

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMICO Y PRODUCCION DE DESTILADORES CON DISTINTA PENDIENTE EN LAS CUBIERTAS EN ESTADO ESTACIONARIO

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

RESUMEN. A partir de las medidas realizadas en experiencias de laboratorio sobre un destilador tipo batea con cubiertas cuya pendiente era de 20° y 45°, se comparan los resultados obtenidos en ambos casos a fin de establecer la influencia de la pendiente de la cubierta en la producción de agua destilada. Se comparan los resultados obtenidos en estado estacionario con los obtenidos en ciclos de calentamiento-enfriamiento, mostrando la importancia de hacer simulaciones no estacionarias cuando se pretende predecir la producción de un destilador.

Palabras clave. Destilación, productividad horaria, pendiente de cubiertas, simulación estacionaria.

INTRODUCCION

En trabajos previos se caracterizó el comportamiento de destiladores tipo batea con pendiente en las cubiertas de 20° y 45°, ensayados en laboratorio en el rango de temperaturas de agua de 35°C a 65°C, en dos circunstancias: primero, en ciclos de calentamiento-enfriamiento, suministrando potencia constante durante 10 horas del día y cortando el calentamiento durante la noche [De Paul y Saravia 1995, De Paul et al. 1997, De Paul y Hoyos 1998, De Paul y Hoyos 1999, De Paul 2000a]. En segundo lugar, suministrando potencia constante durante varios días y caracterizando el comportamiento en estado estacionario de ambas configuraciones [De Paul 2000b,c,d, De Paul 2001]. En el presente trabajo se comparan los resultados obtenidos en estado estacionario para ambas geometrías, y los resultados obtenidos en el caso de calentamiento-enfriamiento.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

A excepción de la pendiente en los vidrios, el montaje experimental es el mismo. El destilador empleado se muestra en la Figura 1 y consiste en un módulo construido en latón de 1.36 m de largo, 1.16 m de ancho, con cubierta de vidrio flotado a dos aguas, cuya pendiente θ toma los valores 20° y 45°. Las paredes están aisladas con poliestireno expandido de 0.03 m de espesor. 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 de la batea desde abajo simulando el calentamiento solar.

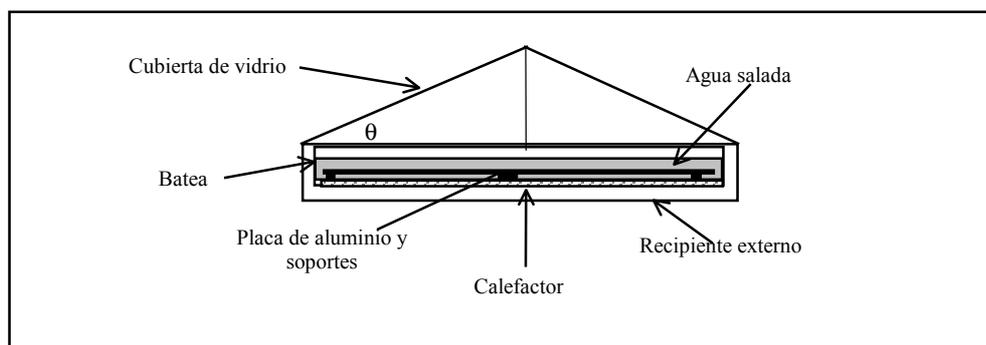


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental ensayado.

Las medidas fueron realizadas de la misma manera. 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 cm³.

Instituto UNSa - CONICET

TEMPERATURAS

La figura 2 muestra curvas típicas de calentamiento para ambas geometrías en condiciones en que, partiendo de una temperatura de agua inicial similar: 14,7°C en el caso de pendiente 45° y 12,7 °C en el caso de pendiente 20°, se alcanzaron temperaturas de agua estacionarias también similares: 51°C con una desviación standard de 1,6°C en el primer caso y 49,8°C con una desviación standard de 1,2°C en el segundo. Los descensos bruscos de temperatura corresponden a los momentos en que se realimenta con agua más fría la batea del destilador. Una estimación de la inercia térmica de cada sistema se puede obtener a partir de la constante de tiempo: 7,7hs con una temperatura ambiente media de 17,7°C en el caso $\theta= 45^\circ$ y 10,7hs con temperatura ambiente media de 13,6°C en el caso $\theta=20^\circ$. La constante de tiempo se estimó midiendo el tiempo que tardó cada sistema en alcanzar el límite inferior de la barra de incerteza en la temperatura media: $T_{media} - \text{desviación standard}$. Se observa la influencia de las condiciones externas: cuatro grados de diferencia en la temperatura ambiente determinan que la constante de tiempo sea mayor en el destilador con menor pendiente; sin embargo, en ambos casos, la constante de tiempo es del orden de varias horas, lo que muestra que un destilador a la intemperie, con condiciones externas variables, no puede alcanzar nunca el estado estacionario [De Paul 2000 a,c].

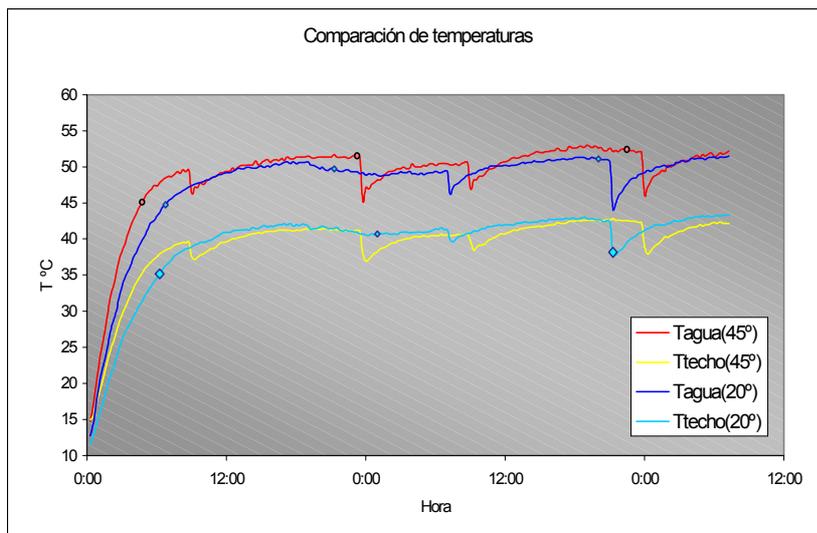


Figura 2. Comparación de las temperaturas de agua y techo alcanzadas por los destiladores en ambas geometrías, en condiciones de funcionamiento similares.

PRODUCCIÓN

El destilado promedio horario DPH y la producción total diaria PTD se muestran en las figuras 3 y 4. El DPH se calculó como el promedio durante las horas en que el destilador funcionó en estado estacionario. La PTD es la producción total diaria medida en el destilador desde el comienzo de su funcionamiento, incluyendo los transitorios de calentamiento. Se aprecia que el destilado promedio horario es ligeramente mayor para el caso $\theta= 45^\circ$ en todo el rango de temperaturas. La producción total diaria es mayor para $\theta= 45^\circ$ para temperaturas por debajo de 55°C aproximadamente, mientras que a mayores temperaturas el destilador más bajo produce más.

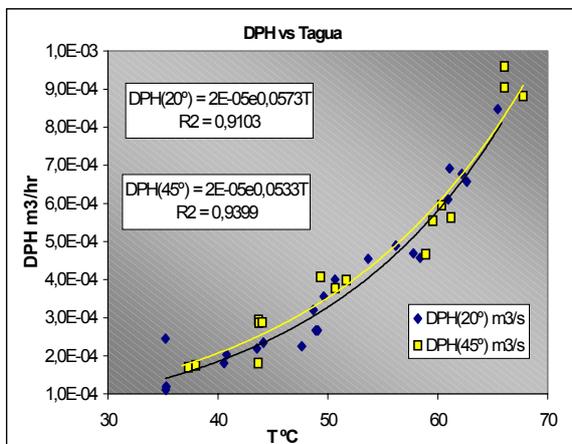


Figura 3. Destilado promedio horario en función de la temperatura del agua.

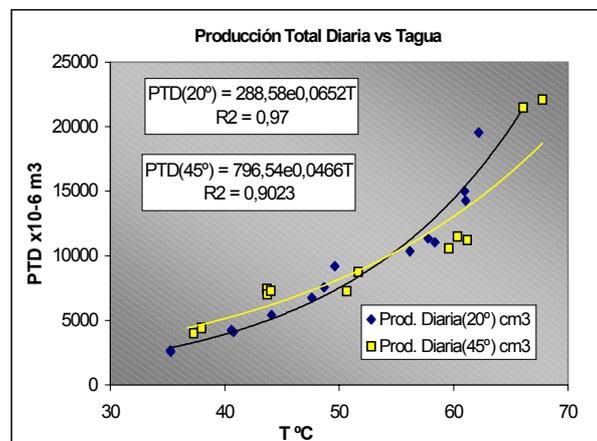


Figura 4. Producción total diaria en función de la temperatura del agua.

CONTENIDO DE AGUA

El contenido de agua en el ambiente encerrado en el destilador se calculó suponiendo que el medio está saturado a una temperatura igual a la temperatura de vapor, definida como el promedio entre la temperatura del agua y la del techo. La figura 5 muestra la comparación entre el contenido de agua w expresado en Kg. de agua / Kg. de aire seco, para las dos situaciones analizadas. Se puede apreciar la dependencia exponencial con la temperatura del agua en ambos casos, siendo ligeramente mayor para el caso $\theta = 20^\circ$.

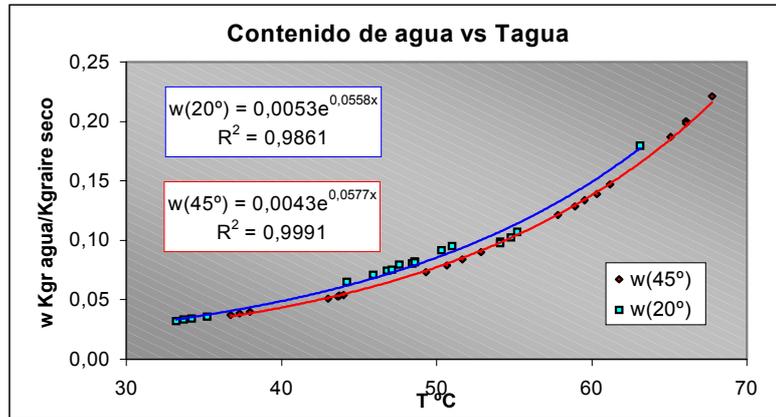


Figura 5. Contenido de agua en función de la temperatura de agua.

NÚMERO DE Ra

El número de Rayleigh que caracteriza el empuje convectivo se define como $Ra = (g\beta\rho^2C_p/\mu k)L^3\Delta T$ siendo L la longitud característica y ΔT la diferencia de temperatura que impulsa el flujo convectivo que transporta el vapor desde la superficie de agua hasta la cubierta donde condensa. En el interior del destilador el Ra es mayor en el caso $\theta = 45^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado (Figura 6); esto es de esperar debido a que el Ra depende de la longitud característica como L^3 , tomando L los siguientes valores: $L(45^\circ) = 0.165$ m y $L(20^\circ) = 0.109$ m. En ambos casos los valores de Ra obtenidos corresponden a régimen turbulento, tal como se observó en las experiencias de visualización de flujos.

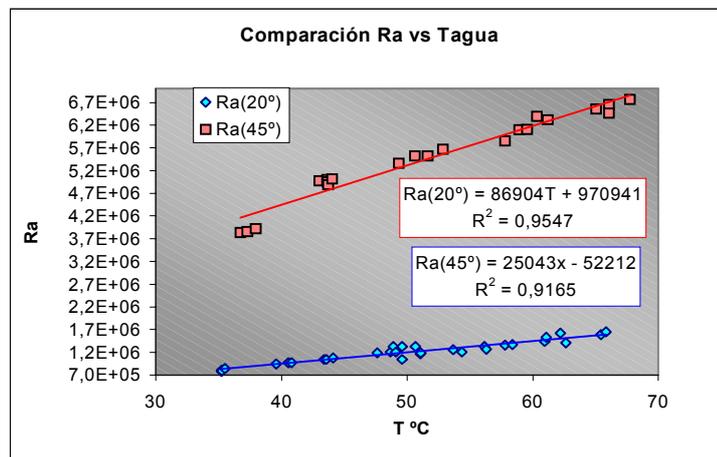


Figura 6. Número de Rayleigh en función de la temperatura del agua.

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA TÉRMICA H

El coeficiente de transferencia térmico h sobre la cara interna de la cubierta se muestra en la figura 7, observándose que es mayor para $\theta = 20^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado. El coeficiente h se calcula a través de la siguiente expresión:

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

Si se analiza las diferencias de temperatura $T_{int} - T_{ext}$ y $T_{vapor} - T_{int}$ en función de la temperatura del agua se puede observar que mientras $T_{int} - T_{ext}$ es similar en ambos casos en todo el rango de temperaturas, $T_{vapor} - T_{int}$ es mayor para $\theta = 45^\circ$ produciendo un coeficiente h menor. Teniendo en cuenta que T_{vapor} se calcula como el promedio entre la temperatura del agua y la de la cubierta, este resultado muestra que T_{int} es más próxima a T_{agua} en el caso $\theta = 45^\circ$ como se puede apreciar en la figura 2.

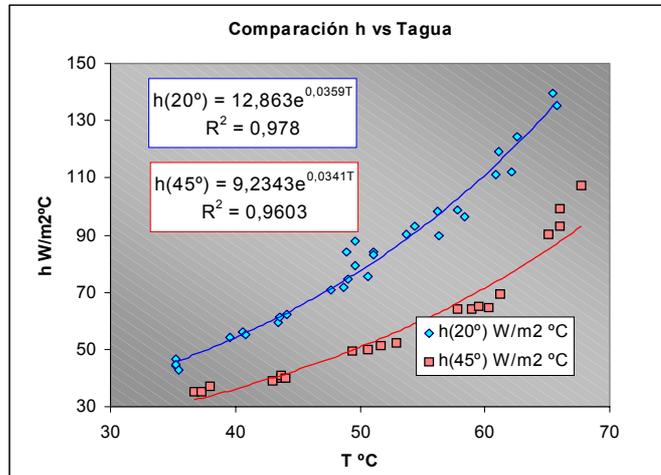


Figura 7. Coeficiente de transferencia térmica h sobre la cubierta en función de la temperatura del agua.

NUMERO DE Nu

La transferencia térmica hacia una superficie está caracterizada por el número de Nusselt, $Nu = hl / k$, siendo h el coeficiente de transferencia térmico sobre la cubierta, k la conductividad térmica de la película de agua que desliza bajo el vidrio, evaluada a la temperatura de la cubierta, y l la distancia desde el borde inferior hasta la cúspide de la cubierta. De acuerdo con lo observado en el caso de h , el Nu es menor en el caso $\theta = 45^\circ$ que en caso $\theta = 20^\circ$ (figura 8).

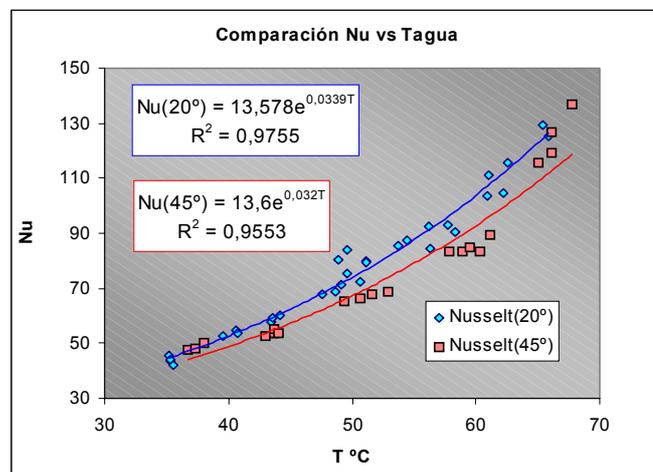


Figura 8. Número de Nusselt en función de la temperatura de agua.

RELACION Nu vs Ra

La relación entre la transferencia térmica sobre una superficie y los procesos convectivos que la originan se caracterizan por la relación Nu vs Ra propia de cada situación. En las experiencias acá descritas, el coeficiente h pudo ser calculado con un error estadístico pequeño, menor que el 1.1% [De Paul 2001b], por lo que esta relación pudo determinarse con buena precisión, obteniéndose las siguientes expresiones [De Paul 2000d, De Paul 2001b]:

$$Nu(45^\circ) = 2.8183e^{-10} * Ra^{1.694} \tag{1}$$

$$Nu(20^\circ) = 2.1857e^{-6} * Ra^{1.243} \tag{2}$$

ANÁLISIS

Es de destacar que en ambos casos la dependencia del Nu con Ra es diferente a $Ra^{1/3}$ como generalmente se emplea en los programas de simulación numérica [Dunkle 1961, y Cooper 1973]. Si la dependencia fuera como la planteada, la que es común en muchos procesos convectivos turbulentos, al depender Ra de L^3 , la transferencia térmica en el interior del destilador sería independiente de la longitud característica y por lo tanto de la pendiente de las cubiertas. Los resultados muestran que la transferencia térmica no es independiente de la geometría del destilador.

Por otra parte, si bien la transferencia térmica en el interior del destilador es menor en el caso $\theta = 45^\circ$ la producción media de destilado en estado estacionario es mayor, lo que muestra que no se puede inferir la productividad de un destilador a partir de las relaciones de transferencia térmica sino que es necesario analizar la eficiencia de condensación de la masa de vapor sobre las cubiertas, esto es, la transferencia de masa hacia las cubiertas. Esta observación se ve confirmada cuando se analizan los coeficientes de correlación entre el destilado promedio horario y distintos parámetros característicos tales como la temperatura del agua, el coeficiente h, el Ra, etc. La Tabla I muestra que, si bien todos los coeficientes son importantes, el correspondiente al Ra es el menor, lo que sugiere que otros aspectos inciden en la producción, además de la convección, que no son tenidos en cuenta en la definición del Ra. Estos resultados ya fueron anticipados en [De Paul y Hoyos 1999, De Paul 2000a].

Pendiente	Tagua	h	Ra	Nu
45°	0.94	0.98	0.89	0.98
20°	0.94	0.97	0.89	0.96

Tabla I. Coeficientes de correlación entre el destilado promedio horario en estado estacionario y diferentes parámetros.

Por último, es interesante comparar los resultados obtenidos con los destiladores funcionando en estado estacionario con los obtenidos anteriormente, en las experiencias en las que se suministraba potencia constante durante aproximadamente 10hs del día y se cortaba el calentamiento durante la noche. La figura 9 muestra el destilado promedio horario y la producción total diaria en ambas configuraciones, mostrando que ambas son mayores en el caso $\theta = 45^\circ$ que en el caso $\theta = 20^\circ$, en todo el rango de temperaturas ensayado; a 50°C la producción total diaria puede ser un 25% mayor en el primero caso.

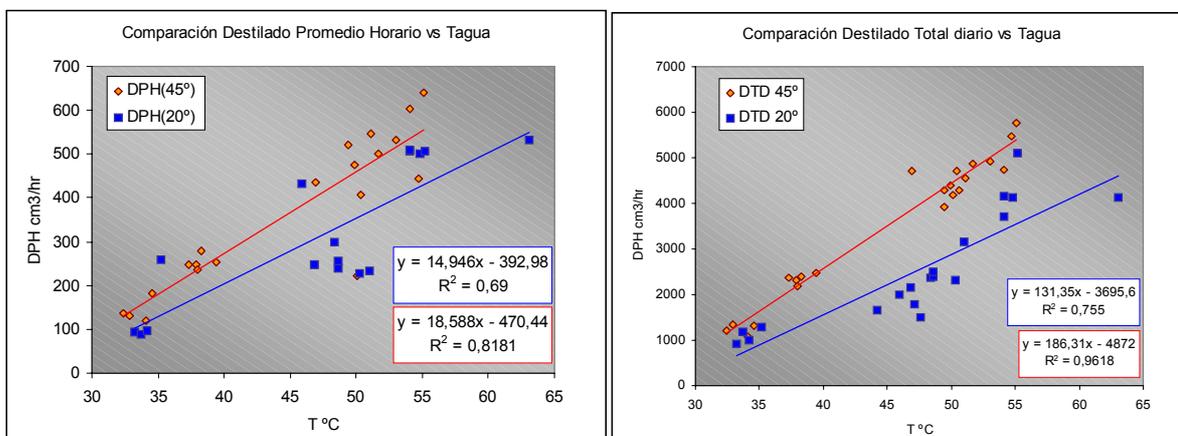


Figura 9. Muestra el destilado promedio horario y el destilado total diario para los dos casos estudiados, en la situación de calentamiento diurno a potencia constante y enfriamiento nocturno.

Teniendo en cuenta que, como ya se señaló en [De Paul 2000 a,c], difícilmente un destilador funcionando al aire libre alcance el estado estacionario, estos resultados muestran que no se puede inferir el funcionamiento de un destilador a partir de una simulación en estado estacionario; es necesario simular la secuencia de transitorios de calentamiento-enfriamiento al que está sometido un destilador real. La información presentada en estos trabajos, que caracterizan el funcionamiento de un destilador en estado estacionario, deben tomarse como una aproximación que mejora las estimaciones hechas a partir de modelos que emplean coeficientes de transferencia entre medios semiinfinitos, que no tienen en cuenta la geometría del sistema ni las características que ésta le impone a la circulación del vapor en el interior del destilador.

CONCLUSIONES

En función de lo expuesto se puede concluir lo siguiente.

- El destilado promedio horario es mayor en el caso de pendiente 45° en todo el rango de temperaturas ensayado, en estado estacionario.

- El destilado total diario en estado estacionario es mayor para $\theta = 45^\circ$ para temperaturas de agua menores que 55°C aproximadamente, mientras que a valores mayores esta relación se invierte.
- El contenido de agua es mayor para $\theta = 20^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado.
- El número de Ra es mayor para $\theta = 45^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado y en ambos casos corresponde a flujo turbulento.
- El coeficiente h es mayor para $\theta = 20^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado estando esto asociado a una mayor temperatura interna en la cubierta.
- El Nu es mayor para $\theta = 20^\circ$ en todo el rango de temperaturas ensayado con valores del orden de 10^2 correspondiente a procesos predominantemente convectivos.
- Las relaciones Nu vs Ra son las presentadas en las expresiones (1) y (2) y muestran una dependencia con el Ra diferente a $Ra^{1/3}$.
- La producción de un destilador no puede inferirse a partir de la relación Nu vs Ra que está asociada fundamentalmente a la transferencia térmica. Es necesario analizar la transferencia de masa hacia la cubierta y la eficiencia de condensación.
- La producción de un destilador sólo puede inferirse a partir de una simulación en estado estacionario a nivel de aproximación. Es importante simular los transitorios de calentamiento-enfriamiento que ocurren realmente en 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. *EnergíasRenovables 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. *EnergíasRenovables y Medio Ambiente*, **8**, 37-47.
- De Paul, I. (2000). Contenido y productividad de un destilador tipo batea a alta temperatura. *Avances en EnergíasRenovables 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 EnergíasRenovables 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**.
- De Paul, I. (2001). Comportamiento de un destilador tipo batea con pendiente alta en las cubiertas. Enviado para su evaluación a *Avances en EnergíasRenovables y Medio Ambiente*.
- 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

The results obtained from the measurements performed on stills with different slope in the covers, 20° and 45° , are compared with the aim of establishing the influence of the cover slope on the distillate production. The results obtained in stationary state are compared with those obtained in the case of heating-cooling experiences, showing the importance of performing non-stationary simulations when the production of a still is to be predicted.

Keywords: distillation, hourly production, cover slope, stationary simulation.