

CARACTERÍSTICAS DEL FUNCIONAMIENTO NO ESTACIONARIO DE UN DESTILADOR SOLAR

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

RESUMEN. Un destilador real no funciona en condiciones estacionarias, por lo que se reprodujo en laboratorio las condiciones reales de calentamiento con el fin de analizar su comportamiento. Se empleó un destilador con calentamiento eléctrico, variando la corriente hora a hora para reproducir las curvas de calentamiento de agua observadas en un destilador real funcionando en un día claro de invierno. Los resultados muestran que el parámetro que caracteriza el funcionamiento es la temperatura máxima alcanzada por el agua y no la energía total suministrada. La producción total diaria y el destilado promedio horario son mayores cuanto más alta es la temperatura máxima del agua. Los coeficientes de transferencia térmica h en el interior del destilador son diferentes de los obtenidos en condiciones de estacionariedad, a la misma temperatura.

Palabras clave. Destilación, estado estacionario, producción total diaria, coeficiente h .

INTRODUCCION

Uno de los problemas más graves que afrontará el hombre en el futuro es la provisión de agua potable a la población. Aún en la actualidad es un grave problema en zonas aisladas como el chaco, la puna o llanura patagónica. En las grandes urbes el suministro de agua es manejado por grandes empresas privadas que, dado que la inversión puede no resultar rentable para ellas, no hacen inversiones en zonas aisladas, por lo que la población debe recurrir a soluciones locales extrayendo agua de pozos o vertientes en zonas muchas veces no aptas para consumo debido a las altas concentraciones de contaminantes tales como el arsénico. Para paliar este problema desde hace años el INENCO se abocó al desarrollo y estudio de los aspectos más relevantes del funcionamiento de destiladores solares, tales como el instalado en General Pagés en el Chaco Salteño para proveer agua a una escuela. El diseño de destiladores solares para asegurar una dada provisión de agua diaria es un viejo problema que suscitó la atención de muchos investigadores, que basaron sus cálculos en el modelo propuesto por Dunkle (Dunkle, 1961), que requiere el conocimiento del coeficiente de transferencia convectivo h en el interior del destilador. La falta de concordancia entre los valores de producción predichos por los cálculos y los medidos en las experiencias llevó al desarrollo de estudios tendientes a mejorar el conocimiento de los parámetros que influyen en la productividad, entre ellos el coeficiente de transferencia h (Close y otros, 1988; Cota y Cabanillas; 1988, De Paul, 2000 a; De Paul, 2002).

En trabajos anteriores se presentaron los resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio sobre un módulo a escala real de un destilador solar con cubierta a dos aguas, funcionando en condiciones estacionarias y de calentamiento constante durante el día y sin calentamiento durante la noche [De Paul y Hoyos 1999, De Paul 2000a, De Paul 2000b, De Paul 2000c, De Paul 2001a, De Paul 2001b], así como los obtenidos con el ensayo de destiladores funcionando al aire libre [Esteban y otros 2001]. Los resultados mostraron que no se puede inferir la producción de un destilador a partir del empleo de parámetros característicos de un funcionamiento estacionario y que era necesario caracterizar su funcionamiento en condiciones de calentamiento-enfriamiento similares a los reales. Con este objetivo se analizaron las curvas de insolación de días claros medidos en invierno en Salta y se calculó qué corriente era necesario suministrar a los calefactores del destilador de laboratorio para reproducir las curvas de calentamiento de agua medidas al aire libre. Se midió el destilado total diario, el destilado promedio horario y se calculó el coeficiente de transferencia convectivo h en el interior del destilador, analizando su comportamiento temporal y su dependencia con la temperatura del agua.

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 $\alpha = 45^\circ$ con la vertical (pendiente 45°). Las paredes están aisladas con poliestireno expandido de 0.03 m de espesor. 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; 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

[#] Instituto UNSa - CONICET

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 y un sistema de adquisición de datos Omega, que tomaba medidas cada quince minutos. Las termocuplas y el sistema de adquisición de datos fueron calibrados con un bloque calibrador TECHNE 2000 cuya temperatura fue controlada con un termómetro patrón de 0.1 °C de apreciación; el error en la medida de temperatura varía entre 0.2°C y 0.3 °C dependiendo del canal. El volumen de agua destilado se midió en vasos graduados con una precisión de 20 cm³.

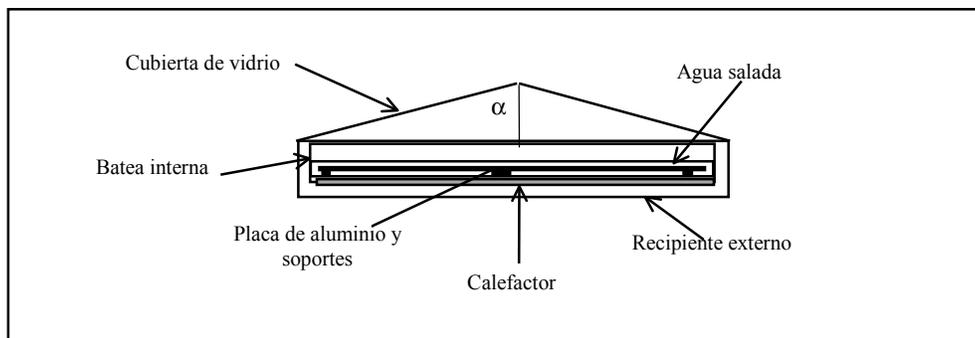


Figura 1. Esquema del destilador empleado en laboratorio.

El calentamiento se realizó empleando un autotransformador con el que se suministró corriente variable a las resistencias del calefactor. Con el fin de reproducir lo más fielmente posible las características generales del calentamiento en un destilador colocado a la intemperie, se tomaron las medidas de radiación de cielo claro realizadas en Salta en el invierno del año 2002 y se calculó la potencia horaria que recibiría el destilador; a partir de estos valores se calculó la corriente eléctrica que habría que suministrar a los calefactores, hora a hora. Posteriormente se compararon las características generales de la curva de temperatura alcanzada por el agua en el laboratorio con las medidas realizadas en destiladores a la intemperie, en condiciones de cielo claro en invierno [Esteban y otros, 2001]. Se realizaron ajustes a la forma de suministrar potencia hasta lograr una coincidencia razonable en las curvas de calentamiento.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las medidas se realizaron a lo largo de dos meses, en los que los días lunes se comenzaba a calentar el destilador desde las 8:00hs hasta las 19:00hs; en este período se formaba sobre los vidrios la película de agua necesaria para llevar al destilador a su funcionamiento óptimo (De Paul, 2000 a). Las medidas del destilado producido sólo son significativas en series de cuatro días consecutivos, de martes a viernes. La temperatura del laboratorio varió poco, con valores relativamente altos: alrededor de 18°C; este fue un inconveniente que no permitió reproducir exactamente las condiciones observadas en las experiencias al aire libre en invierno, en las que la temperatura del agua al comienzo del día era de 2°C aproximadamente. Se procuró bajar la temperatura inicial de diferentes maneras. Para el presente trabajo se seleccionó una serie en la que en uno de los días se bajó artificialmente la temperatura del agua colocando directamente hielo molido en la batea del destilador; en estas condiciones se obtuvo una temperatura de agua de alrededor de 5°C al comienzo del día. Las temperaturas máximas alcanzadas oscilaron entre 54°C y 67°C.

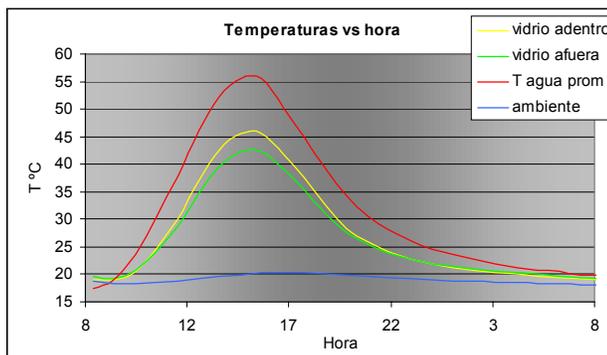
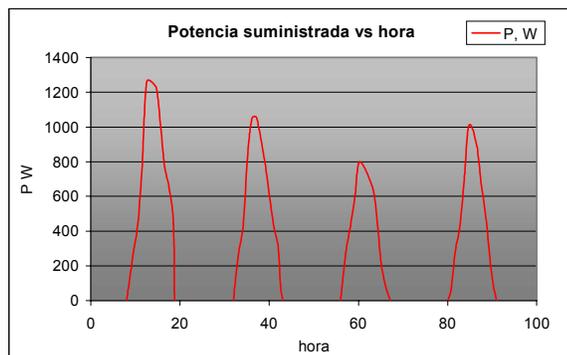


Figura 2. Potencia eléctrica suministrada a los calefactores. Figura 3. Temperaturas medidas en el destilador en un día típico.

La figura 2 muestra la potencia suministrada en función de la hora a lo largo de los cuatro días de ensayo; el calentamiento se realizó en períodos de diez horas, permitiendo que el destilador se enfríe hacia el ambiente en las horas de oscuridad. Dado que las experiencias se realizaron en laboratorio el ambiente externo es estático (no hay viento), ni hay radiación hacia el cielo que permita obtener temperaturas de agua tan bajas como las señaladas anteriormente. La figura 3 muestra la distribución de temperaturas en el destilador en día típico mientras que la figura 4 muestra la secuencia de temperaturas de agua y ambiente medidas durante la serie mostrada.

El destilado se midió hora a hora durante las horas de calentamiento, tomando la última lectura alrededor de las 19:00hs mientras que el destilado nocturno se midió al día siguiente a las 8:00hs. En un trabajo previo [Esteban y otros 2001] en el que se ensayaron dos destiladores a la intemperie se mostró que se puede interpolar los valores de destilado promedio horario tanto para el destilado nocturno como el que se obtiene en las primeras horas de la mañana. De esta manera se interpolaron funciones para el destilado promedio horario que permitieron reproducir razonablemente bien los valores medidos en las últimas horas del día y las primeras de la mañana. La figura 5 muestra las secuencias de valores obtenidos para el destilado promedio horario, tanto medido como calculado por interpolación.

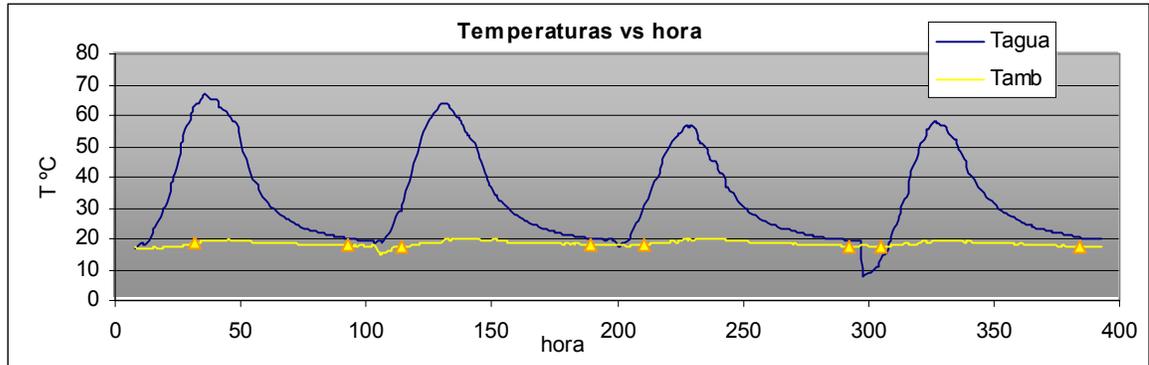


Figura 4. Temperatura del agua y temperatura ambiente en función de la hora. El día 4 se enfrió artificialmente el agua agregando hielo molido a la batea.

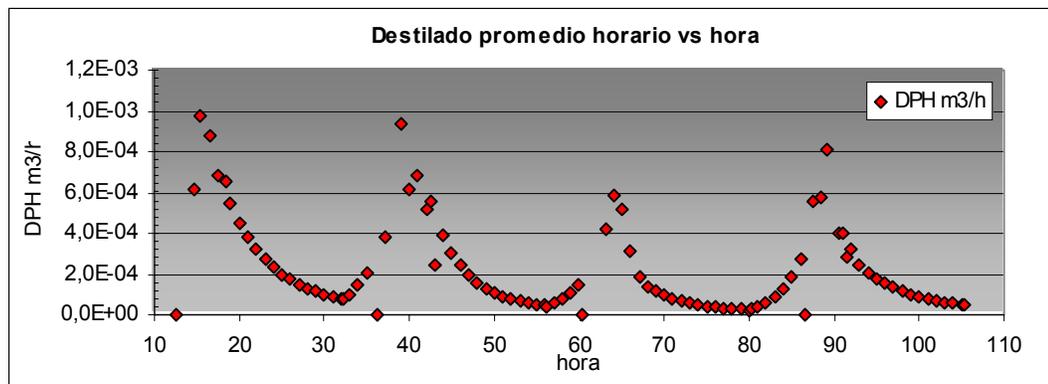


Figura 5. Destilado promedio horario en función de la hora. Los valores nocturnos fueron interpolados.

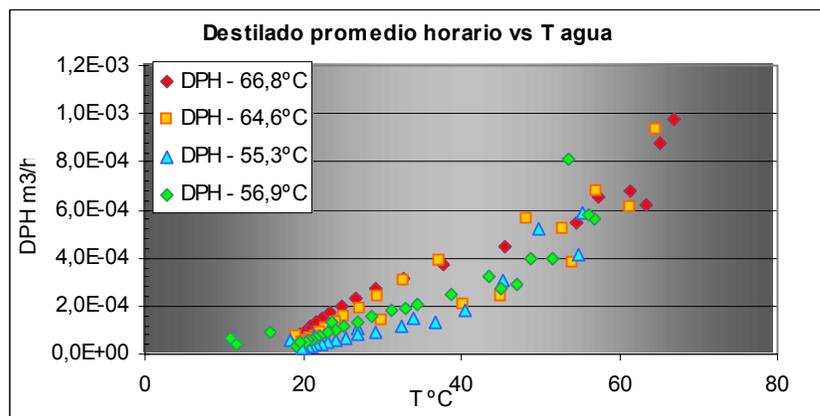


Figura 6. Destilado promedio horario en función de la temperatura del agua, teniendo como parámetro la temperatura máxima del agua.

La figura 6 muestra el destilado promedio horario en función de la temperatura del agua distinguiendo los cuatro días de ensayo con diferente símbolo, lo que permite mostrar que el destilado promedio horario aumenta a medida que crece la temperatura

máxima alcanzada por el agua. La Tabla I muestra un resumen de los valores de potencia máxima y energía total diaria suministradas, temperatura máxima alcanzada en el agua y destilado total diario.

Tabla I

Día	Pmax, W	Ettotal, J	Tagua max, °C	DTD, m3
1	1259,5	6,080E+08	66,8	5,60E-03
2	1052,9	5,153E+08	64,6	5,08E-03
3	798,3	3,144E+08	55,3	3,38E-03
4	1006,5	4,606E+08	56,9	3,44E-03

COEFICIENTE h

Sobre una de las cubiertas se colocaron termocuplas enfrentadas, una en la cara interna y otra en la cara externa del vidrio lo que permitió medir el calor que pasa por conducción y calcular el coeficiente de transferencia térmica convectiva h en el interior del destilador con la siguiente expresión, siendo k y e la conductividad térmica y el espesor del vidrio respectivamente y T_{vapor} la temperatura del medio encerrado en el interior del destilador [De Paul 2000a, De Paul 2000c].

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

En [De Paul, 1999] se discutió las dificultades que implica el cálculo del h, en particular cuando las diferencias de temperatura que intervienen en él se hacen tan pequeñas que caen dentro del error de medida. Estas dificultades aparecen cuando el destilador está relativamente frío, esto es, durante la noche y las primeras horas de la mañana, produciendo resultados absurdos como coeficientes h negativos y/o excesivamente grandes. Ninguna conclusión puede extraerse de estos valores salvo que h debe ser muy pequeño, a menos que se viole el Segundo Principio; ante esta situación se asignó a esas horas un coeficiente h nulo. La figura 7 muestra los valores de h obtenidos en función de la temperatura del agua.

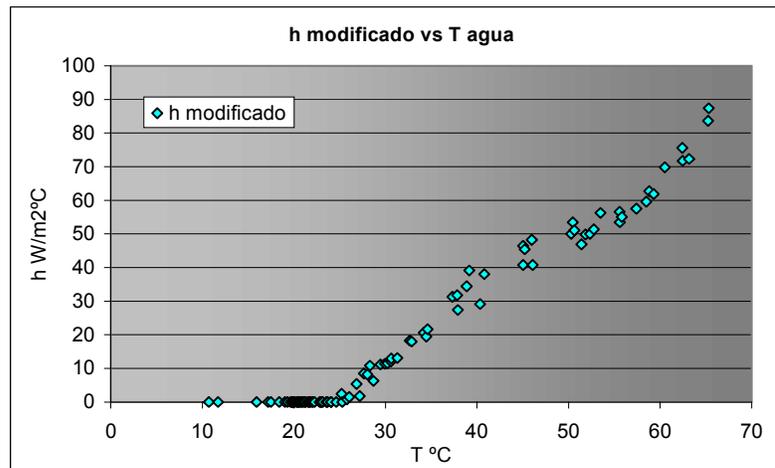


Figura 7. Coeficiente de transferencia térmica convectiva h en el interior del destilador.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El ensayo en laboratorio de un destilador en condiciones de no estacionariedad, tales como las que se encuentran en un destilador real a la intemperie presenta algunas dificultades. Por una parte no se pueden reproducir exactamente las condiciones iniciales en que se encuentra el destilador al comienzo del día dado que, como ya se señaló, en un destilador pueden alcanzarse temperaturas más bajas que las que tenemos en el laboratorio y por lo tanto es necesario recurrir a otros medios para bajar la temperatura del agua.

Por otra parte, *no se tiene a priori un parámetro definido que permita caracterizar el funcionamiento del destilador* en determinadas condiciones tal como la temperatura del agua en condiciones de estacionariedad, y por lo tanto es necesario analizar cuáles son los parámetros más relevantes que inciden en el destilado total diario (DTD) que es, en definitiva, lo que interesa. En este sentido se analizaron los coeficientes de correlación entre DTD y distintos parámetros que caracterizaron el funcionamiento en cada día: la potencia máxima suministrada, la energía total diaria suministrada y la temperatura máxima alcanzada por el agua; los resultados se muestran en la Tabla II.

Como se puede apreciar el parámetro que más influye es la temperatura máxima alcanzada por el agua; este resultado es coherente con los valores que muestra la Tabla I: comparando los días 2 y 4, en los que si bien la energía total suministrada es similar, debido a que las condiciones iniciales fueron diferentes, en el día 4 la temperatura máxima alcanzada es apreciablemente más baja que en el día 2, y el mismo comportamiento muestra el destilado total diario obtenido.

	Tagua max	DTD
Pmax		0,854
Ettotal	0,872	0,872
Tagua max		0,995

Tabla II

T agua °C	h no estacionario	h estacionario
30	11	25
45	45	41
50	51	50
60	70	62

Tabla III.

La figura 6, en la que se presenta el destilado promedio horario (DPH) en función de la temperatura del agua, en series discriminadas según la temperatura máxima alcanzada en el agua, se aprecia el mismo efecto: no sólo la producción total diaria, sino también el destilado promedio horario es mayor en aquellos días en los que al agua alcanzó mayor temperatura.

El coeficiente de transferencia convectiva h también muestra un comportamiento diferente en estas experiencias de los obtenidos en estado estacionario: a temperaturas bajas, los valores de h son menores mientras que a temperaturas altas son mayores que los obtenidos en caso estacionario (Tabla III); entre los 45°C y 50°C tiene valores similares, entre 40 y 50 W/m² °C. Este comportamiento se aprecia en la figura 8 en la que se realizó un ajuste a los valores medidos de h (significativos) con un polinomio de grado 3. Se observa que alrededor de los 45°C la curva de ajuste muestra un punto de inflexión, sugiriendo un posible cambio de régimen en las condiciones de flujo interno. Este resultado ya había sido encontrado en experiencias anteriores [De Paul 2000a] en las que el análisis de la correlación lnNu vs lnRa mostraba un cambio en la pendiente de la recta de ajuste a la misma temperatura. Estos aspectos deberán ser analizados con más profundidad en el futuro.

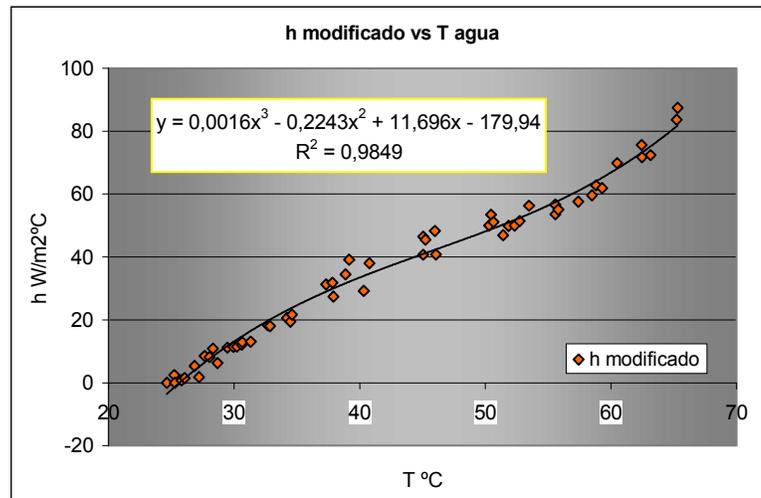


Figura 8. Coeficiente h en función de la temperatura de agua, valores medidos y ajuste.

CONCLUSIONES

De lo observado se puede concluir lo siguiente.

- El régimen de corriente eléctrica variable suministrada a los calefactores permitió reproducir razonablemente bien las características de una curva de calentamiento de agua en un destilador real funcionando a la intemperie en un día claro de invierno.
- El parámetro que caracteriza el funcionamiento de un destilador en condiciones de no estacionariedad es la temperatura máxima alcanzada por el agua en el día.
- Tanto el destilado total diario (DTD) como el destilado promedio horario (DPH) son mayores cuanto más alta es la temperatura máxima alcanzada por el agua en el día.
- El coeficiente de transferencia térmica convectiva h en el interior del destilador presenta un comportamiento diferente del obtenido en condiciones estacionarias, con valores más bajos a baja temperatura del agua y mayores a temperaturas más altas.
- La dependencia del h con la temperatura del agua sugiere que alrededor de los 45°C puede haber un cambio de régimen en la circulación del flujo en el interior del destilador.

- En una simulación numérica no se puede predecir la producción de un destilador real con razonable certeza a partir del empleo de parámetros característicos del funcionamiento en estado estacionario.

AGRADECIMIENTO. Queremos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Fernando Tilca quién suministró los datos de radiación solar medidos en Salta, que permitieron simular el calentamiento en condiciones reales.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Burmeister. “*Convective heat transfer*”. J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983)
- Close, D. J. Peck, M. K., White, R. F. y Wong, P. H., (1988). Natural convection heat transfer rates and flow patterns in a cavity filled with a gas vapour mixture. *Natural Convection in Enclosures, ASME, HTD – Vol 99*, 23.
- Cota, A. D., Cabanillas, R. E. (1994). Simulación matemática de un destilador solar tipo caseta. *Anales de la Asociación Nacional de Energía Solar*, México, 115.
- Chikhaoui, A. Marciilat, J. F. y Sani, R. L., (1988). Successive transitions in thermal convection within a vertical enclosure. *Natural Convection in Enclosures, ASME, HTD – Vol 99*, 29.
- De Paul, I., Hoyos, D. (1999). “Comportamiento fluidodinámico de un destilador solar tipo batea con cubierta a dos aguas”. *Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6*, pp.27-36.
- 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). “Contenido de agua y productividad de un destilador tipo batea a alta temperatura”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4*, Tomo 1, pp.03.21-03.26.
- De Paul, I. (2000). “Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 4*, Tomo 1, pp.03.27-03.32.
- De Paul, I. (2001). “Comportamiento de un destilador tipo batea con pendiente alta en las cubiertas”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5*, versión CD, pp.03.07-03.12.
- De Paul, I. (2001). “Comparación del comportamiento térmico y producción de destiladores con distinta pendiente en las cubiertas en estado estacionario”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5*, versión CD, pp.03.01-03.6.
- De Paul, I. (2002). “A new model of a basin-type solar still”. *Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 124*, 3, pp: 311-314.
- De Paul, I. (1999). “Algunas dificultades en el cálculo de coeficientes de transferencia térmica en el interior de una cavidad cerrada”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3*, Tomo 1, pp.08.1-08.4.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley and Sons, (1980).
- 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).
- Esteban, S., Vilte, M., De Paul, I., Hoyos, E. (2001). “Comparación de resultados en destiladores con distintas pendientes : medidas de campo”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5*, versión CD, pp.02.37-02.41.
- Isachenko, V., Osipova, V., Sukomel, A. “*Heat transfer*”. Mir Publishers. Moscú. (1974).
- Mac Adams, W. H. “*Transmisión de calor*” 3ª. Edición. Mc Graw Hill. México. (1978).
- Sayigh, A. A. M. *Solar Energy Engineering*, Academic Press, (1977).

ABSTRACT. A real still does not function in stationary conditions, so real heating conditions were reproduce at laboratory with the aim of characterise its performance. An electrical heated still was employed, varying hourly the electrical current trying to reproduce the heating curves observed in real stills functioning in the open air, in winter clear days. The results show that the parameter that characterise the performance is the maximum water temperature reached during the day, not the total energy supplied. The convective heat transfer coefficients h are different from those obtained in stationary conditions at the same temperature.

Keywords: Distillation, stationary state, total daily production, h coefficient.