

BALANCE DE ENERGIA Y FUNCIÓN DE PREDICCIÓN PARA UN DESTILADOR SOLAR TIPO BATEA

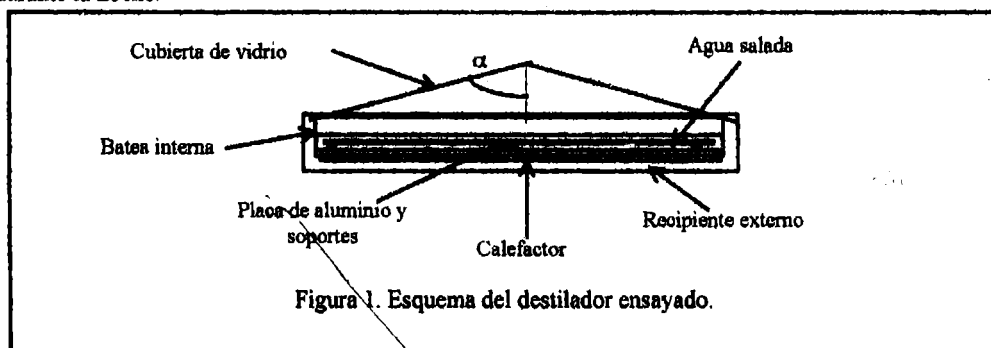
Irene De Paul, Daniel Hoyos, Luis Saravia*
 INENCO# - Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta
 TE: 87-255424 - E-mail: depaul @ ciunsa.edu.ar

RESUMEN

En base a las medidas realizadas sobre un módulo de destilador tipo batea, a escala real, cuya geometría y parámetros experimentales pueden variarse de manera controlada, se realizó un balance energético estableciendo el porcentaje de la energía suministrada que se emplea en la producción del destilado y se pierde hacia el ambiente. Se establecieron correlaciones empíricas de la productividad con la temperatura del agua T y la inclinación de las cubiertas y a partir de estos resultados se encontró una función de predicción para la productividad por unidad de área de condensación. Se comparan los resultados obtenidos a partir dicha ecuación con los valores medidos.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Con el objeto de estudiar la influencia de la inclinación de las cubiertas sobre la productividad de un destilador tipo batea, se construyó un módulo de destilador, cuyas características se describen en De Paul, (1995 y 1996) y se esquematizan en la Figura 1. Se ensayaron dos configuraciones, una con $\alpha = 45^\circ$ y otra con $\alpha = 70^\circ$. Se midió temperatura empleando termocuplas de Cr-Ni y un sistema automático de adquisición de datos que cada 15 minutos registra la temperatura del agua T_a , del ambiente T_{amb} y de la superficie interior de la cubierta. Se empleó un termógrafo infrarrojo para medir la temperatura exterior de las cubiertas. El rango de medida fue de 5°C alrededor de la temperatura media que se quiere medir, con una precisión de 0.2°C . El calentamiento se realizó a potencia constante durante un lapso de 10 hs aproximadamente, a partir de las 8 hs de la mañana, alcanzándose el estado estacionario alrededor de las 14:30 hs; alrededor de las 19 hs se cortó la calefacción permitiendo que el sistema se enfríe durante la noche.



El volumen destilado fue recogido en vasos graduados, calculándose la *productividad diaria* como el volumen destilado en un período de 24 hs, la *productividad promedio horaria* como el volumen destilado por hora durante el período en que el sistema funciona en estado estacionario y el *volumen destilado por unidad de área de condensación*, PUA.

BALANCE DE ENERGÍA

En el cálculo del balance energético realizado sobre el destilador se tuvo en cuenta la potencia eléctrica suministrada, las pérdidas térmicas hacia el entorno producidas por conducción, convección y radiación, y la energía térmica evacuada por el agua condensada, que se supone lo hace a la temperatura media de las cubiertas. (Figura 2). El balance se realizó con $\alpha = 70^\circ$, en estado estacionario, midiendo con termógrafo la temperatura de todas las superficies externas del destilador. En experiencias separadas se midió la conductividad térmica del vidrio y la emisividad de la cubierta, obteniéndose los siguientes valores: $k = 0.347 \text{ W / m }^\circ\text{C}$, y $\epsilon = 0.95$. Los coeficientes convectivos hacia el ambiente, sobre cubiertas, caras verticales y piso se calcularon a partir de las expresiones propuestas por Mac Adams (1978).

* Investigador del CONICET

Instituto UNSa - CONICET

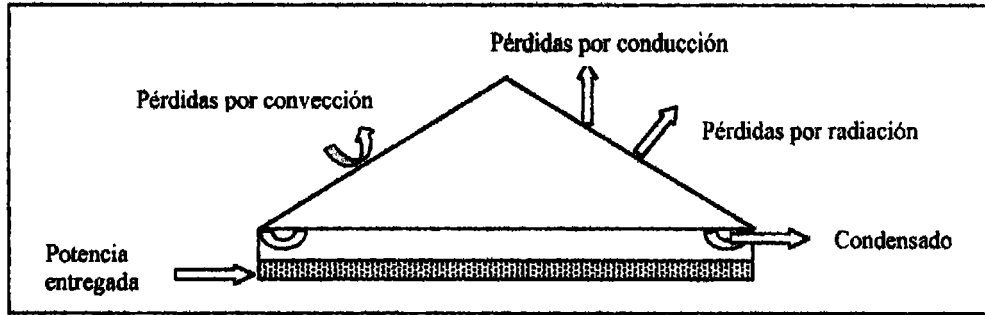


Figura 2. Esquema del balance de energía en el destilador.

La Tabla I muestra los resultados obtenidos, pudiéndose apreciar que el balance cierra, con una diferencia del 2%; el condensado representa el 60% de la potencia suministrada, mientras que las pérdidas convectivas representan el 2%, las conductivas el 6%, las radiativas el 30%. Es de esperar que en experiencias al aire libre las pérdidas convectivas sean mayores.

Tabla I. Balance de energía en el destilador, en Wattios.

Descripción	Area m ²	Convección	Conducción	Radiación
cara derecha, vidrio	0,816	2,40	9,69	92,54
cara izquierda, vidrio	0,816	2,44	10,10	97,76
cara posterior, telgopor	0,118	0,34	0,88	-1,05
cara anterior, vidrio	0,108	0,44	2,98	11,64
pie, 5 cm de aire	1,58	5,71	13,10	-35,19
paredes laterales, telgopor	0,544	0,72	1,95	18,94
paredes anterior/posterior, telgopor	0,464	0,61	1,40	14,45
Totales:		12,7	39,6	198,5
Potencia suministrada P, W		647	% P	
Pérdidas:				
convección, W	12,7		1,98	
conducción, W	39,6		6,15	
radiación, W	198,5		30,37	
Total perdido:	248,9		38,47	
condensado, W	388,6		59,75	
Total evacuado:		635,5	98,23	
diferencia		12,0	1,85	

EFICIENCIA DEL DESTILADOR.

De acuerdo a Duffie y Beckman (1980) se calculó la eficiencia medida en el destilador y se la comparó con los valores teóricos que se emplean normalmente en etapas de diseño.

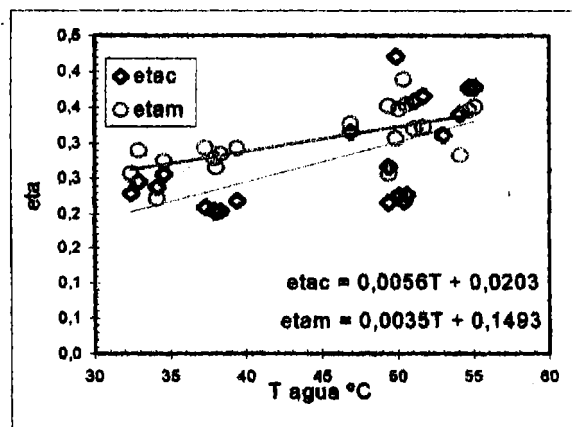


Figura 3: comparación de las eficiencias medidas y calculadas para $\alpha = 45^\circ$, en función de la temperatura del agua

Eficiencia medida: $\eta_m = m \lambda / P$ (1)

Eficiencia calculada: $\eta_c = 9.15 \times 10^{-7} h' (p_a - p_i) \lambda / P$ (5) (2)

con $h' = 0.884 [T_a - T_i + (p_a - p_i) T_a / (2016 - p_a)]^{1/3}$

donde m es la rapidez másica de producción en Kg/ s, λ es calor latente de vaporización en J/Kg., P es la potencia suministrada en W, T_a y T_t son las temperaturas del agua y del techo en °C, p_a y p_t son las presiones de vapor a las temperaturas T_a y T_t , respectivamente, en mm Hg. Se observa en la Figura 3 que la eficiencia medida es un 20% a un 40% mayor que la calculada, con una dependencia menor de la temperatura del agua que lo que predice el cálculo. Este comportamiento es común a ambas configuraciones. Esta diferencia puede provenir de las características fluidodinámicas de la circulación del vapor dentro del destilador, determinadas por su geometría, y la distribución de temperaturas en su interior, que no están tenidas en cuenta en la expresión general de la eficiencia calculada.

FUNCIÓN DE PREDICCIÓN

Las Figuras 4 y 5 muestran el resumen de las medidas de productividad diarias por unidad de área de condensación, PUA, efectuadas. Se realizaron ajustes lineales de la productividad en función de la temperatura del agua y del ángulo α , obteniéndose las siguientes expresiones.

$$P(T, \alpha = 45^\circ) = 87.063 T - 2276.6 \quad (3)$$

$$P(T, \alpha = 70^\circ) = 84.202 T - 2369.0 \quad (4)$$

$$P(T = 35^\circ\text{C}, \alpha) = -7.701 \alpha + 1117.2 \quad (5)$$

$$P(T = 55^\circ\text{C}, \alpha) = -9.99 \alpha + 2961.4 \quad (6)$$

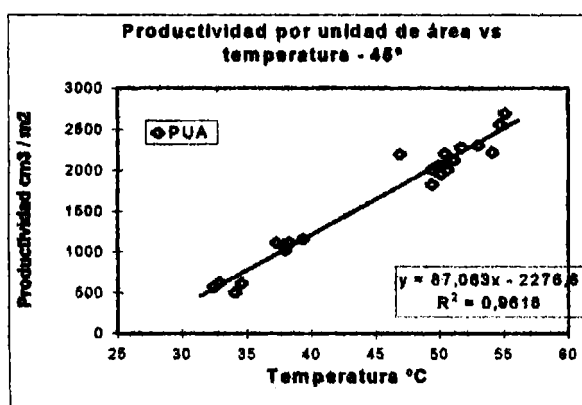


Figura 4. Medidas y ajuste lineal para $\alpha = 45^\circ$.

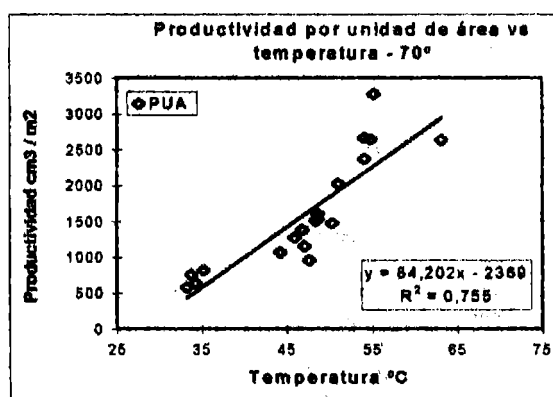


Figura 5. Medidas y ajuste lineal para $\alpha = 70^\circ$.

Se observa que las medidas realizadas con $\alpha = 70^\circ$ presentan mayor dispersión que las correspondientes a $\alpha = 45^\circ$ con un coeficiente de determinación del ajuste lineal $R^2 = 0.741$ mientras que para $\alpha = 45^\circ$ se obtiene $R^2 = 0.962$. Buscando encontrar una función que permita predecir la productividad por unidad de área de condensación en función de la temperatura del agua y de la pendiente de las cubiertas, se propuso una relación como la siguiente

$$f(T, \alpha) = m(T\alpha) + nT + p\alpha + q$$

A partir de las relaciones (3) a (6) se obtuvo el siguiente resultado.

$$f(T, \alpha) = -0.114 T \alpha + 92.195 T - 3.710 \alpha - 2109.3 \quad (7)$$

Las Figuras 6 y 7 muestran la comparación entre los valores medidos y el resultado del cálculo con la expresión anterior.

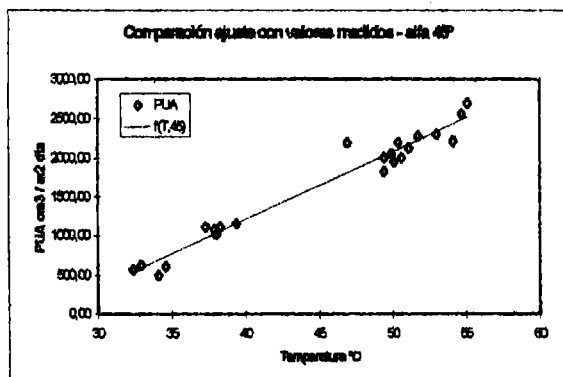


Figura 6. Comparación ajuste $f(T, \alpha)$ con medidas, para $\alpha = 45^\circ$.

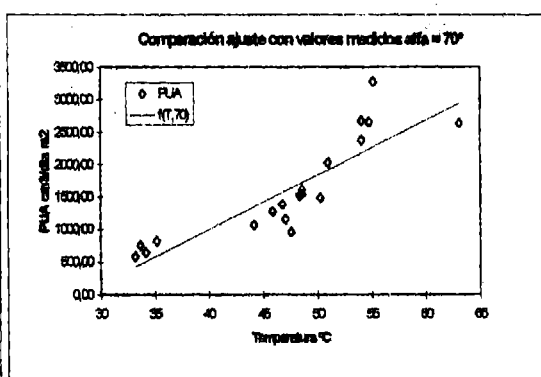


Figura 7. Comparación ajuste $f(T, \alpha)$ con medidas, para $\alpha = 70^\circ$.

La Figura 8 muestra, a partir de la relación (7), cómo se espera que cambie la PUA, en función de la temperatura, teniendo a α como parámetro, para pendientes grandes ($\alpha = 45^\circ$) hasta el límite correspondiente a una cubierta horizontal, ($\alpha = 90^\circ$). Se observa que PUA aumenta a medida que disminuye α , y por lo tanto al aumentar la pendiente de las cubiertas. Si se calcula la productividad total diaria P, correspondiente a una batea de 1m^2 de superficie de calentamiento, los valores que se obtienen para $\alpha = 45^\circ$ y $\alpha = 70^\circ$ son $2949.3\text{ cm}^3/\text{día}$ y $2099.6\text{ cm}^3/\text{día}$ respectivamente.

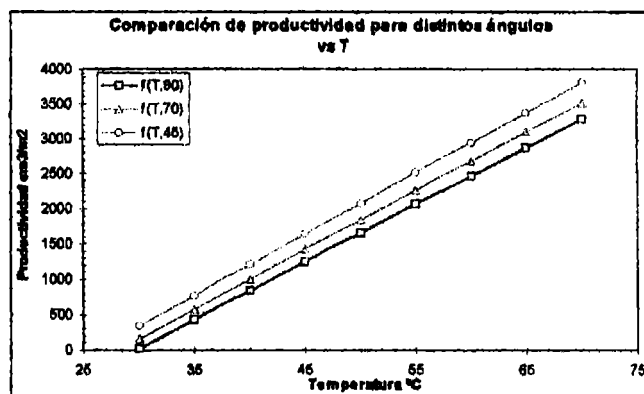


Figura 8. Productividad por unidad de área de condensación en función de la temperatura, para distintos valores de α .

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al aumentar la pendiente de las cubiertas de un destilador, manteniendo una misma superficie en la base, aumenta la superficie de condensación; el empuje convectivo es mayor, lo que haría esperar una mayor eficiencia de transferencia del vapor de agua generado en la superficie del agua hacia las cubiertas; las pérdidas térmicas a través de las cubiertas serían mayores y tenderían a disminuir la temperatura media de las cubiertas, lo que favorece la condensación del vapor sobre las mismas. Todos estos factores tienden a aumentar la productividad diaria, tal como se desprende de los resultados de las presentes experiencias. Por otra parte, al aumentar el volumen encerrado en el recinto, la masa de vapor encerrada es mayor, lo que aumentaría la inercia térmica del sistema y la recirculación de vapor hacia la superficie líquida también sería mayor, por lo que podría esperarse una menor productividad.

Durante estas experiencias llevadas a cabo en laboratorio se pulió y limpió con amoníaco los vidrios de manera muy cuidadosa, de modo que el condensado forma una película continua, prácticamente indistinguible. Cuando la condensación sobre el vidrio se realiza en forma de gotas, algunas de ellas caen sobre la batea disminuyendo la productividad; además dispersan una parte importante de la luz incidente, lo que disminuye la energía solar que alcanza la batea.

CONCLUSIONES

Por todo lo expresado, podemos concluir lo siguiente.

- La productividad de un destilador es mayor cuanto mayor sea la pendiente de las cubiertas.
- La eficiencia medida es mayor que la eficiencia calculada a partir de las relaciones propuestas por Duffie y Beckman, con una dependencia de la temperatura más suave.
- La ecuación (7) constituye una importante herramienta de diseño para la productividad por unidad de área de condensación, en función de la temperatura del agua y la pendiente del techo.
- Desde el punto de vista térmico, la energía que lleva el condensado representa un 60% de la energía suministrada, siendo el 30% restantes pérdidas a través de la cubierta ya sea por convección, conducción o radiación. Si bien en la presente experiencia las pérdidas de origen convectivo hacia la atmósfera son pequeñas, es de esperar valores mayores en experiencias al aire libre.

REFERENCIAS

- Dunkle, R. V. Solar water distillation : the roof type still and a multiple effect still, *Int. Development in Heat Transfer, Conference at Denver, Part 5*, 895, (1961).
- Cooper, P. I., Digital simulation of experimental solar still data, *Solar Energy*, 14, 451, 1973.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. *Solar Energy Thermal Processes*, Cp. 20, J. Wiley and Sons, (1980).
- De Paul, I. y Saravia, L., Visualización de flujos aplicada al estudio del movimiento convectivo del aire húmedo en un destilador solar, *Memorias Física de Fluidos* 95, 129, (1995).
- De Paul, I., Hoyos, D. y Saravia, L., Medidas de velocidad del vapor de agua en el interior de un destilador solar tipo batea, *Actas 19a. Reunión de ASADES, Tomo II*, 07.13, (1996).
- Hoyos, D., De Paul, I. Programa de captura de imágenes, procesamiento y cálculo para medición de velocidades en líquidos. *Actas 17a. Reunión de ASADES, Tomo II*, pp:683-688, (1994).
- McAdams, W.H. *Transmisión de calor*, 3ª. Edición, Cap. 7, McGraw Hill, (1978).