el consumo energético del proceso.

Los sistemas multiefecto pueden, a su vez, trabajar a presión reducida, para eliminar los gases no condensables; o a presión normal, estando formada la fase gaseosa por una mezcla de vapor- aire.

En algunos diseños, la entalpía de la salmuera que sale del destilador, es elevada, por lo que puede ser aconsejable su utilización en otras etapas. Este montaje se conoce con la denominación de multiefecto-multietapa.

Cuando la temperatura del primer evaporador es elevada, la estrategia más adecuada es utilizar varias etapas [4], mientras que si la temperatura es menor, puede resultar más económico realizar todo el proceso en una sola etapa, aunque el GOR (Gained Output Ratio), sea más pequeño.

El trabajar a temperaturas bajas, permite utilizar manantiales energéticos de poca exergía, como colectores solares sin concentración; estanques solares; fuentes geotérmicas o energías de desecho de procesos industriales.

En la Fig. 1 se muestra un esquema de multiefecto. El agua a tratar entra en el condensador a la temperatura T_1 y sale a T_2 , siendo el flujo entálpico ganado por el líquido refrigerante:

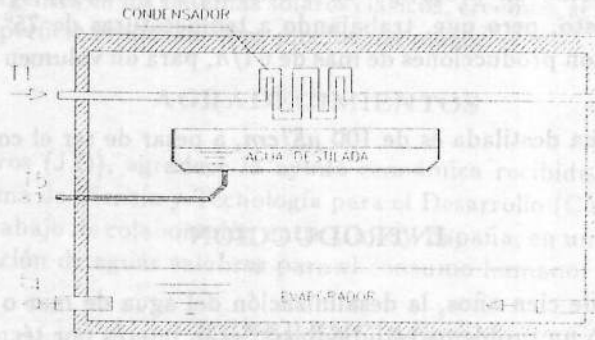


Fig. 1. Esquema de multiefecto de una etapa

$$Q_1 = \dot{m}_a \cdot c(T_2 - T_1) \quad (1)$$

donde:

\dot{m}_a : flujo másico de agua salada

c : calor específico de la disolución

El sistema de calefacción eleva la temperatura de T_2 a T_3 , aportando un flujo térmico:

$$Q_2 = \dot{m}_a \cdot c(T_3 - T_2) \quad (2)$$

La disolución salina entra en el evaporador a la temperatura T_3 , saliendo la salmuera a T_4 , cumpliéndose el balance energético:

$$Q_3 = \dot{m}_{ad}L = \dot{m}_{as}cT_3 - c(\dot{m}_{as} - \dot{m}_{ad})T_4 \quad (3)$$

siendo:

\dot{m}_{ad} : flujo másico de agua destilada producida

L : calor de cambio de fase del agua entre T_3 y T_4

donde se acepta que la disolución salina tiene el mismo calor específico que el agua destilada.

El flujo térmico no aprovechado en este multiefecto de una sola etapa, es:

$$Q_4 = c(\dot{m}_{as} - \dot{m}_{ad})(T_4 - T_1) \quad (4)$$

Este flujo Q_4 , es el que se puede aprovechar en los sistemas de etapas múltiples. Sin embargo, con un buen diseño técnico del multiefecto, se puede lograr que $T_4 \rightarrow T_1$, con lo que $Q_4 \rightarrow 0$. Cuando esto se consigue, el ahorro económico de construcción puede ser significativo.

El GOR es el número de veces que, en un destilador multiefecto, se aprovecha la energía, tomando como referencia un destilador simple con un 100% de rendimiento y se mide por:

$$GOR = \frac{\dot{m}_{ad}L}{Q_2} = \frac{\dot{m}_{ad}L}{\dot{m}_{as}c(T_3 - T_2)} \quad (5)$$

Como un destilador simple tiene que calentar el flujo másico de T_1 a T_3 , se puede expresar el GOR más correctamente como:

$$GOR = \frac{\dot{m}_{ad}L + \dot{m}_{ad}c(T_3 - T_1)}{\dot{m}_{as}c(T_3 - T_2)} \quad (6)$$

al primero de los resultados obtenidos en el prototipo experimental se le denomina GOR_1 y a este último, GOR_2 .

Un $GOR = 1$, sería el de un destilador simple de 100% de eficiencia. Si se aprovecha parte del calor de condensación, el GOR será mayor que la unidad.

Desde un punto de vista teórico, con un perfecto aislamiento del sistema; grandes superficies de evaporación y condensación, el GOR puede ser tan grande como se desee, con el límite termodinámico del potencial químico. En efecto, en equilibrio químico:

$$\mu_i(\text{solución}) = \mu_i(\text{vapor}) \quad (7)$$

$$\mu_i(\text{solución}) = \mu_i^0(\text{vapor}) + RT \ln(p_i^0) + RT \ln(x_i) \quad (8)$$

$$\mu_i^*(\text{solución}) = \mu_i^*(T, p) + RT \ln(x_i) \quad (9)$$

donde se han incluido en μ_i^* , los términos μ_i^0 y $RT \ln(p_i^0)$. Para $x_i = 1$, $\mu_i = \mu_i^*$. Es decir, $\mu_i^*(T, p)$, representa el potencial químico del componente puro, a la temperatura T y presión p .

En nuestro caso:

$$\mu_{H_2O}(\text{solución}) = \mu_{H_2O}^0(T, p) + RT \ln \left[\frac{n_{H_2O}}{\gamma n_{sal} + n_{H_2O}} \alpha \right] \quad (10)$$

siendo:

n_{H_2O} : número de moles de agua

n_{sal} : número de moles de sal

γ : factor de Van't Hoff

α : coeficiente de actividad

DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

El prototipo propuesto está fundado en los trabajos de Sizmann [5]. El destilador multifecto de una etapa construido (Fig. 2), consta básicamente de tres componentes principales: Condensador; Evaporador y Cubierta para la manipulación de los fluidos que intervienen en el proceso.

Condensador

Nuestro prototipo, debido a su principio físico de funcionamiento, necesita tener un intercambiador de calor (condensador), el cual absorbe el calor de cambio de fase y lo entrega al fluido refrigerante. Este intercambiador fue diseñado como un serpentín de tubo de polietileno de 1/2" de diámetro ($D_{ext} = 16 \text{ mm}$ y $D_{int} = 12.5 \text{ mm}$), con un área total de intercambio calórico de 8 m^2 , lo que significa una longitud de tubo de 160 m .

El serpentín formado tiene 1.1 m de diámetro y 73.6 cm de alto. El serpentín es soportado por un cilindro formado de malla metálica (malla ACMA 2 x 1"), a la cual se amarró la tubería usando alambre y varillas separadoras entre la cara interior del serpentín y la exterior del cilindro de malla.

Evaporador

Para realizar el cambio de fase agua-vapor, se necesita una superficie adecuada si se desea realizar a baja temperatura, como en nuestro caso. Para este efecto se dispone de una unidad evaporadora de superficie formada por telas de algodón, por las cuales escurre agua caliente y se produce la evaporación a baja temperatura. Las telas se encuentran dispuestas en forma vertical, una al lado de la otra, separadas 2.5 cm y suspendidas de una malla metálica horizontal, que realiza la función de soporte para el conjunto. El área disponible para la evaporación es de 31 m^2 . Además, este conjunto de superficie evaporativa, se inserta dentro de un recipiente paralelepípedo de chapa de fibrocemento, teniendo por función, primero, ser el soporte mecánico del conjunto evaporativo y segundo, ayudar a la convección natural del vapor dentro del destilador.

Las dimensiones totales de este evaporador son; 75 cm de lado y 93 cm de alto, de estos últimos, sólo 80 cm son cubiertos con fibrocemento, teniendo cuatro soportes de 13 cm que permiten la circulación del vapor.

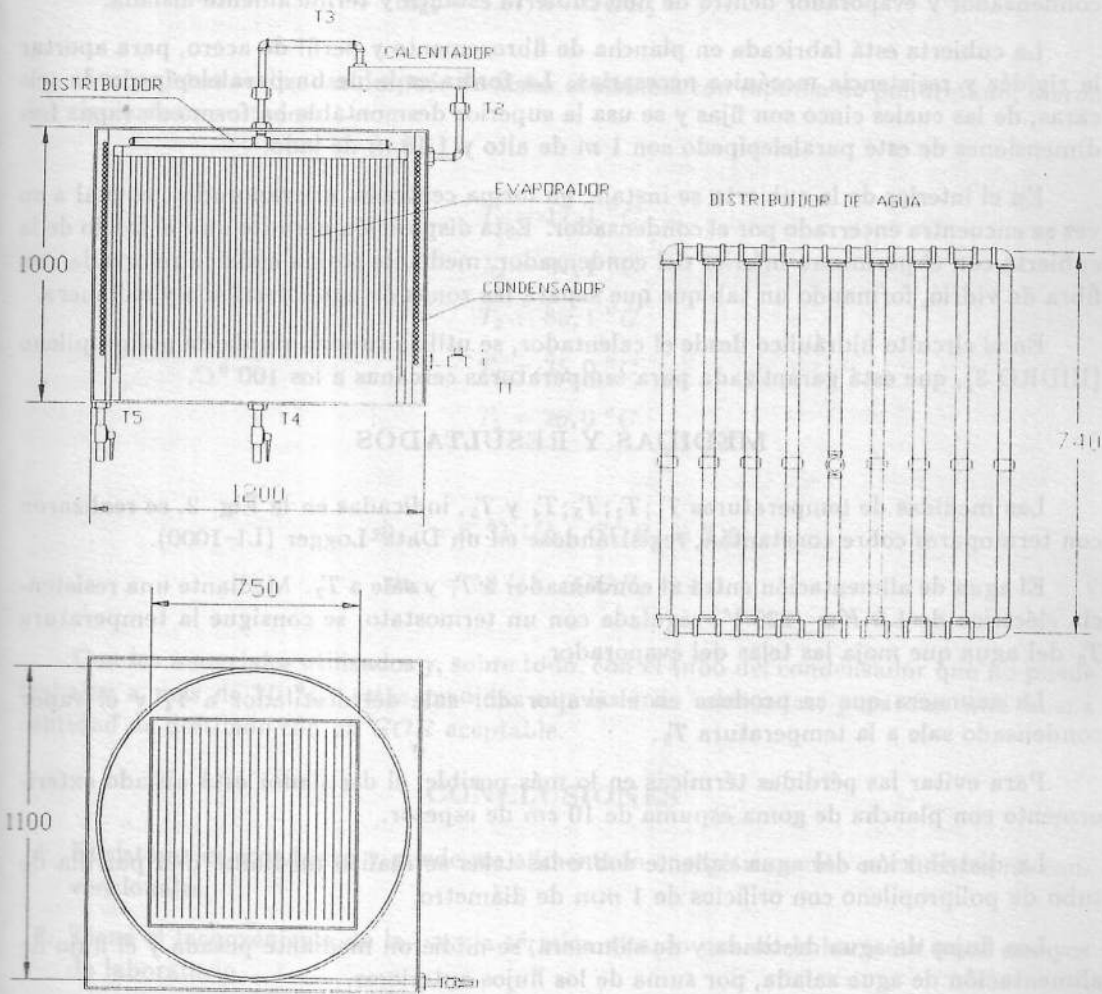


Fig. 2. DESTILADOR MULTIEFECTO DE UNA ETAPA.

Cubierta

Debido a la presencia de fenómenos netamente térmicos, se hace necesario confinar el condensador y evaporador dentro de una cubierta estanca y termicamente aislada.

La cubierta está fabricada en plancha de fibrocemento y perfil de acero, para aportar la rigidez y resistencia mecánica necesarias. La forma es la de un paralelepípedo de seis caras, de las cuales cinco son fijas y se usa la superior desmontable en forma de tapa. Las dimensiones de este paralelepípedo son 1 m de alto y 1.18 m de lado.

En el interior de la cubierta se instala, en forma centrada, el evaporador, el cual a su vez se encuentra encerrado por el condensador. Esta disposición permite unir el fondo de la cubierta con el perímetro inferior del condensador, mediante resina epóxica reforzada con fibra de vidrio, formando un tabique que separa las zonas de agua destilada y salmuera.

En el circuito hidráulico desde el calentador, se utiliza tubería rígida de polipropileno (HIDRO 3), que está garantizada para temperaturas cercanas a los 100 °C.

MEDIDAS Y RESULTADOS

Las medidas de temperaturas T_1 ; T_2 ; T_3 ; T_4 y T_5 , indicadas en la Fig. 2, se realizaron con termopares cobre constantán, registrándose en un Data-Logger (LI-1000).

El agua de alimentación entra al condensador a T_1 y sale a T_2 . Mediante una resistencia eléctrica de 1.5 Kw /220 V, regulada con un termostato, se consigue la temperatura T_3 del agua que moja las telas del evaporador.

La salmuera que se produce en el evaporador sale del destilador a T_4 y el vapor condensado sale a la temperatura T_5 .

Para evitar las pérdidas térmicas en lo más posible, el destilador está aislado exteriormente con plancha de goma espuma de 10 cm de espesor.

La distribución del agua caliente sobre las telas se realizó mediante una parrilla de tubo de polipropileno con orificios de 1 mm de diámetro.

Los flujos de agua destilada y de salmuera, se midieron mediante pesada y el flujo de alimentación de agua salada, por suma de los flujos anteriores.

Antes de aislar el sistema, se realizaron unas primeras medidas, dando los siguientes resultados:

$$T_1 = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 58,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 82,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 34,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 25,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{ad} = 4,7 \text{ l/h} \quad GOR_1 = 2,4$$

$$\dot{m}_{as} = 53 \text{ l/h} \quad GOR_2 = 2,7$$

Las pruebas realizadas después de aislar el sistema con espuma de poliuretano, dieron los siguientes resultados:

$$T_1 = 17,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 67,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 85,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 35,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_{ad} = 6,31 \text{ l/h} \quad GOR_1 = 3,6$$

$$\dot{m}_{as} = 58 \text{ l/h} \quad GOR_2 = 4,1$$

Con los materiales utilizados y, sobre todo, con el tubo del condensador que no puede trabajar a más de $70 \text{ } ^\circ\text{C}$, estas medidas son las más adecuadas, pues dan una buena cantidad de destilado con un *GOR* aceptable.

CONCLUSIONES

1. El sistema es económico y puede ser alimentado energéticamente con fuentes no convencionales.
2. Tiene el inconveniente de la inercia térmica alta, lo que no le hace útil para ensayos de laboratorio.
3. Se podría mejorar el comportamiento del destilador, aumentando la superficie del condensador con una segunda espiral de tubo.
4. Se podría también mejorar la condensación del destilador, añadiendo telas dispuestas verticalmente y mojadas continuamente con el mismo destilado, de esta forma se propiciaría la condensación por contacto directo entre el destilado y el vapor generado dentro del destilador.
5. La pureza del agua destilada obtenida, es de $100 \mu\text{s/cm}$, a pesar de ser la cubierta de fibrocemento.
6. En en futuro trabajo se intentará mejorar la eficacia del destilador, disminuyendo la tensión superficial mediante sustancias detergentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es consecuencia del intercambio de científicos patrocinado por el Subprograma VI del Programa CYTED.

REFERENCIAS

1. Harding, J. Apparatus for Solar Desalination. *Proceeding of the Institute of Civil Engineers*. 73. pp. 284. 1883.
2. Hirshmann, J. Evaporateurs est Destilateurs Solaires au Chili. *Proceedings of the U.N. Conference on New Sources of Energy*. V.6: pp. 224. Roma, 1961.
3. O. Heschl et al. Solar Sea-water Desalination with a High Efficiency Multi Effect Solar Still. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*. pp 2814-2818. Hamburg, 1987.
4. T. Baumgartner, D. Jung, F. Kössinger, R. Sizmann. Multi Effect Low Temperature Process for Solar Desalination. *Proceedings of the Seminar of New Technologies for the Use of Renewable Energy Sources in Water Desalination*. Athens, 1991.
5. T. Baumgartner et al. Desalination. 81 - (299-307), 1991.