

NUEVO DISEÑO DE DESTILADOR ATMOSFÉRICO DE TIPO MULTIEVAPORATIVO

Luis R. Saravia y Judith Franco*

INENCO⁺, Instituto de Investigación en Energía No Convencional.

Universidad Nacional de Salta, Calle Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina

RESUMEN

En este trabajo se propone un nuevo diseño de destilador atmosférico basado en el uso de un intercambiador con dos superficies de plástico por las que circula agua sin sal en contracorriente, calentada fuera del destilador con una fuente solar o con uso de biomasa. Una superficie está colocada en posición horizontal y calenta el agua con sal en una batea de poco espesor. La otra está colocada verticalmente sobre la horizontal y condensa el vapor de agua producido en la superficie horizontal. El intercambiador funciona como un "multiplicador" de calor, ya que por cada unidad de calor entregado en el exterior se transmite un múltiplo a través de las superficies de plástico. La transmisión se produce fundamentalmente mediante vapor de agua, con lo cual se multiplica la producción de agua destilada. En el trabajo se describe el sistema en detalle, se elabora una teoría de funcionamiento que permite el cálculo de la cantidad de agua que produce el aparato y se detalla una experiencia realizada con un prototipo de pequeño tamaño construido para demostrar la factibilidad del sistema.

INTRODUCCION

Se han propuesto en la literatura (1) diversos diseños de destiladores que utilizan el principio de efecto múltiple, es decir aprovechan el calor de condensación del vapor generado en una etapa para producir vapor en la siguiente, y trabajan a presión atmosférica. Ellos usan una mezcla de aire y vapor de agua, es decir aire húmedo, variando la presión parcial del vapor de agua en sus sucesivas etapas. En general son unidades de producción pequeña y trabajan sin requerimiento de energía mecánica o eléctrica, con el fin de ser usadas en zonas aisladas.

No ha sido tan común el uso del principio de múltiple "flash", es decir el aprovechamiento del calor de condensación del vapor generado para precalentar la solución salina que alimenta al destilador, en equipos que trabajan a presión atmosférica. Se ha propuesto en la literatura (2) el uso de dicho principio en un destilador de disposición vertical donde la solución salina evapora agua en el aire al caer a lo largo de un conjunto de telas verticales paralelas entre sí y el aire transporta el vapor por convección natural condensando el mismo en un intercambiador colocado en la cercanía de las telas, por donde llega la solución que en esa forma es precalentada la misma termina de ser calentada por vía solar y luego cae a lo largo de las telas. La solución debe ser movida por una bomba, ya que el circuito no es cerrado, lo que no permite el uso de este sistema en regiones sin energía eléctrica.

En este trabajo se propone un nuevo diseño de destilador atmosférico del tipo de múltiple flash que puede ser usado sin bomba. En las secciones que siguen se describe el mismo, se discute la teoría de funcionamiento y se detalla la construcción de un primer prototipo de pequeño tamaño destinado a comprobar la factibilidad experimental del sistema.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

El diseño propuesto se esquematiza en las figuras 1 y 2. Una caja cerrada y térmicamente aislada esta preparada de manera que su piso pueda funcionar como una batea donde se coloca una capa de poco espesor

+ Instituto UNSa-CONICET

* Becaria de Doctorado del CONICET

de la solución salina a evaporar. Un intercambiador de plástico de pequeño espesor y con su superficie dispuesta en forma horizontal, está sumergido en la solución. Un segundo intercambiador, de aspecto similar al primero, se coloca en el aire que contiene la caja, con su superficie dispuesta en forma vertical y centrada respecto a la caja. El primer intercambiador funciona como evaporador. El vapor se incorpora al aire, asciende por convección natural a lo largo de la pared de la caja y desciende en contacto con el otro intercambiador, condensando el vapor de agua. Una canaleta colocada debajo del intercambiador-condensador permite recoger el agua producida.

Los dos intercambiadores trabajan en contracorriente, circulando por los mismos agua sin sal en un ciclo cerrado.

Un calentador, que puede utilizar radiación solar o biomasa como fuente energética, eleva la temperatura del agua hasta T_{c1} , la mayor en todo el ciclo. El agua pasa por el intercambiador evaporador enfriando hasta la temperatura T_{c2} y luego por un dissipador de calor al aire, con lo cual se logra bajar la temperatura hasta T_{f2} . Finalmente el agua retorna por el intercambiador condensador aumentando la temperatura hasta el valor T_{f1} y entra al calentador.

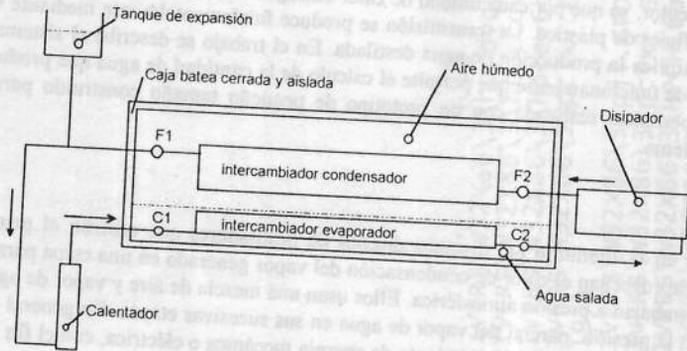


Fig 1.- Esquema del destilador multieaporativo.

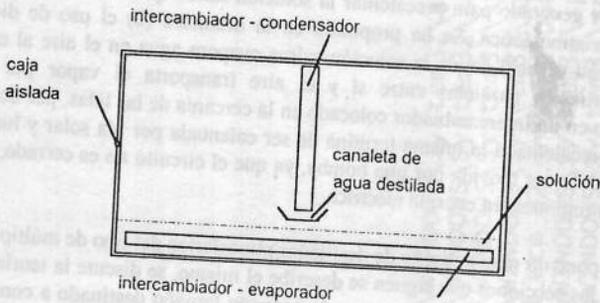


Fig. 2.- Corte esquemático del destilador

El dissipador es quien permite establecer entre los dos intercambiadores un salto de temperatura

$$\Delta T_{cf} = T_{c2} - T_{f2} = T_{c1} - T_{f1}$$

Dado que el mismo flujo de agua circula en todo el ciclo, el salto de temperatura se mantiene constante en todo punto a lo largo de los intercambiadores.

A lo largo de los intercambiadores se establece un salto de temperatura

$$\Delta T_{12} = T_{c2} - T_{c1} = T_{f1} - T_{f2}$$

El sistema funciona como un "multiplicador de calor" en el sentido de que el calor transmitido entre los intercambiadores es un múltiplo de calor entregado en el calentador, con un factor de multiplicación que dependerá de la relación entre los dos saltos de temperatura

El calor intercambiado está directamente relacionado con la cantidad de agua condensada por lo que el sistema produce agua destilada que puede ser varias veces mayor a la que corresponderá si el calor entregado en el calentador se utilizara directamente en el proceso de evaporación.

TEORÍA DE FUNCIONAMIENTO

El flujo de calor entregado en el calentador, Q_{cal} vale:

$$Q_{cal} = c_p \cdot m_a \cdot \Delta T_{cf}$$

donde m_a es el flujo de agua sin sal que circula por los intercambiadores y c_p es el calor específico del agua.

El flujo de calor total transmitido entre los intercambiadores valdrá

$$Q_{tot} = c_p \cdot m_a \cdot \Delta T_{cf} = c_p \cdot m_a \cdot \Delta T_{12}$$

Dado que el salto de temperatura entre los intercambiadores, ΔT_{cf} , es constante a lo largo del mismo, ese flujo de calor también puede ser expresado teniendo en cuenta un coeficiente de transferencia térmica medio

$$Q_{tot} = h_{tot} \cdot A_i \cdot \Delta T_{cf}$$

donde A_i es el área del intercambiador respecto al cual se evalúa la cantidad de calor. Q_{tot} es transmitida por radiación, convección del aire y evaporación del agua. La parte evaporativa puede ser evaluada como

$$Q_{evap} = h_{evap} \cdot A_i \cdot \Delta T_{cf}$$

donde h_{evap} es el coeficiente de transferencia evaporativo medio. En el caso de destiladores de tipo invernaderos el mismo puede ser calculado mediante la expresión de Dunkle (3). La geometría del sistema propuesto es algo diferente ya que la superficie de condensación es vertical. Dado que no se dispone del coeficiente para esta geometría se usará la expresión de Dunkle en lo que sigue. A los efectos de los cálculos que siguen las tablas I y II dan valores del coeficiente de transferencia medio evaporativo para dos temperaturas calientes, T_{c1} , iguales a 70 y 80 °C y distintos saltos de temperatura ΔT_{12} y ΔT_{cf} .

El coeficiente de transferencia medio total puede ser evaluado agregando la transferencia por radiación y convección de aire. Las tablas I y II dan valores del mismo para diferentes temperaturas.

El comportamiento del destilador como sistema evaporativo múltiple suele medirse mediante un coeficiente de performance r_p definido como

$$r_p = \frac{Q_{evap}}{Q_{cal}}$$

Si reemplazamos las expresiones anteriores:

$$r_p = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{tot}}} \cdot \frac{Q_{\text{tot}}}{Q_{\text{cal}}} = \frac{h_{\text{evap}}}{h_{\text{tot}}} \cdot \frac{\Delta T_{12}}{\Delta T_{\text{cf}}}$$

La expresión permite calcular el coeficiente de performance si se conocen temperatura más caliente T_{c1} y los dos saltos de temperatura.

Desde el punto de vista de diseño será necesario determinar las áreas de intercambiador A_i , la de disipador A_d , el flujo de calor a entregar Q_{cal} y el flujo de agua m_a necesarios para producir una cierta cantidad de agua por unidad de tiempo M_a . Como criterios para guiar el diseño se pueden elegir el valor deseado de r_p , la temperatura caliente a utilizar T_{c1} y el salto ΔT_{cf} . El valor de r_p debiera ser seleccionado mediante un balance económico. Valores altos de r_p permitirán funcionar con menor consumo de calor pero incrementarán las áreas de intercambiador, es decir, el tamaño del equipo.

La selección de T_{c1} dependerá de la fuente térmica a utilizar. La elección de ΔT_{cf} dependerá en parte de la temperatura ambiente T_a que fija el salto disponible.

El disipador elimina un flujo de calor igual a Q_{cal} . La ecuación será:

$$Q_{\text{cal}} = h_{\text{dis}} \cdot A_d \cdot (T_{c1} - \Delta T_{12} - \Delta T_{\text{cf}}/2 - T_a)$$

donde h_{dis} es un coeficiente de transferencia que dependerá del tipo de disipador a usar y T_a es la temperatura ambiente. Se ha expresado la temperatura media del disipador en términos de T_{c1} y los dos saltos de temperatura más conocidos.

Dada M_a se calcula Q_{evap} y a través de r_p se determina Q_{cal} . Luego se determina ΔT_{12} para satisfacer la ecuación que da r_p en función de los saltos de temperatura y teniendo en cuenta que el otro salto ya se conoce. Esta determinación se realiza por iteración, evaluando nuevos valores de los coeficientes a partir de las tablas para cada elección de ΔT_{12} . Conocidos todas las temperaturas se determinan las áreas y flujos de agua directamente a partir de las ecuaciones.

El cálculo anterior está basado en un funcionamiento estacionario. Si la fuente térmica es variable se deberá encarar el cálculo por vía numérica, dado el carácter de las ecuaciones involucradas.

A título de ejemplo se dan a continuación los datos de diseño de un sistema para producir 100 litros de agua por día. Como parámetros de diseño se elige una temperatura caliente de 90 C, un factor de performance de 3 y un salto de temperatura entre intercambiadores de 10 C. El cálculo detallado en la sección anterior indica que se deberá entregar un flujo de calor de 895 vatios, se deberán recircular 1840 litros por día de agua común, se instalará un área de intercambio de 5.3 m² y un área de enfriamiento de 3.6 m². El salto de temperatura entre extremos del intercambiador será de 35 C. Si la temperatura caliente se baja a 70 C, el área necesaria sube a 18 m².

Tabla I.- Coeficientes medios de transmisión térmica para $T_{c1} = 90$ C en w/m²C.

$\Delta T_{\text{cf}}, \text{C}$ $\Delta T_{12}, \text{C}$	h_{total}					$h_{\text{evaporativo}}$				
	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
10	66.4	98.6	110.5	113.9	113.4	55.0	86.3	97.9	101.0	100.4
20	55.7	81.9	91.5	94.1	93.7	44.7	70.1	79.4	81.8	81.3
30	47.5	69.2	77.1	79.3	78.8	37.0	57.9	65.5	67.5	67.0
40	41.1	59.4	66.1	67.9	67.5	31.1	48.7	55.0	56.6	56.1
50	36.2	51.8	57.5	59.0	58.7	26.54	41.5	46.9	48.2	47.8

Tabla II.- Coeficientes medios de transmisión térmica para $T_{C1} = 70\text{ C}$ en $\text{w/m}^2\text{C}$

$\Delta T_{cf}, \text{ C}$ $\Delta T_{12}, \text{ C}$	h_{total}					$h_{\text{evaporation}}$				
	1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
10	31.0	43.7	48.3	49.4	49.0	21.4	33.5	37.7	38.7	38.2
20	26.6	37.0	40.7	41.6	41.3	17.4	27.2	30.6	31.3	31.0
30	23.3	31.9	35.0	35.8	35.5	14.5	22.5	25.3	25.9	25.6
40	20.7	28.1	30.7	31.3	31.1	12.2	19.0	21.4	21.9	21.6
50	18.6	25.1	27.4	27.9	27.7	10.5	16.4	18.4	18.8	18.6

PROTOTIPO

Se ha armado un primer prototipo con el único fin de comprobar la factibilidad experimental del sistema. La caja ha sido construida en poliestireno expandido con un espesor de 5 cm, una longitud de 80 cm, ancho de 30 cm, y altura de 25 cm.

Los intercambiadores fueron fabricados en chapa de policarbonato de 8 mm de espesor, aprovechando su estructura celular como canales para pasar el agua. En cada extremo se ha colocado un colector metálico y una cañería de salida. El calentador es eléctrico, fabricado con dos caños de hierro galvanizado de distintos diámetros colocados en forma concéntrica. En el espacio anular corre el agua y en el caño central se colocó un calefactor eléctrico.

En esta etapa no se intentó obtener circulación por convección natural, reemplazándose el disipador por un termostato con bomba. El termostato fija la temperatura T_{12} y se usa la bomba del mismo para mantener la circulación. El agua de retorno en el punto C2 se enfría y se vuelve al termostato.

Dentro de la caja se han colocado baffles verticales de plástico para evitar el movimiento lateral de aire y agua.

Las experiencias realizadas muestran un funcionamiento adecuado, con una buena distribución de temperatura y la condensación de agua en la placa más fría. Las mismas se realizaron con una temperatura caliente de 85° C , un salto entre placas de 10° C y un salto a lo largo de intercambiador de 40° C . La temperatura del termostato era de 35° C y la ambiente de 20° C .

No se logró llevar a cabo medidas de agua destilada en condiciones estacionarias en virtud de la formación de burbujas de aire en los intercambiadores, no habiendo sido prevista el circuito para una correcta eliminación de las mismas. Los caños de entrada y salida de los intercambiadores tenían un diámetro pequeño y las burbujas producían un flujo de agua muy desparejo.

Se hacen necesario tomar algunas precauciones para corregir estos problemas: caños de conexión de mayor diámetro y tanque de evaporación en ambos extremos de manera que el aire o vapor pueda eliminarse en forma natural sin tener que recorrer todo el circuito para salir.

DISCUSION

El diseño propuesto tiene algunas ventajas potenciales respecto a diseños anteriores:

1) En el interior de los intercambiadores solo se mueve agua sin sal, la que evita el problema de formación de incrustaciones en una zona de difícil limpieza. La sal se deposita en el exterior de los intercambiadores y en las cajas, que son de limpieza más sencilla.

- 2) La circulación de agua se realiza en circuito cerrado, por lo que potencialmente puede ser efectuada por convección natural. Este es importante en el uso en zonas aisladas, sin generación eléctrica.
- 3) La construcción puede encararse en plástico, abaratando considerablemente la construcción. El tipo de plástico dependerá de la temperatura efectiva de trabajo. Con 70 C se puede trabajar con polietileno, por lo que se puede armar un equipo de muy bajo costo.
- 4) La condensación ocurre en superficie vertical, por lo que no hay problemas de recolección de las gotas de agua destilada.
- 5) El calentador esta desacoplado del evaporador-condensador, por lo que se le puede dar la forma más adecuada para el mejor aprovechamiento de la fuente térmica.
- 6) Se pueden usar factores de performance altos, aunque ello implica mayor área para una misma producción. La selección del factor de performance dependerá de un análisis económico.

El uso del equipo en forma continua, 24 horas por día, permite maximizar su producción. En el caso de una fuente solar, el uso de los estanques con gradiente salino puede ser particularmente eficaz en este aspecto. El calentador puede ser colocado directamente en la capa convectiva inferior y trabajar por convección natural aprovechando la profundidad del estanque para producir la diferencia de presión. Si se utiliza un colector común el calentador puede ubicarse en el tanque acumulador.

REFERENCIAS

- 1.- Franco, J. y Saravia, I., Destilador Solar Multietapa. Actas de la 15ta. reunión de trabajo de la ASADES, pp. 403, tomo II, Catamarca, 1992.
- 2.- Baumgartner, T., Jung, D., Kössinger, F. and Sizmann, R., Multi-effect low temperature process for solar desalination. proceedings on the Seminar of new technologies for the use of renewable energy sources in water desalination, Athens, 1991.
- 3.- Dunkle, R. V., Solar water distillation : the roof-type still and a multiple effect diffusion still. Int. Heat transfer Conf., part V, intern. dev. of heat transfer, pp. 895, University of Colorado, 1961.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	26.4	28.6	28.5	23.5	13.4	23.0	26.3	27.8	10.7	10.7
2	26.4	28.6	28.5	23.5	13.4	23.0	26.3	27.8	10.7	10.7
3	41.1	59.4	66.1	67.9	67.5					
4	30.2	31.8	27.5	29.9	28.7	25.4	11.3	7.46	28.2	27.9