

## PRODUCCION Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN DESTILADORES DE BATEA CON DISTINTAS PENDIENTES EN LA CUBIERTA. PRIMEROS RESULTADOS.

Judith Franco<sup>1</sup>, Irene De Paul, Sonia Esteban  
INENCO - Instituto UNSa-CONICET  
Calle Buenos Aires 177 -4400 Salta, Argentina  
Tel.: 54 87 255424 - Fax: 54 87 255489  
Email: francoj@ciunsa.unsa.edu.ar

**Resumen:** Se estudia la influencia de la pendiente en la cubierta de un destilador de batea sobre el comportamiento térmico y la producción de agua desalinizada, para ello se construyeron dos destiladores de batea idénticos, donde la única diferencia es la pendiente de la cubierta, en un caso es de 22° y en el otro es de 4°, se analizan los resultados de las mediciones y se comparan con los resultados de laboratorio.

**Palabras clave.** Destilador de batea, pendiente.

### INTRODUCCION

En trabajos anteriores (De Paul y Hoyos, 1999, De Paul, 2000) se estudió en el laboratorio el comportamiento térmico y la producción en destiladores de batea de distintas pendientes. Con el fin de comparar estos resultados con los que se obtienen en condiciones reales de funcionamiento (experiencias de campo), se ensayaron dos destiladores cuyas características se describen a continuación. Los primeros resultados muestran que el comportamiento térmico y de producción es diferente en cada uno de ellos. En este trabajo se intenta dar una primera explicación de esta diferencia a partir de la experiencia adquirida en el laboratorio. Estos resultados son parciales y requieren de mayor experimentación en distintas condiciones de funcionamiento a fin de determinar la pertinencia del análisis realizado.

En un trabajo anterior se describen los destiladores portátiles de madera (Saravia y Franco, 1997). Los destiladores fueron construidos con batea de madera semidura cuyas dimensiones internas: 2 m de largo por 1m de ancho y 10 cm de profundidad, con aislación de poliestireno expandido en la parte inferior. La parte superior se encuentra cubierta con una loneta de PVC negro (del tipo de pileta de lona) que la impermeabiliza y permite retener el agua.



Foto 1. Destiladores de batea con diferente pendiente.

La cúpula de vidrio se construye por separado; la misma está compuesta por las canaletas, los laterales triangulares y los vidrios. Las canaletas se construyen con chapa de acero inoxidable, estas son más largas que el destilador para poder tener la descarga al exterior. Los ángulos constituyen la estructura de la cúpula, se construyen con chapa de acero inoxidable y tienen

---

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

también la función de hacer un sello de agua para el vapor. Las tapas laterales son de aluminio tienen forma triangular, los 4 paños de vidrios de 4 mm de espesor apoyan sobre las tapas laterales y el borde de la canaleta y se sellan con pegamento siliconado.

La característica principal que diferencia ambos destiladores es que la cúpula de vidrio a dos aguas tiene distinta pendiente, en uno es de 22° y en el otro es de 4°.

La superficie interior del vidrio debe estar completamente limpia, en especial sin manchas del tipo grasosas como las que dejan los dedos, debido a que en los puntos donde está sucio el vidrio, el vapor condensa formándose gotas que vuelven a caer al agua. Para una mejor limpieza del mismo, una vez armado, y antes de comenzar a recolectar el agua destilada se agrega una solución de amoníaco en el agua y se deja que funcione durante 2 o 3 días, el vapor de amoníaco condensa en el vidrio y disuelve las grasas quedando completamente limpio. Después se desagota completamente y se lava con agua la batea. La foto 1 muestra los destiladores en el momento de medidas.

## EXPERIENCIAS REALIZADAS

El objetivo de realizar estas experiencias fue el de medir los dos destiladores en idénticas condiciones para poder comparar los resultados de ambos, tanto la producción de agua destilada como su evolución en temperaturas.

Para realizar las experiencias se prepararon los destiladores de manera tal de tener las mismas condiciones iniciales de funcionamiento. Se agregó la misma cantidad de agua a cada uno y se realizó la limpieza de los vidrios de idéntica manera.

Las experiencias se realizaron en días claros midiendo con termocuplas la temperatura del agua de la batea y dos temperaturas de vidrio, esto se realizó para poder tomar medidas comparables con las realizadas en el laboratorio, las temperaturas se midieron automáticamente cada 15 minutos y la producción de agua se midió, manualmente cada hora. Los valores medidos de producción se encuentran en la tabla 1 y las temperaturas se muestran en las gráficas siguientes.

Tabla 1. Producción de destilado.

1° Día			2° Día		
Hora	Destilador Alto	Destilador Bajo	Hora	Destilador Alto	Destilador Bajo
12:30	0	0	12:00	30	50
1:30	150	170	1:00	55	80
2:30	245	305	2:30	370	480
3:30	460	505	3:30	500	530
4:30	620	705	4:30	530	600
5:30	490	510	5:30	520	520
6:30	470	480	6:30	540	510
7:30	325	335	7:30	380	315
8:30	255	240	8:30	300	260
9:30	225	195	9:15	160	150
10:30	210	180	9:00 a.m.	770	600
9:00 a.m.	615	520			
Total	4065	4145	Total	4155	4095
Total de los dos días:		Alto: 8220	Bajo 8240		

## ANÁLISIS DE LOS VALORES MEDIDOS

Las figuras 1 y 2.a muestran los valores de temperaturas medidos y la figura 2.b los valores de producción en función del tiempo, correspondientes a dos días representativos del total de experiencias realizadas. Estas gráficas muestran una variación en el comportamiento térmico de cada destilador, si bien los dos destiladores arrancan con las mismas temperaturas, el bajo levanta más temperatura durante las horas de sol, mientras que una vez que se pierde el sol la temperatura disminuye más comparativamente con el alto, esto hace que la producción de agua sea mayor durante las horas de sol en el destilador más bajo y menor durante la noche. En valores totales no hay una gran diferencia en la producción de agua destilada.

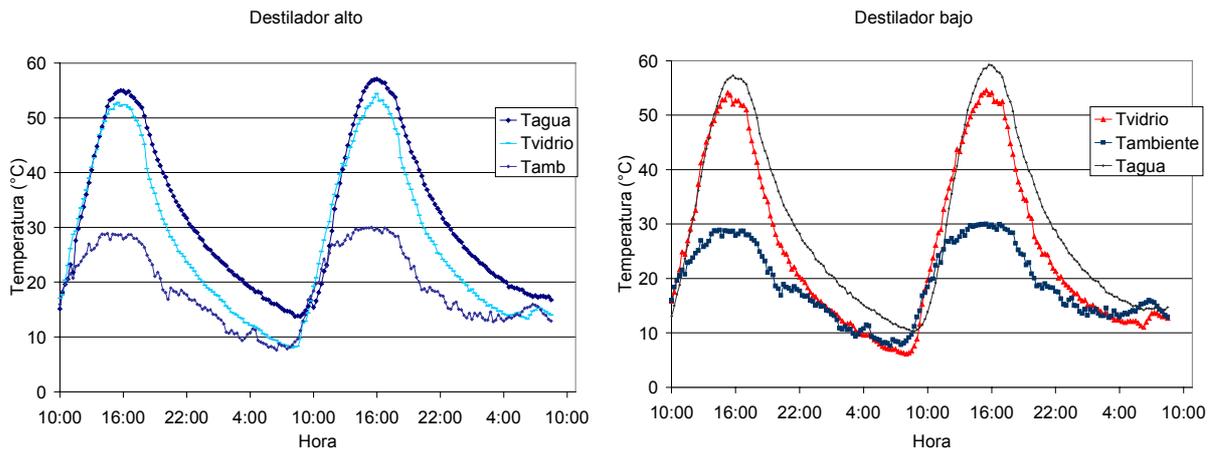


Figura 1: Valores de temperaturas medidos en cada uno de los destiladores

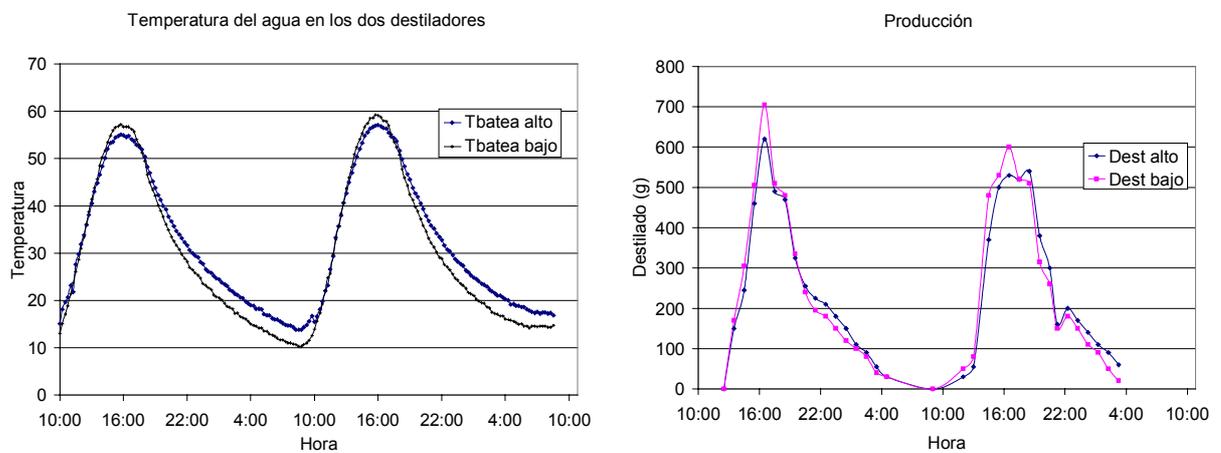


Figura 2a: Valores de temperatura de batea

Para ambos destiladores

Figura 2b: Valores de producción

El modelo de Dunkle modificado por Clark no puede explicar este comportamiento diferente de ambos destiladores ya que no tiene en cuenta la diferencia de geometría, ni la naturaleza del medio encerrado.

La geometría del equipo aparece en el flujo de calor desde la superficie del agua a la cubierta por convección libre:  $q_c$ . Esta cantidad se puede estimar usando la ecuación de transferencia de calor

$$q_c = h_c (T_{\text{agua}} - T_{\text{vidrio}})$$

El valor de  $h_c$  se obtiene de datos empíricos, que usualmente se correlacionan usando ecuaciones adimensionales del tipo Nusselt - Grashof, la que se aplica en este caso:

$$\frac{h_c x}{k} = K \left[ \left( x^3 \rho^2 g \beta \Delta T / \mu^2 \right) \left( \mu C_p / k \right) \right]^n$$

en la que  $x$  es el espacio entre el agua y el vidrio,  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y el vidrio,  $\rho$  la densidad,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\beta$  el coeficiente de expansión térmica,  $\mu$  la viscosidad,  $C_p$  el calor específico y  $k$  la conductividad térmica del aire húmedo evaluados a la temperatura promedio. Los valores de  $K$  y  $n$  dependen de la magnitud del número de Grashof,  $Gr = x^3 \rho^2 g \beta \Delta T / \mu^2$ . Los valores generalmente aceptados de  $K$  y  $n$  son los siguientes:

$Gr < 10^3$	$K = 1$	$n = 0$
$10^4 < Gr < 3.2 \cdot 10^5$	$K = 0.21$	$n = 1/4$
$3.2 \cdot 10^5 < Gr < 10^7$	$K = 0.075$	$n = 1/3$

Para las condiciones de humedad, temperatura y geometría que se dan en los destiladores solares tipo invernadero con un espacio agua - cubierta mayor o igual que 75 mm, el valor del número de Grashof cae en el último de los tres rangos anteriores, donde  $n = 1/3$ , en esta expresión  $x$  se puede cancelar indicando que  $h_c$  es independiente del tamaño del equipo para la mayoría de los destiladores.

Esta ecuación además presupone un flujo laminar dentro del equipo, lo cual no es lo observado según (De Paul *et al.* 1997, 1999). Si bien este modelo puede predecir en forma global el comportamiento de los destiladores, no predice estas pequeñas diferencias en el comportamiento de ambos.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se intentará dar una explicación de los resultados obtenidos a la luz del conocimiento previo adquirido en el laboratorio sobre el funcionamiento del destilador. En esta discusión se hará referencia a las figuras (1) y (2) que muestran las temperaturas y la producción medidas.

Se supone que la batea del destilador es idéntica para ambos destiladores, que contienen la misma masa de agua y que la potencia que reciben del sol es la misma. Bajo estas hipótesis, la única diferencia en su funcionamiento proviene de la pendiente de las cubiertas. Al tener diferente pendiente, tienen diferente área de condensación y el volumen encerrado en el destilador es más grande en el de mayor pendiente.

### Comportamiento diurno

A partir de idénticas condiciones iniciales, la potencia que llega al agua del sol,  $Q$ , se emplea durante la mañana en calentar el agua de las bateas, que, por tener la misma masa, aumentan su temperatura de la misma manera (figura 2 a). En general, la potencia  $Q$  se emplea en parte en calentar el agua y en parte en generar vapor de agua que se incorpora al ambiente llevando consigo el calor de cambio de fase. Dado que el volumen encerrado en el destilador bajo es menor, el ambiente en su interior alcanza la saturación antes que en el alto, por lo que comienza a destilar antes (figura 2 b). En esta etapa el contenido de agua en el ambiente del destilador bajo es mayor que en el alto (figura 3).

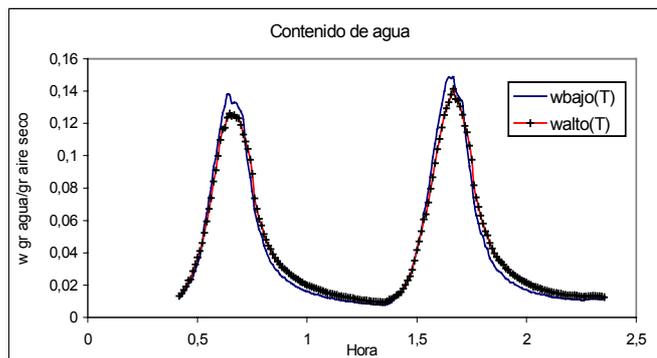


Figura 3. Contenido de agua en Kg de agua / Kg de aire seco, en ambos destiladores.

En la condición en que el ambiente de ambos destiladores está saturado, la convección natural arrastra hacia arriba el vapor que se genera sobre la superficie del agua. Este fenómeno está regido por el número de Rayleigh que depende de la tercera potencia de la longitud característica, en este caso la altura  $h$  entre la superficie del agua y la cúspide de la cubierta, y linealmente de la diferencia de temperatura entre agua y cubierta. La relación de alturas entre ambos destiladores determina que el empuje convectivo sea 27 veces mayor en el alto que en el bajo para un mismo  $\Delta T$ :

$$\left( \frac{h_{alto}}{h_{bajo}} \right)^3 = \left( \frac{0.235m}{0.08m} \right)^3 = 27$$

Por lo tanto, la presión de vapor sobre el agua en el destilador alto es menor que en el bajo y la rapidez de producción de vapor es mayor. Ante una misma potencia recibida  $Q$ , ésta se emplea mayormente en generar vapor y por lo tanto la temperatura del agua en el alto aumenta menos que en el bajo. Estas condiciones se alcanzan en los momentos de máxima insolación como se puede apreciar en la figura (2 a). Tanto en laboratorio como en experiencias a la intemperie se pudo comprobar que, independientemente de la complejidad de los procesos involucrados, la producción del destilador depende fundamentalmente de la temperatura del agua en la batea, por lo cual en las horas de mayor insolación el destilador bajo debe producir más, debido a que el agua tiene una temperatura mayor (figura 2 b).

### Comportamiento nocturno

Cuando se pone el sol los destiladores comienzan a enfriarse por conducción y convección hacia el exterior desde las bateas y desde las cubiertas. Alrededor de las 18:30 la temperatura del agua en los dos destiladores y por lo tanto la producción de agua es la misma (figuras 2 a y b).

La masa de agua destilada es pequeña comparada con la masa total en la batea, por lo que se puede seguir suponiendo que ambos destiladores contienen la misma masa de agua. Entonces las pérdidas hacia el exterior serán iguales y la temperatura bajará en ambos la misma cantidad.

Las pérdidas desde la cubierta son principalmente de tipo convectivo por acción del viento. La bibliografía [Burmeister, 1983] muestra que para flujo turbulento, que es el que naturalmente se produce por acción del viento, se utiliza la relación  $Nu$  vs  $Re$ . Esta relación muestra que la energía térmica transferida desde una superficie es independiente de su pendiente. Por lo tanto, la relación entre las pérdidas en ambos destiladores está determinada por la relación entre las superficies de las cubiertas, con lo que el destilador alto pierde un 7% más que el bajo. Por otra parte, las masas de las cubiertas son diferentes en la misma proporción; entonces el calor sensible acumulado en el alto es mayor, por lo que se compensa la mayor pérdida. En resumen podemos suponer que las pérdidas hacia el ambiente a través de las cubiertas contribuyen en la misma cantidad a bajar la temperatura del agua.

### Influencia del medio encerrado en el destilador

¿Qué ocurre sobre las caras internas de las cubiertas?. El vapor que se condensa sobre el vidrio libera calor latente que contribuye a calentar la cubierta. Al no haber insolación, y ante iguales pérdidas al ambiente, una diferencia de temperatura en los vidrios sólo puede explicarse por este calor de cambio de fase. Como se señaló anteriormente, el empuje convectivo es mayor en el alto, por lo que la transferencia de vapor hacia las cubiertas es más efectiva en este caso y el calor latente liberado es mayor, entonces es de esperar una temperatura más alta en la cubierta del destilador alto que en el bajo. En la figura (1) puede comprobarse que efectivamente esto es lo que ocurre.

Siendo la temperatura del agua la misma en ambos destiladores, y la temperatura de la cubierta mayor en el alto, la temperatura del vapor encerrado en el ambiente, definida como el promedio entre ambas [De Paul y Hoyos 1999], es mayor en el alto que en el bajo.

$$T_v = \frac{T_{\text{agua}} + T_{\text{cubierta}}}{2}$$

Si  $T_{\text{vapor bajo}} < T_{\text{vapor alto}}$ , la presión de vapor en el bajo es mayor que en el alto, la evaporación disminuye y por lo tanto el contenido de agua  $w$  es menor. Esto se puede comprobar en la figura (3).

A partir de la condición en que la temperatura del agua en ambos es la misma, ¿cómo evoluciona cuando no hay calentamiento del sol?. Es necesario analizar el intercambio térmico entre el agua y el medio encerrado en los destiladores. Para simplificar el análisis se supone que sobre el agua hay un volumen que contiene una mezcla de aire seco, vapor de agua y agua condensada en gotas [De Paul y Hoyos 1999]. Este volumen tiene diferente espesor en cada destilador debido a la diferencia de pendiente en las cubiertas (figura 4): en el alto el espesor es 4 cm mayor que en el bajo.

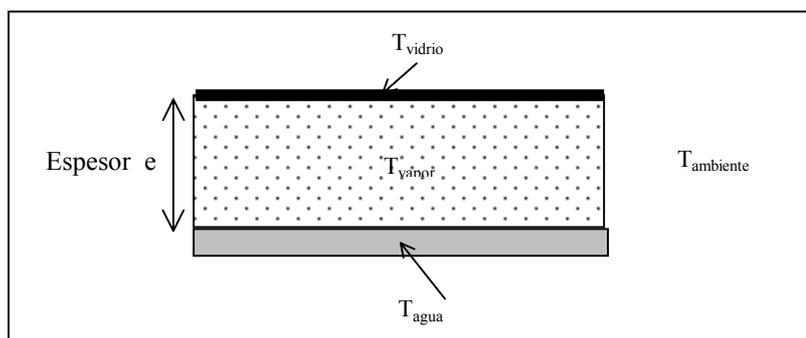


Figura 4. Esquema simplificado para analizar el intercambio agua-vapor.

Esta mezcla se comporta desde el punto de vista radiativo como un cuerpo negro [Mason, 1964] y por lo tanto, el intercambio radiativo no se produce entre el agua y el vidrio de la cubierta, [Howe y Tleimat, 1977] sino entre el agua y el medio, por una parte, y entre el medio y el vidrio por otra (De Paul, 2000).

En trabajos previos [De Paul y Hoyos 1999] se mostró que el número de Rayleigh en los destiladores, en el rango de temperaturas de funcionamiento normal, es del orden de  $10^5$  a  $10^6$ . Bajo estas condiciones el flujo es turbulento, con una estructura llamada *de capa límite*. En este caso la transferencia térmica desde el agua hacia el vapor,  $q$ , se realiza por

conducción a través de la capa límite de espesor  $\delta$ . La temperatura del agua disminuye en un  $\Delta T$  en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , según la siguiente ecuación: [Burmeister, 1983].

$$q = m * c_p * \Delta T = \left( \frac{k}{\delta} \right) * A * (T_{\text{agua}} - T_{\text{vapor}})$$

Suponiendo que el espesor  $\delta$  es el mismo en ambos destiladores, al ser  $T_{\text{vapor alto}} > T_{\text{vapor bajo}}$ , entonces  $q_{\text{alto}} < q_{\text{bajo}}$  y resulta  $\Delta T_{\text{alto}} < \Delta T_{\text{bajo}}$ . El agua del destilador bajo se enfría más que la del alto, y al ser su temperatura menor destila menos que el alto. Esta situación se mantiene durante toda la noche dando como resultado que la temperatura del agua disminuye más en el bajo que en el alto y la producción del destilador alto es mayor durante las horas en las que no hay sol (figura 2 a y b).

## CONCLUSIONES

Los resultados de las primeras experiencias realizadas muestran que la distinta pendiente en las cubiertas de los destiladores de batea provocan un comportamiento térmico y una producción diferente. Si bien los modelos convencionales pueden predecir la producción global diaria de los destiladores, son insuficientes para describir este comportamiento en destiladores de distinta geometría.

Esto puede originarse en que estos modelos no tienen en cuenta la naturaleza del medio encerrado en el destilador, la característica turbulenta del flujo, ni la geometría, que condiciona la circulación y la transferencia de calor y masa en su interior.

La experiencia adquirida en los ensayos de laboratorio permite dar una primera explicación al diferente comportamiento de los destiladores, pero se requiere aún más ensayos, tanto de laboratorio como de campo, para confirmar si esta explicación es totalmente válida o hay otros aspectos a tener en cuenta.

## REFERENCIAS

- Burmeister. "Convective heat transfer". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU. (1983)
- De Paul I. "Estudio experimental de la transferencia de energía por convección natural en recipientes cerrados empleando modelos a varias escalas". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exacta. Universidad Nacional de Salta. (2000)
- De Paul, I. Y Hoyos, D. "Comportamiento fluidodinámico de un destilador solar tipo batea con cubierta a dos aguas" Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 6, p27, 1999.
- De Paul, I.; Hoyos, D.; Saravia, L.; "Circulación y Velocidad del Vapor de Agua en Destiladores de Geometría Diferente", Presentado en la XX Reunión de Trabajo de ASADES, Rio Cuarto, 1997.
- Howe, E.D. and Tleimat B.W., "Fundamentals of Water Desalination", Solar Energy Engineering, A.A.M. Sayigh, Academic Press, Cap. 20, 1977.
- Howe, E.D., "Distillation of Sea Water", Solar Energy Technology Handbook, W.C. Dickinson, P.M. Cheremisinoff, Marcel Dekker Inc, Cap. 33, 205-237, 1980.
- Mason, B.J. "The Physics of Clouds". (1964)
- Saravia, Franco, "Destilador Solar De Baja Pendiente" Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar, pp.65-68, Volumen 1, N°1 Año 1997.

**ABSTRACT:** The influence of the covered slope is studied on a basin type solar still for the production and thermal behavior. For this experience two identical basin type solar still with the only difference in a slope cover were built. One with a 22° slope and the other with 4°. The measure temperature and production are analyzed and compared with laboratory results.

Keywords: Solar still, slope