

## COMPORTAMIENTO DE UN DESTILADOR TIPO BATEA CON PENDIENTE ALTA EN LAS CUBIERTAS

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

**RESUMEN.** En el presente trabajo se analiza el comportamiento de un destilador con pendiente de 45° en las cubiertas, en el rango de temperaturas de agua de 36°C a 68°C, funcionando en estado estacionario. Se midió el destilado total diario y se calculó el destilado promedio horario; las medidas de temperaturas fueron realizadas sobre una muestra suficientemente grande como para que el error estadístico sea razonable. Se encontraron expresiones empíricas que permiten calcular el destilado promedio horario, el contenido de agua, el coeficiente de transferencia térmica  $h$  sobre la cara interna de la cubierta y los números de Nusselt y Rayleigh en función de la temperatura del agua. Se encontró una relación  $Nu$  vs  $Ra$  que caracteriza el sistema que muestra una dependencia diferente a  $Ra^{1/3}$ .

**Palabras clave.** Destilación, coeficiente  $h$ , productividad horaria, contenido de agua, relación  $Nu$  vs  $Ra$ .

### 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 a,b, 1999]. Posteriormente se caracterizó el funcionamiento en estado estacionario del destilador con pendiente a 20°, estableciéndose la productividad promedio horaria, el contenido de agua, el coeficiente de transferencia térmica  $h$  sobre la cara interna de las cubiertas, el número de Rayleigh y la relación  $Nu$  vs  $Ra$  característicos [De Paul 2000 a,b,c,d; De Paul 2001], con un error estadístico pequeño, en el rango de temperaturas 35°C a 65°C. Las experiencias realizadas en el presente trabajo permitieron caracterizar el comportamiento en estado estacionario del destilador con pendiente en la cubierta a 45°, en los mismos parámetros que en el caso anterior, con pequeño error estadístico, en el rango de temperaturas de funcionamiento de 36°C a 68°C.

### 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, con pendiente  $\theta = 45^\circ$ . Las paredes están aisladas con poliestireno expandido de 0.03 m de espesor.

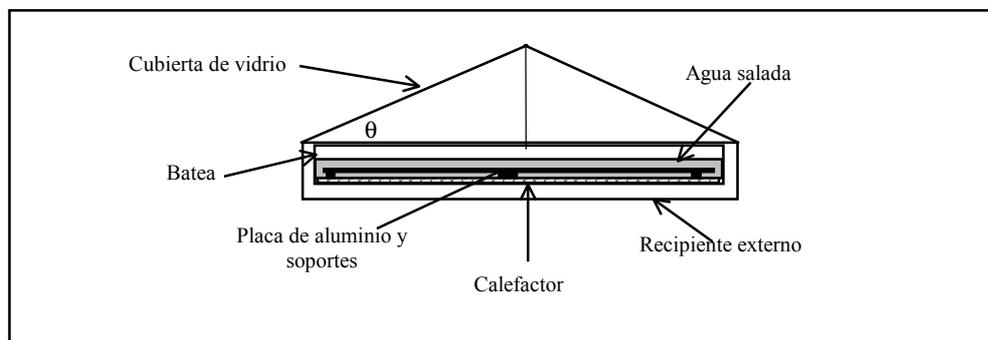


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental ensayado.

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; la batea está encerrada en un recipiente que contiene un conjunto de resistencias eléctricas que

# Instituto UNSa - CONICET

permiten calentar el agua desde abajo 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

Las medidas se realizaron con calentamiento constante, día y noche, durante varios días. La temperatura del laboratorio varió muy poco, alrededor de 1°C en todas las experiencias, por lo que las condiciones externas de estacionariedad son aceptables. Se realizaron un total de 1230 medidas en estado estacionario, correspondiendo a cada temperatura un mínimo de 162 y un máximo de 318 medidas, por lo que el error estadístico en cada caso es aceptable. En el presente trabajo se muestran los valores promedios correspondientes a cada situación ensayada. La Tabla I muestra un resumen de las medidas realizadas en la que constan los valores promedios obtenidos para cada parámetro medido, del destilado promedio horario DPH, el destilado total diario DTD, y el contenido de agua en el ambiente encerrado en el destilador w.

Día	Potencia W	T agua °C	Tcubierta	Tvapor	DPH cm3/hr	DTD cm3	w(T) gr H2O/graireseco
1	300,1	36,7	28,7	32,7			0,037
2	292,7	37,3	29,3	33,3	170,5	3980	0,038
3	290,9	38,0	29,9	33,9	175,3	4420	0,040
4	421,4	43,0	33,2	38,1			0,051
5	434,1	43,6	33,8	38,7	181,2	2880	0,053
6	437,2	43,7	34,1	38,9	287,1	7000	0,053
7	441,2	43,7	33,9	38,8	294,5	7420	0,053
8	426,7	44,0	34,2	39,1	287,7	7280	0,054
9	605,2	49,3	39,5	44,4	406,6	5870	0,074
10	590,6	50,6	40,7	45,7	377,9	7260	0,079
11	602,8	51,6	41,9	46,8	398,7	8760	0,084
12	614,8	52,9	43,0	47,9			0,090
13	805,6	57,8	48,4	53,1			0,121
14	826,1	58,9	49,3	54,1	466,1	8930	0,129
15	813,4	59,6	50,1	54,8	554,9	10580	0,134
16	824,8	60,3	50,5	55,4	595,5	11480	0,139
17	829,9	61,2	51,7	56,4	563,4	11210	0,147
18	1013,0	65,1	55,9	60,5			0,187
19	1008,2	66,1	57,2	61,6	959,3	17090	0,200
20	980,6	66,1	56,9	61,5	904,4	21490	0,199
21	998,8	67,8	58,7	63,2	882,0	22120	0,221

Tabla I. Resumen de medidas realizadas.

## TEMPERATURAS

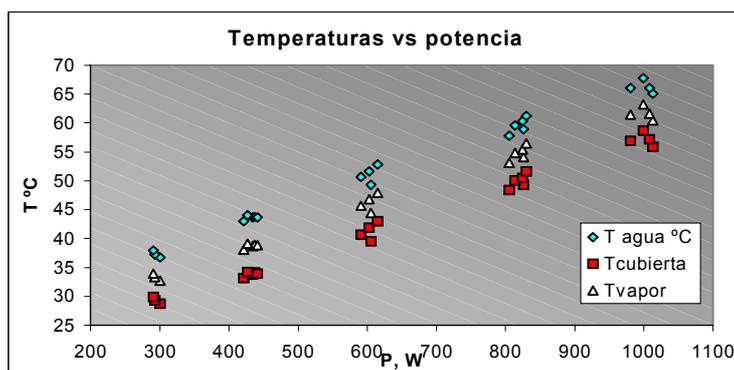


Figura 2. Temperaturas del agua, de la cubierta y del vapor en función de la potencia suministrada

La Figura 2 muestra las temperaturas medias del agua, de la cara interna de la cubierta y del vapor en función de la potencia suministrada. La temperatura de vapor se calcula como el promedio entre la temperatura del agua y la cubierta [De Paul 1999, De Paul 2000 c,d].

## PRODUCCIÓN

La figura 3 muestra el destilado promedio horario en cm<sup>3</sup>/hr y el destilado total diario en cm<sup>3</sup>/día que presentan una dependencia exponencial con la temperatura del agua con un alto coeficiente de determinación.

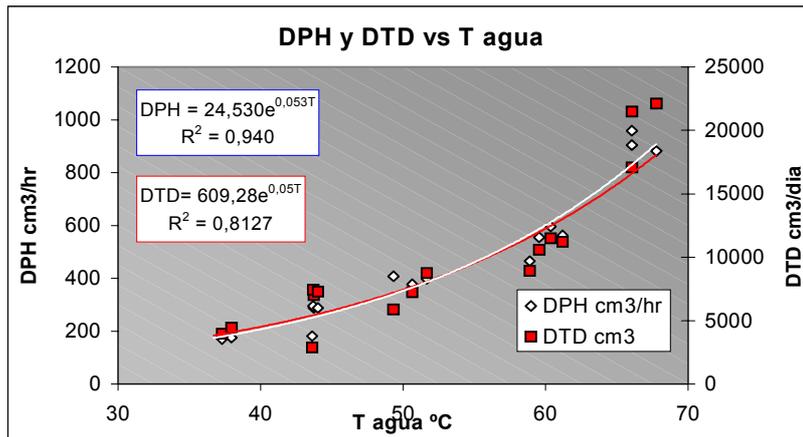


Figura 3. Destilado promedio horario, DPH y destilado total diario DTD en función de la temperatura del agua.

### CONTENIDO DE AGUA

La figura 4 muestra el contenido de agua  $w$ , en gr de agua por gr de aire seco en el ambiente encerrado en el destilador, en función de la temperatura del agua. Este parámetro fue calculado a partir de las relaciones presentadas en [De Paul, 2000c], suponiendo que el ambiente encerrado en el destilador está saturado a la temperatura de vapor. El ajuste empírico muestra una dependencia exponencial entre  $w$  y  $T_{\text{agua}}$ .

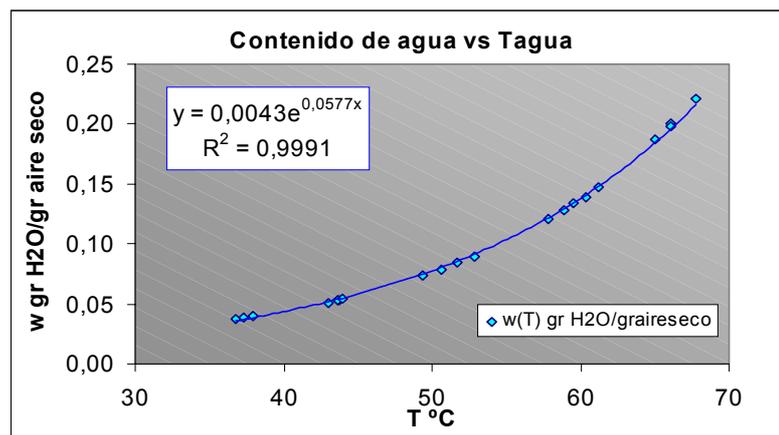


Figura 4. Contenido de agua en el interior del destilador en función de la temperatura del agua.

### COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA TERMICA h

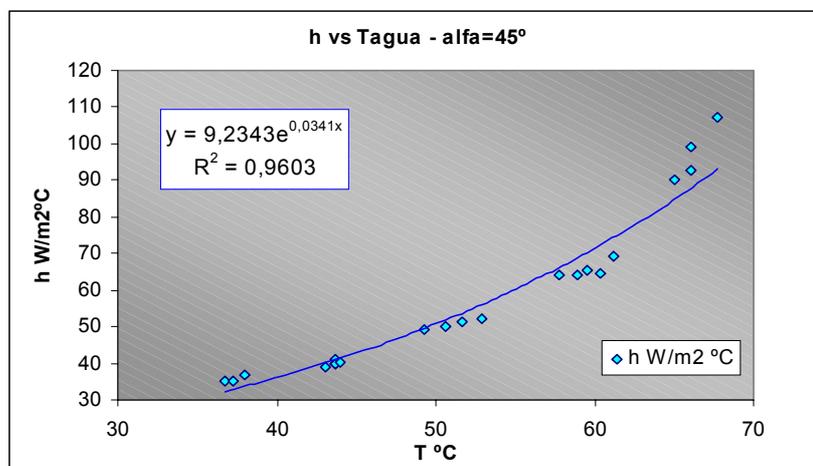


Figura 5. Coeficiente de transferencia térmica promedio  $h$  sobre la cara interna de la cubierta en función de la temperatura del agua.

El coeficiente de transferencia térmica  $h$  sobre la cara interna del destilador fue calculado a partir de las temperaturas medidas sobre las caras interna y externa de la cubierta, con la siguiente expresión.

$$h = \left( \frac{k}{e} \right) \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{T_{\text{vapor}} - T_{\text{int}}} \quad (1)$$

siendo  $k$  la conductividad térmica del vidrio y  $e$  su espesor. La figura 5 muestra los valores promedios obtenidos y el ajuste exponencial con un alto coeficiente de determinación. El máximo error estadístico obtenido en el cálculo de  $h$  es del 1.1 %.

## RELACIÓN Nu VS Ra

La transferencia térmica sobre una superficie se caracteriza por el número de Nusselt,  $Nu$ , que mide la relación entre la energía transferida por convección respecto de la transferida por conducción. Los procesos de convección natural, como el que se produce en el interior del destilador por el cual el vapor de agua y el calor es transferido desde la superficie del agua hacia las cubiertas, se caracteriza por el número de Rayleigh,  $Ra$ . La Tabla II muestra los valores correspondientes a estos parámetros obtenidos en las experiencias, en función de la temperatura del agua.

Día	T agua °C	Nusselt	Ra
1	36,7	47,78	3,842E+06
2	37,3	48,05	3,861E+06
3	38,0	50,11	3,916E+06
4	43,0	52,76	4,978E+06
5	43,6	53,60	5,001E+06
6	43,7	55,25	4,890E+06
7	43,7	53,66	4,954E+06
8	44,0	53,89	5,013E+06
9	49,3	65,38	5,358E+06
10	50,6	66,10	5,524E+06
11	51,6	67,94	5,519E+06
12	52,9	69,02	5,678E+06
13	57,8	83,46	5,855E+06
14	58,9	83,52	6,102E+06
15	59,6	84,83	6,110E+06
16	60,3	83,63	6,393E+06
17	61,2	89,68	6,319E+06
18	65,1	115,83	6,553E+06
19	66,1	126,98	6,465E+06
20	66,1	119,13	6,653E+06
21	67,8	136,92	6,766E+06

Tabla II. Números de Nusselt y de Rayleigh que caracterizan el sistema ensayado.

El rango de valores de  $Ra$  obtenido corresponde a un régimen turbulento, de acuerdo a lo observado en las experiencias de visualización de flujos [De Paul y Saravia, 1995; De Paul y Hoyos, 1999; De Paul, 2000a]. Un ajuste empírico muestra una dependencia lineal con la temperatura del agua, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Ra = 8.69 \times 10^4 T + 9.71 \times 10^5 \quad \text{con } R^2 = 0.95$$

Los valores del  $Nu$ , del orden de  $10^2$ , muestran que la transferencia térmica sobre las cubiertas es de origen convectivo. La dependencia con la temperatura del agua sigue una relación cuadrática, como se muestra a continuación:

$$Nu = 0.1008T^2 - 8.0116T + 209.81 \quad \text{con } R^2 = 0.97$$

La relación  $Nu$  vs  $Ra$  que caracteriza la transferencia térmica desde el agua hacia las cubiertas se obtiene a partir de un ajuste lineal a la relación  $\ln(Nu)$  vs  $\ln(Ra)$ , como se muestra en la figura 6. La expresión obtenida es la siguiente:

$$Nu = 2.8183e^{-10} * Ra^{1.6938}$$

Esta expresión muestra una dependencia diferente a  $Ra^{1/3}$  como se propone en el modelo empleado comúnmente para simular la producción de un destilador [Dunkle, 1961; Cooper, 1973]. Este resultado es similar al obtenido en el caso del destilador con pendiente 20° en las cubiertas [De Paul, 2001].

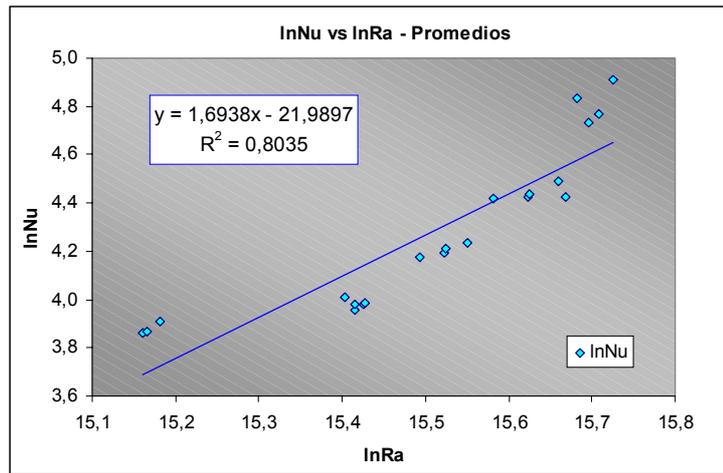
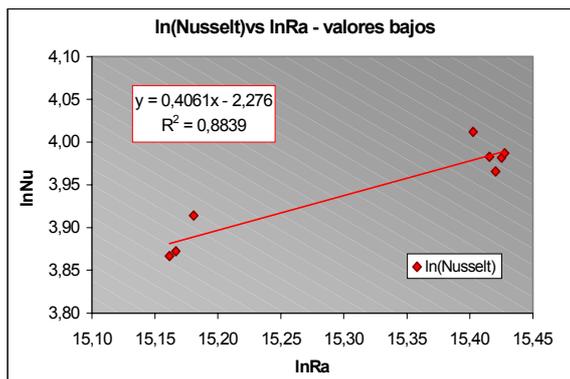
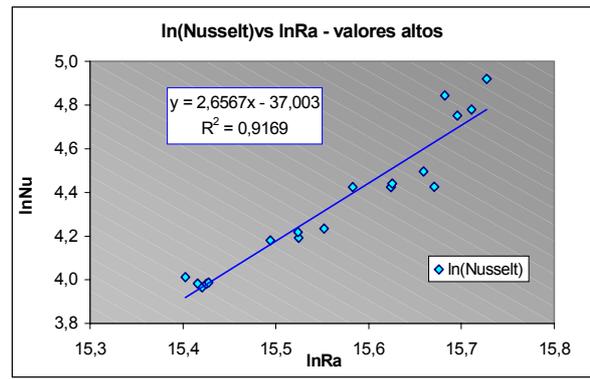


Figura 6. Relación  $\ln(\text{Nu})$  vs  $\ln(\text{Ra})$  para el destilador con pendiente  $45^\circ$  en la cubierta

El coeficiente de determinación es más bajo que los obtenidos en otras relaciones empíricas, y esto parece estar asociado al apartamiento de la linealidad a bajas temperaturas. Un análisis más detallado sugiere que para el valor de  $\ln(\text{Ra}) \approx 15,4$  ( $T_{\text{agua}} \approx 43^\circ\text{C}$ ) se produciría un cambio de pendiente en la recta de ajuste, tal como se muestra en las figuras 7 (a) y (b). Este efecto podría estar asociado a un cambio de régimen en el patrón de circulación en el interior del destilador. Lamentablemente la batea del destilador se rompió y no se pudieron realizar más medidas en ese rango de temperaturas para comprobar si esta observación es correcta o no. Esperamos poder comprobar estos resultados en experiencias futuras.



(a)  $\text{Nu} = 0,1027 * \text{Ra}^{0,406}$



(b)  $\text{Nu} = 8,507 e^{-17} * \text{Ra}^{2,6567}$

Figura 7. Muestra los ajustes lineales  $\ln(\text{Nu})$  vs  $\ln(\text{Ra})$  correspondientes a temperaturas bajas (a) y a temperaturas altas (b).

### CONCLUSIONES.

Los resultados de las experiencias realizadas permiten caracterizar el comportamiento de un destilador tipo batea con pendiente en las cubiertas de  $45^\circ$ , funcionando en estado estacionario, en función de la temperatura del agua, por medio de una serie de relaciones empíricas que se resumen a continuación.

Destilado promedio horario:	$\text{DPH} = 24.530 \times 10^{-6} * \exp(0.053T)$	$\text{m}^3/\text{hr}$
Destilado total diario:	$\text{DTD} = 609.28 \times 10^{-6} * \exp(0.05T)$	$\text{m}^3/\text{día}$

Contenido de agua:  $w = 0.0043 * \exp(0.058T)$       Kgr agua / Kgr aire seco

Coefficiente de transferencia térmico:

$h = 9.2343 * \exp(0.0341T)$        $\text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Número de Rayleigh:  $\text{Ra} = 8.69 \times 10^4 T + 9.71 \times 10^5$

Número de Nusselt:  $\text{Nu} = 0.1008T^2 - 8.0116T + 209.81$

Los valores de Nu asociados a la transferencia térmica sobre la cara interna de la cubierta son del orden de  $10^2$ , mostrando una predominancia de los procesos convectivos sobre los conductivos.

El número de Ra asociado al movimiento de convección natural en el interior del destilador es del orden de  $10^6$ , que corresponde a un flujo turbulento, de acuerdo a lo observado en experiencias de visualización de flujos.

La relación Nu vs Ra que caracteriza la transferencia térmica desde el agua hacia las cubiertas es la siguiente:

$$\text{Nu} = 2.8183e^{-10} * \text{Ra}^{1.6938}$$

Esta expresión muestra una dependencia diferente a  $\text{Ra}^{1/3}$  como se propone en el modelo empleado comúnmente para simular la producción de un destilador.

## REFERENCIAS

- Cooper, P. I., Digital simulation of experimental solar still data, *Solar Energy*, **14**, 451, (1973).
- 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 7º 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. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **6**, 27.
- De Paul, I. (2000). Estudio experimental de la transferencia de energía por convección natural en recintos cerrados empleando modelos a varias escalas. *Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas, UNSa*.
- De Paul, I. (2000). Destilador solar tipo batea de doble cubierta: funcionamiento y predicción de resultados. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **8**, 37-47.
- De Paul, I. (2000). Contenido de agua y productividad de un destilador tipo batea a alta temperatura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, pp: 03-21.
- De Paul, I. (2000). Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 1, pp: 03-27.
- De Paul, I. (2001). A new model of a basin-type solar still. *Proceedings of FORUM 2001 and ASES Annual Conference*, ISBN – **0-89553-173-9**.
- 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).

## ABSTRACT

In the present work the performance of a still with 45° slope in the covers is analysed, in the range of temperatures 36°C to 68°C, in stationary state. The total daily production DTD, and the mean hourly production DPH were measured. Temperature measurements have a reasonable statistical error. Empirical relations were found that allow to calculate DTD, DPH, water content, thermal transfer coefficient h, Nu and Ra as function of the water temperature. A Nu vs Ra relation different of that currently used was found.

**Keywords:** Distillation, coefficient h, hourly productivity, water content, Nu vs Ra relation.