

## CONTENIDO DE AGUA Y PRODUCTIVIDAD DE UN DESTILADOR TIPO BATEA A ALTA TEMPERATURA

Irene De Paul  
INENCO#  
Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta  
TE: 87-255424  
E-mail: depaul @ ciunsa.edu.ar

**RESUMEN.** En trabajos previos se analizó el comportamiento de un destilador tipo batea ensayado en laboratorio en el rango de temperaturas de agua de 35°C a 55°C, en ciclos de calentamiento-enfriamiento. En el presente trabajo se analiza el comportamiento de un destilador en el rango de temperaturas de agua de 35°C a 66°C, funcionando en estado estacionario. Se midió el destilado total y se calculó el destilado promedio horario sobre una muestra suficientemente grande como para que el error estadístico sea razonable. Se encontró una expresión empírica que permite calcular el destilado promedio horario en función de la temperatura del agua que es una mejora sobre una expresión hallada anteriormente. Se calculó el contenido de agua encerrada en el destilador y se lo compara con la masa de agua destilada.

**Palabras clave.** Destilación, volumen destilado, contenido de agua, productividad horaria.

### INTRODUCCION

En trabajos previos se analizó el comportamiento tanto térmico como fluidodinámico de un modelo de destilador a escala real ensayado en laboratorio, en el rango de temperaturas de agua de 35 °C a 55 °C, realizando la secuencia de calentamiento diurno – enfriamiento nocturno, para dos configuraciones geométricas diferentes, una con pendiente de cubiertas a 45° y otra con pendiente a 20° [De Paul *et al.* 1997,1998,1999]. En esas condiciones, el tiempo de funcionamiento en estado estacionario era muy breve y los valores de temperatura y productividad que caracterizan una dada condición de funcionamiento sólo se pudieron determinar a partir de pocos valores. Para mejorar esos resultados se realizaron una serie de medidas con el destilador de pendiente 20° en las que se fijó la potencia suministrada a los calefactores, y con ésto la temperatura del agua de la batea, manteniendo las condiciones de funcionamiento por dos o tres días. A partir de estos valores se pudo realizar una caracterización del funcionamiento estacionario en función de la temperatura del agua con un error estadístico razonablemente menor. Este procedimiento es necesario porque como el flujo en el interior es turbulento, [De Paul *et al.* 1995,1996,1999] la dispersión de valores es grande y es necesario realizar un número grande de medidas. Se extendió el rango de temperaturas ensayadas hasta 66 °C, lo que permitió comparar el comportamiento del destilador en un rango extendido y mejorar las relaciones empíricas a partir de las cuales se puede caracterizar su funcionamiento en etapas de diseño. A partir de relaciones psicrométricas se calculó el contenido de agua encerrada en el destilador suponiendo que el ambiente está saturado a una temperatura igual a la temperatura de vapor.

### DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental empleado se muestra en la Figura 1, y consiste en un módulo de destilador, en latón de 1.36 m de largo, 1.16 m de ancho, con cubierta de vidrio flotado a dos aguas, que forma un ángulo  $\alpha = 70^\circ$  con la vertical (pendiente 20°). Las paredes están aisladas con poliestireno expandido de 0.03 m de espesor.

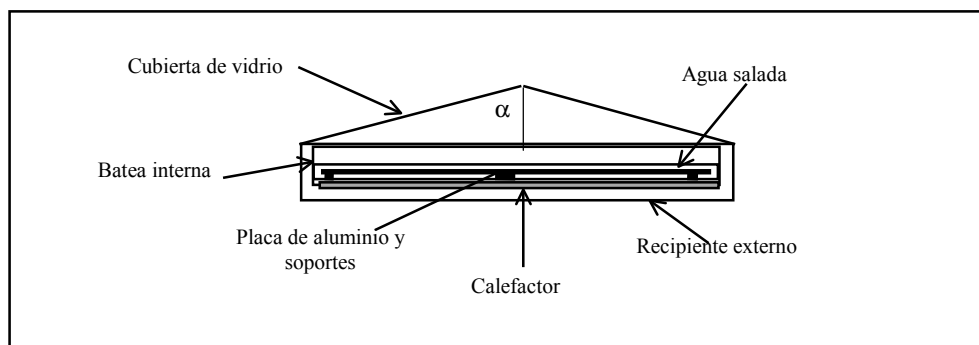


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental ensayado.

Las paredes anterior y posterior son de vidrio de 0.004 m de espesor; en la anterior se realizó una abertura que permite introducir un sensor para medir la temperatura del agua y realizar observaciones directas del vapor de agua; esta abertura está normalmente tapada con poliestireno. La base del destilador consiste en un recipiente doble: la batea propiamente dicha que contiene el agua para destilar, encerrada en un recipiente que contiene un conjunto de resistencias eléctricas que permiten calentar el agua simulando el calentamiento solar. Con el fin de asegurar un calentamiento uniforme se colocó dentro de la batea una chapa de aluminio de 0.004 m de espesor sostenida por soportes a una altura constante. La base fue nivelada antes de colocar la cubierta. Se midió la temperatura del agua, del ambiente y de las caras interna y externa de la cubierta de vidrio con termocuplas de cobre-constantán y un sistema de adquisición de datos Omega, que tomaba medidas cada quince minutos. El volumen de agua destilado se midió en vasos graduados con una precisión de 20 cm<sup>3</sup>.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

La temperatura del laboratorio durante cada una de las experiencias varió en menos de 1 °C por lo que puede considerarse que las condiciones externas no cambiaron. Se realizaron en total 1579 medidas en estado estacionario, correspondiendo a una dada temperatura un mínimo de 62 valores y un máximo de 203, por lo que se considera que el tamaño de la muestra estadística en cada caso es aceptable. La Figura 2 muestra los valores medios de temperatura alcanzada por el agua de la batea y el vapor [De Paul *et al.* 1997,1998,1999] en función de la potencia eléctrica media suministrada a los calefactores. No se pudo realizar ensayos a mayor temperatura debido a la limitación en corriente que soportan las conexiones.

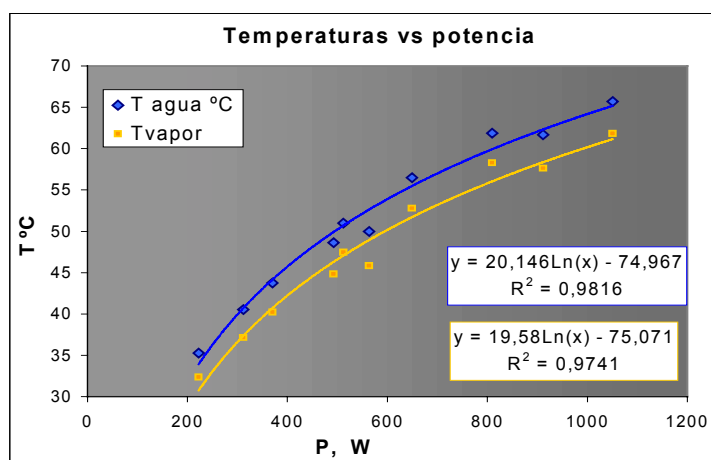


Figura 2. Temperatura media del agua y del vapor en función de la potencia media suministrada.

La Figura 3 muestra el comportamiento típico de las temperaturas medidas en una experiencia particular. Se puede apreciar que la constante de tiempo es de 7 hs aproximadamente.

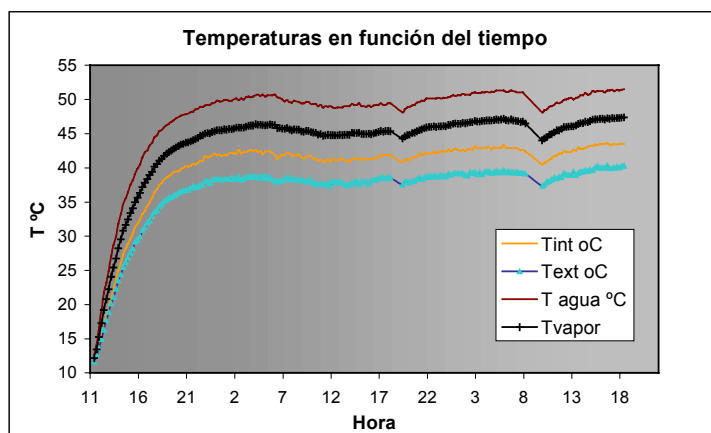


Figura 3. Evolución temporal de la temperatura del agua, de la cubierta y del vapor, en una experiencia típica.

La Tabla I muestra un resumen de las medidas realizadas, el volumen destilado en cm<sup>3</sup>, total diario y promedio horario en estado estacionario y el contenido de agua correspondiente. Las temperaturas medias en estado estacionario fueron calculadas con un error porcentual menor al 1%. El volumen destilado se midió con una precisión de +/- 10 cm<sup>3</sup>.

Dia	Potencia, W	Tagua °C	Tcubierta °C	Tvapor °C	w(T) gr H2O/graireseco	Dest total cm3	Dest prom. hor.
1	222,2	35,3	29,4	32,4	0,036	7130	112,9
2	311,9	40,5	33,8	37,2	0,048	6070	182,7
3	370,2	43,8	36,7	40,2	0,058	7380	231,3
4	492,1	48,6	41,0	44,8	0,075	12710	265,2
5	563,3	50,0	41,7	45,9	0,080	13000	383,4
6	512,1	51,0	43,9	47,5	0,088		
7	649,4	56,5	49,1	52,8	0,119	27590	498,6
8	911,4	61,7	53,6	57,6	0,158	15280	664,3
9	809,5	61,9	54,7	58,3	0,164	18860	620,4
10	1050,60	65,7	58,0	61,8	0,203	24410	811,2

Tabla I

## CONTENIDO DE AGUA

Para calcular el contenido de agua en el interior del destilador se supone que el ambiente está saturado a la temperatura de vapor  $T_v$ , calculada como el promedio entre la temperatura del agua y la de la superficie interna de la cubierta, a la presión ambiente en Salta de 660 mm Hg. Las relaciones (1) y (2) permiten calcular la presión de saturación  $p_s$  en Hpa a la temperatura  $T$  y el contenido de agua en gr de agua /gr de aire seco, a la temperatura  $T$  y presión  $p$ .

$$p_s(T) = \left( \frac{4.579 * 1013}{760} \right) * \exp\left( \frac{17.076 * T}{234.04 + T} \right) \quad (1)$$

$$w(T) = \frac{0.622 * p_s(T) * HR}{p - p_s(T)} \quad (2)$$

siendo  $p$  la presión ambiente en Hpa y  $HR = 1 \equiv 100\%$  de humedad relativa.

Estos valores se calcularon a la temperatura media de vapor correspondiente a cada experiencia y los resultados obtenidos en función de la temperatura del agua, muestran un comportamiento exponencial como se aprecia en la Figura 4.

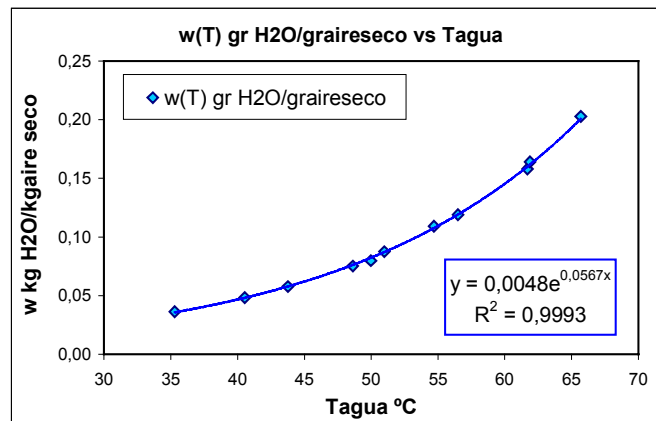


Figura 4. Contenido de agua en el destilador en función de la temperatura del agua.

Con estos valores se puede calcular la masa total de agua encerrada dentro del destilador,  $M_w$ , y la masa total de agua destilada en una hora,  $M_{h_s}$ , en función de la temperatura del agua en la batea, en estado estacionario. Las expresiones (3) y (4) muestran las relaciones a partir de las cuales se calcularon estos valores, que están representados en la Figura 5.

$$M_w = w * \rho_a(T_v) V \quad (3)$$

$$M_h = \rho_w(T_{cub}) * DPH * 1hr \quad (4)$$

Donde  $\rho_a(T_v)$  es la densidad del aire seco a la temperatura de vapor,  $V$  es el volumen encerrado en el destilador,  $\rho_w(T_{cub})$  es la densidad del agua a la temperatura de la cubierta y  $DPH$  es el destilado promedio horario medido. Se puede observar que, en promedio sobre todo el rango de temperaturas, la masa de agua contenida en el interior del destilador representa alrededor de un 10% de la masa de agua destilada en una hora.

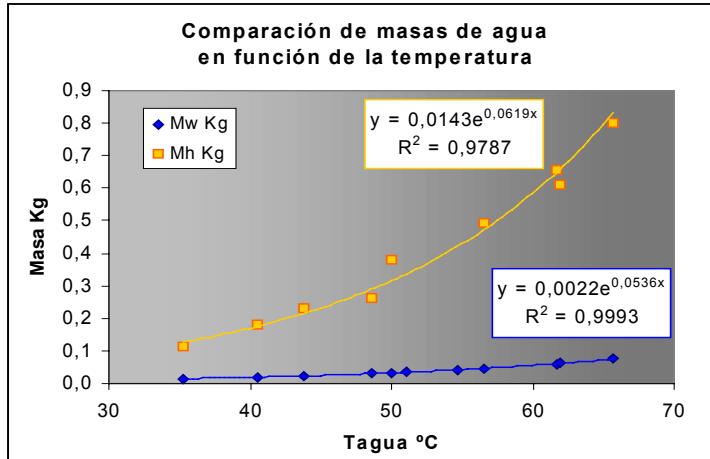


Figura 5. Masa de agua encerrada en el destilador Mw y masa de agua destilada en una hora Mh en función de la temperatura de agua.

### DESTILADO PROMEDIO HORARIO

La Figura 6 muestra la relación entre el destilado promedio horario y el contenido de agua en el destilador, mostrando una relación lineal con un alto coeficiente de determinación.

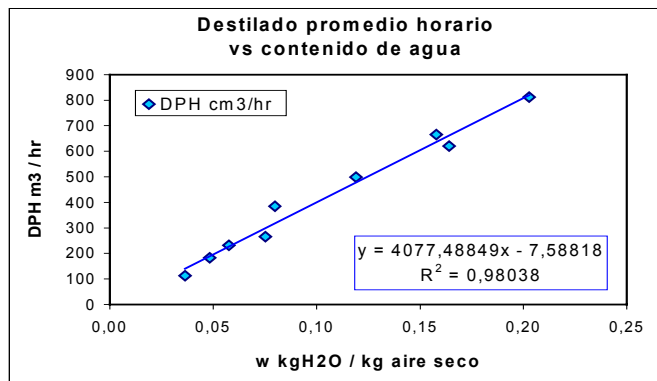


Figura 6. Destilado promedio horario en función del contenido de agua.

El hecho de que el destilado promedio horario dependa linealmente del contenido de agua, y que éste dependa exponencialmente de la temperatura del agua, sugiere que el destilado promedio horario depende exponencialmente de la temperatura del agua, y no linealmente como surgía de los resultados de las experiencias previas realizadas en un rango de temperaturas menor.

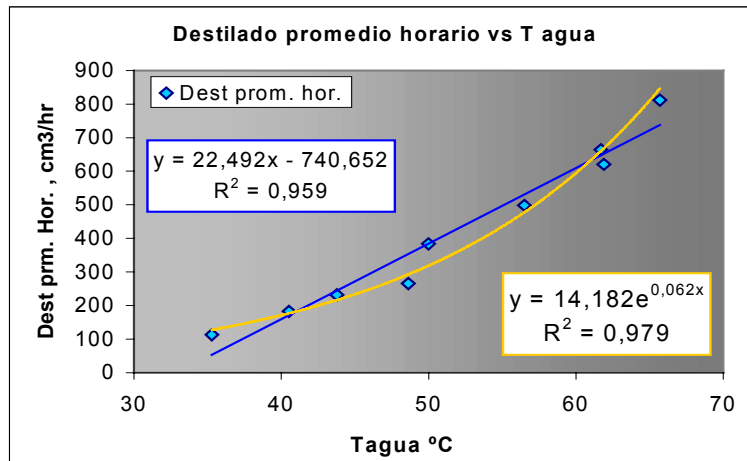


Figura 7. Destilado promedio horario en función de la temperatura del agua.

La Figura 7 muestra la comparación entre un ajuste exponencial y un ajuste lineal en el rango de temperaturas ensayados, de 35°C a 66 °C. Se puede comprobar que, efectivamente, el ajuste exponencial (5) tiene un mejor coeficiente de determinación,  $R^2 = 0.98$ , que en el caso lineal en el que  $R^2$  es 0.96. A pesar del alto coeficiente  $R^2$  en el caso lineal, si se toma como referencia el ajuste exponencial, a una temperatura del agua de 50°C el ajuste lineal puede predecir un valor de destilado promedio horario un 34% mayor.

$$DPH = 14.182 * \exp(0.0622 * T_{\text{agua}}) \quad (5)$$

## CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas, en las que se mantuvo las condiciones de calentamiento constante durante un tiempo suficientemente largo, permitieron medir temperaturas con un error estadístico suficientemente pequeño como para poder caracterizar el comportamiento térmico y la productividad total diaria y la productividad promedio horaria en función de la temperatura del agua, en estado estacionario, con precisión aceptable, en un rango de 35°C a 66°C.

A partir de los cálculos de contenido de agua en el rango dado, que extiende en 11°C los valores de temperatura de agua ensayados anteriormente, se pudo encontrar una expresión empírica que permite calcular el volumen promedio horario destilado en función de la temperatura del agua a partir de una relación exponencial. Esta expresión mejora sustancialmente los resultados obtenidos en experiencias anteriores, en las que el rango ensayado era de 35 °C a 55 °C.

La masa de agua encerrada en el interior del destilador en forma de vapor o gotas resulta ser alrededor del 10% de la masa de agua promedio destilada en una hora, para todo el rango ensayado de valores de la temperatura de agua en la batea.

Si bien el comportamiento de un destilador real, bajo la acción del calentamiento del sol y la acción de las condiciones ambientales externas, difícilmente alcance el estado estacionario, se podrá estimar su productividad, en etapas de diseño, en función de la temperatura del agua a partir de las relaciones propuestas, suponiendo que en un dado intervalo de tiempo las condiciones están próximas a las condiciones estacionarias correspondientes a la temperatura del agua en ese intervalo. La validez de esta hipótesis sólo puede comprobarse a partir de la comparación con valores medidos en una experiencia real.

## BIBLIOGRAFÍA

- De Paul, I. y Saravia, L. (1995). Visualización de flujos aplicada al estudio del movimiento convectivo del aire húmedo en un destilador solar. En *Memorias del 4o. Simposio Internacional sobre recientes avances en Mecánica y Física de Fluidos*, Kuz, V., Gratton, R., Ferreri, J. C. (Editores), pp. 129-136, La Plata, R. Argentina.
- De Paul, I., Hoyos, D. y Saravia, L., (1996). Medidas de velocidad del vapor de agua en el interior de un destilador solar tipo batea. En *Actas 19a. Reunión de ASADES, Tomo II*, pp. 07.13, Mar del Plata, R. Argentina.
- De Paul, I., D. Hoyos, L. Saravia., (1997). Productividad de un destilador tipo batea en función de diferentes parámetros. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **1**, 1, pp: 97.
- De Paul, I. D. Hoyos, L. Saravia, (1998). Balance de energía y función de predicción para un destilador solar tipo batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **2**, 1, pp :02.57.
- De Paul, I., D. Hoyos, (1998). Analysis of the thermal-fluiddynamic behaviour of a basin solar still. *Actas 7° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia*. **Vol. IV**, pp :1005-1010.
- De Paul, I., y Hoyos, D., (1999). Comportamiento fluidodinámico de un destilador solar tipo batea con cubiertas a dos aguas. *EnergíasRenovables y Medio Ambiente*, **6**, 27.

## ABSTRACT

In previous works the performance of a basin type laboratory still was tested during heating-cooling cycles for water temperatures ranging from 35°C to 55°C . In the present work the range of temperatures was extended from 35°C to 66°C, and the performance in stationary conditions is analysed. Total distilled volume was measured and the mean hourly distillate in stationary state was calculated over a sufficiently wide sample for making the statistical error reasonable. An empirical relation was found that allows the calculation of mean hourly distillate as function of the water temperature. Water content inside the still is calculated and compared with the mean hourly mass of water produced.