

## **PECULIARIDADES 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.** Se ensayó en laboratorio un destilador en condiciones similares a las reales, de calentamiento no estacionario, con el fin de analizar resultados aparentemente anómalos obtenidos en experiencias previas. Se empleó un destilador con calentamiento eléctrico, variando la corriente de manera de reproducir las curvas de calentamiento de agua observadas en un destilador real funcionando en un día claro de invierno. Los resultados muestran que la temperatura del agua, el coeficiente de transferencia térmica y el destilado presentan oscilaciones con frecuencias características, que sugieren un fenómeno de tipo caótico. La profundización del conocimiento de esta característica podría permitir mejorar el diseño de destiladores para optimizar la producción.

**Palabras clave.** Destilación, coeficiente h, fenómeno caótico, optimización de la producción .

### **INTRODUCCION**

El suministro de agua potable suficiente para el consumo humano es uno de los problemas más acuciantes que se plantean a futuro; en nuestro país, esta situación se encuentra actualmente en zonas aisladas como el chaco, la puna o llanura patagónica. Una alternativa posible de aplicar en zonas de alta insolación en las que se dispone de agua pero no potable, es el empleo de destiladores solares tipo batea con cubiertas a dos aguas. El diseño de destiladores solares con este fin 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). Desde el INENCO se encaró el estudio de los aspectos más relevantes del funcionamiento de destiladores solares para optimizar su diseño y desarrollo, cuyos resultados fueron presentados en estas reuniones.

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 a potencia constante, 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 por lo que se realizaron ensayos en laboratorio de funcionamiento en condiciones de calentamiento-enfriamiento que reprodujeran las curvas de calentamiento de agua medidas al aire libre [De Paul y Quintana 2003].

Los resultados obtenidos en este último caso mostraban ciertas discrepancias con los obtenidos en situación de calentamiento constante que condujeron a repetir experiencias realizando las medidas, tanto de temperatura como de destilado, con una frecuencia mayor que en las experiencias previas. Los resultados mostraron que el funcionamiento de un destilador tiene un carácter mucho más complejo que el conocido hasta este momento, confirmó observaciones previas acerca de transiciones en las condiciones de flujo a una determinada temperatura [De Paul 2000a] y abrió un amplio campo de posibilidades de estudio de otros sistemas solares.

---

# Instituto UNSa - CONICET

## 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 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. 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 1cm<sup>3</sup> y 20 cm<sup>3</sup>.

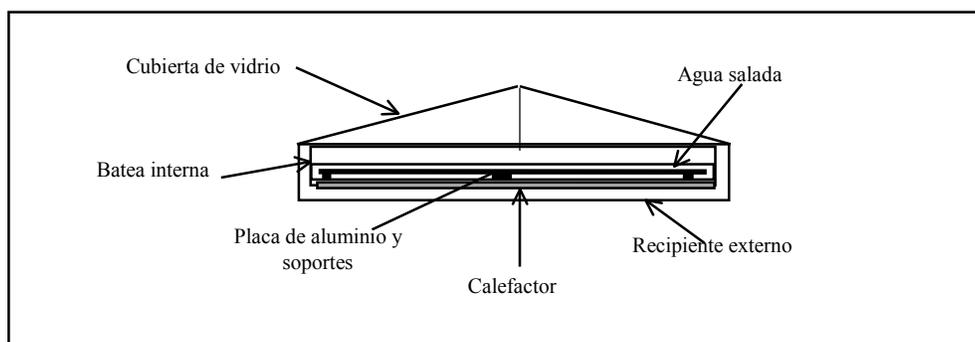


Figura 1. Esquema del destilador empleado en laboratorio.

El calentamiento se realizó empleando un autotransformador con el que se suministró corriente variable a las resistencias del calefactor, que permitió reproducir con suficiente precisión las características generales del calentamiento en un destilador colocado a la intemperie, en condiciones de radiación de cielo claro, en invierno, en Salta [Esteban y otros, 2001].

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Día	Taguamax	RESUMEN DE MEDIDAS REALIZADAS					
		T hmax 1	T hmax 2	T inflexion	deltat Temp	deltat Dest	deltat l
9/09/03	54,2	41,7	52,8	36,6	15 min	1hr	1 hr
10/09/03	56,4	43,4	49,2	36,7	15 min	1hr	1 hr
11/09/03	58,4	42,1	50,0	33,7	15 min	1hr	1 hr
12/09/03	58,0	41,5		33,3	15 min	...30 min	1 hr
15/10/03	63,9	46,9	60,8	42,7	15 min	15 min	1 hr
16/10/03	63,1	45,3	55,0	43,8	15 min	15 min	1 hr
17/10/03	62,4	47,3		43,8	15 min	15 min	1 hr
20/10/03	63,7	47,2	63,2	42,8	15 min	15 min	1 hr
19/11/03	66,3	44,9	61,3	42,4	15 min	10 min	1 hr
20/11/03	65,3	46,0	64,7	45,4	15 min	10 min	1 hr
21/11/03	66,0	48,7	63,1	46,8	15 min	10 min	30 min
10/12/03	64,0	58,8	46,8	45,2	5min	10 min	30 min
11/12/03	54,9	48,2	66,4	49,9	5min	10 min	30 min
12/12/03	60,5	46,2	59,7	45,5	5min	10 min	30 min
27/04/04	35,6	33,5?		29,8	5min	10 min	30 min
28/04/04	59,0	42,0		36,1	5min	10 min	30 min
29/04/04	59,5	44,0		38,2	5min	10 min	30 min

Tabla I. Resumen de medidas realizadas.

La Tabla I muestra un resumen con las características de las medidas realizadas indicando la temperatura máxima alcanzada por el agua en cada día, Taguamax, la temperatura a la cual se observan máximos anómalos en el coeficiente de transferencia térmica h, T hmax1 y T hmax2, la temperatura a la cual se encuentra el punto de inflexión en el ajuste h vs Tagua, Tinflexión, el período de medida de temperaturas, deltat Temp, el período de medida del destilado, deltat Dest y el período de cambio de la corriente en los calefactores, deltat I.

### 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<sub>vapor</sub> la temperatura del medio encerrado en el interior del destilador [De Paul 2000a, De Paul 2000c].

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

### RESULTADOS

Los resultados que sugirieron encarar estas experiencias mostraban valores de h en función de la temperatura del agua, que eran más grandes que lo esperado de acuerdo al comportamiento general que se puede ajustar con buena precisión con un polinomio de grado tres. La figura 2 muestra los valores obtenidos el 9/9/03, con un máximo de h en T=41.7°C y posiblemente otro alrededor de los 53°C. El calentamiento se realizó variando la corriente de los calefactores de hora en hora, las medidas de temperatura se realizaban cada 15 minutos y las de destilado cada hora. La pregunta que se planteó era si ese resultado atípico era un error de medida o era algo sistemático originado en el mismo funcionamiento del destilador.

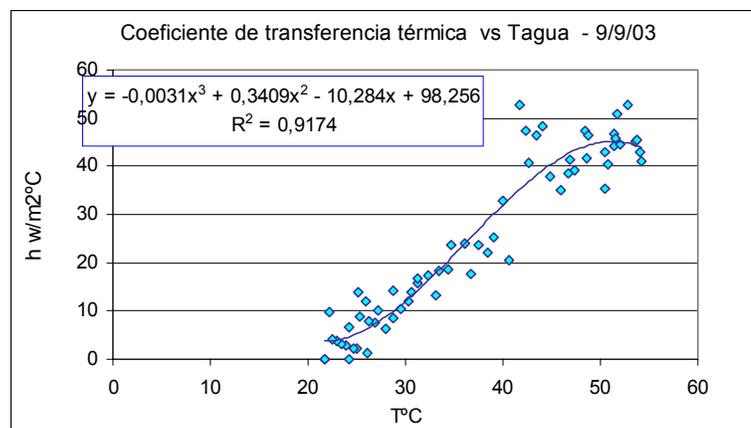


Figura 2. Coeficiente de transferencia térmica h en función de la temperatura del agua y ajuste de grado 3.

En principio se repitieron las experiencias en las mismas condiciones; luego se repitieron aumentando la frecuencia de medida de temperatura y de destilado como se muestra en la Tabla 1, y finalmente se realizó el calentamiento variando los valores de corriente en los calefactores, I, en intervalos de media hora, siempre asegurando que las curvas de calentamiento del agua fueran semejantes a las obtenidas al aire libre.

Los resultados de los ensayos mostraron lo siguiente: 1) Los máximos en los valores de h son sistemáticos y no producto de un error de medida (figura 3). En todas las medidas realizadas se observó al menos un máximo anómalo en h, y en algunos casos, dos. 2) La representación de h en función del tiempo muestra oscilaciones, con máximos muy marcados, aproximadamente simétricos respecto de la hora en el que el agua alcanza la máxima temperatura (figura 4). 3) La temperatura del agua muestra oscilaciones muy marcadas durante la etapa de calentamiento (figura 5). 4) El destilado promedio en función del tiempo muestra oscilaciones muy marcadas durante todo el intervalo de medida, más marcadas alrededor de la hora en el que el agua alcanza la máxima temperatura (figura 6).

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores medidos de h pueden ajustarse con buena precisión con un polinomio de grado 3, que presenta un punto de inflexión a una temperatura característica, que depende de la temperatura máxima alcanzada por el agua. En trabajos previos [De Paul 2000 c, De Paul 2001 b] también se se observó esta situación y se propuso que a esa temperatura se producía una modificación en las

condiciones de circulación del flujo en el interior del destilador. Los resultados obtenidos en estas experiencias refuerzan esta hipótesis.

Tagua	hm	hc	%
46,2	65	31,3	108
59,7	87,4	59,0	48

Tabla 2. Comparación de los h medidos con los que resultan del ajuste.

Tomando como referencia los valores de h que surgen del ajuste con un polinomio de grado 3, los valores anómalos de h pueden alcanzar valores de hasta un 108% mayores que los de referencia. La Tabla 2 muestra los valores de h medidos, hm, los calculados con el ajuste, hc, y la variación porcentual correspondientes a las medidas realizadas el 12/12/03.

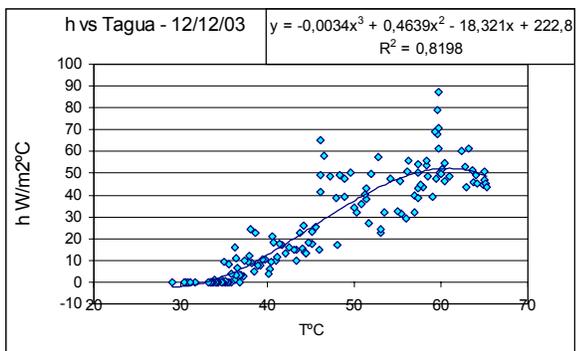


Figura 3. h vs Tagua y ajuste para el día 12/12/03.



Figura 4. h vs hora para el día 19/11/03.

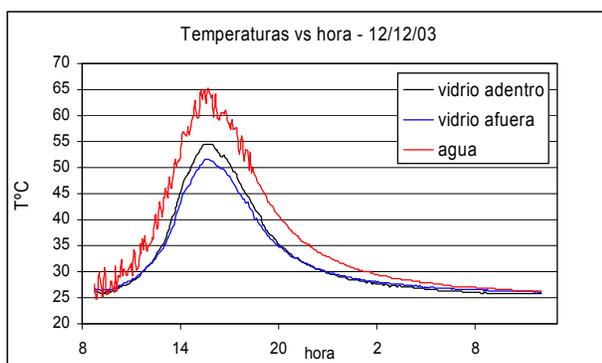


Figura 5. Temperatura del agua y del vidrio para el 12/12/03.

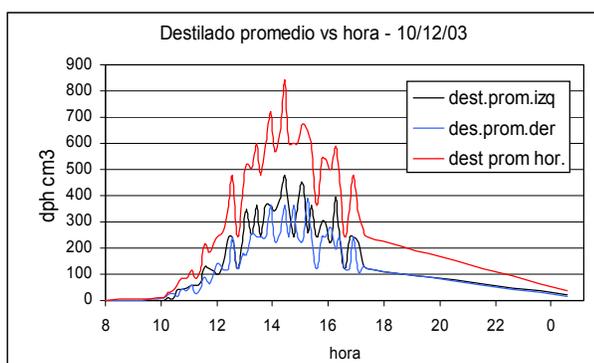


Figura 6. Volumen destilado por el vidrio izquierdo, derecho y total, el 10/12/03.

Para analizar si las oscilaciones observadas están asociadas a frecuencias características, se realizó un análisis de Fourier de las series de datos medidos, tanto de temperatura del agua como del destilado, así como de los valores calculados de h. Como el número de datos a analizar debe ser  $2^m$ , con m entero positivo, y este número en general no coincide con el número de datos disponibles, se analizaron distintos intervalos de medida a lo largo de cada día, con el número de datos que permitía el programa. Los gráficos de la potencia espectral en función de la frecuencia  $f = n \cdot f_0$ , siendo  $f_0$  la frecuencia de muestreo, presentan máximos en ciertas frecuencias características, que se repiten en algunas medidas, y que pueden ser comunes a los espectros correspondientes a la temperatura del agua y del coeficiente de transferencia térmica h.

A los efectos de ilustrar los resultados obtenidos se muestran en las figuras 7 y 8 el número de máximos obtenidos para la serie de medidas realizadas entre el 10 y el 12 de diciembre de 2003 y las realizadas el 28 y 29 de abril de 2004 en diferentes intervalos de medida, en función del coeficiente n que caracteriza la frecuencia. Se observa que para  $n = 6, 7, 10, 14, 17$  y  $18$  los espectros de la temperatura de agua y de h presentan máximos en las mismas frecuencias, mostrando Tagua un máximo muy marcado en  $n = 18$ , correspondiente a un periodo de 1h 10m 48s, que coincide con una de las frecuencias en las que el número de máximos en el espectro de h es mayor.

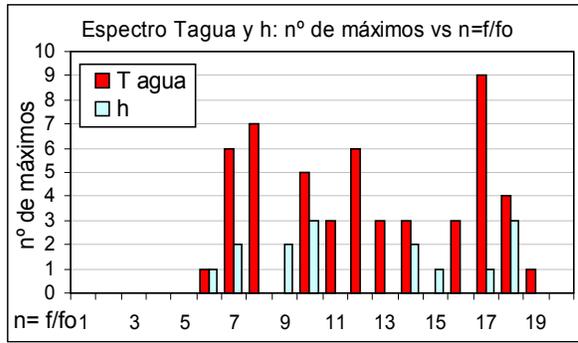


Figura 7. Número de máximos observados en los espectros de Fourier realizados sobre las series temporales de la temperatura del agua y h.

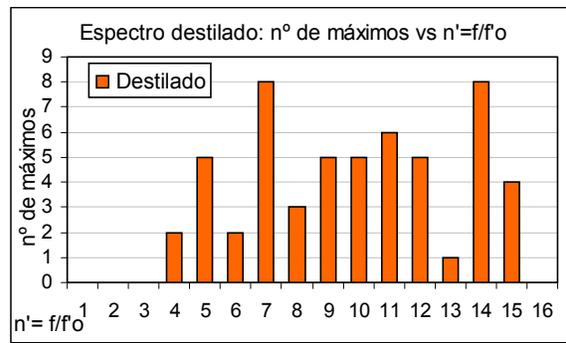


Figura 8. Número de máximos observados en los espectros de Fourier realizados sobre las series temporales de destilado.

La comprobación de que en el espectro de Fourier hay frecuencias características sugiere que estamos en presencia de un fenómeno de tipo caótico, que se manifiesta en oscilaciones en el calentamiento del agua y la producción de destilado, y valores anormalmente grandes del coeficiente de transferencia térmica, cuando el calentamiento es no estacionario. Esta hipótesis ya fue anticipada en [De Paul 2000 c]. Si se pudiera asociar estas frecuencias a parámetros constructivos del destilador, tal vez se podría mejorar el diseño de manera de optimizar la producción de agua destilada.

Estos resultados conducen a otra hipótesis: el calentamiento no estacionario se logró procurando reproducir las curvas de calentamiento solar medidas en destiladores colocados a la intemperie. En condiciones de día claro, cualquier dispositivo solar que emplee convección natural estaría sometido a condiciones de calentamiento no estacionario similares a las ensayadas en estas experiencias, y sería de esperar que se alcanzaran condiciones de funcionamiento de tipo caótico, con la correspondiente intensificación de la transferencia térmica [Mladin y Zumbrennen 1994, Vasseur y otros 1987, Zumbrennen y Aziz 1993]. De manera análoga a lo que se plantea para los destiladores, si se pudiera asociar frecuencias características a parámetros constructivos, tal vez se podría mejorar el diseño de manera de optimizar la transferencia térmica.

## CONCLUSIONES

De lo observado se puede concluir lo siguiente.

- Los máximos en los valores de h son sistemáticos y no producto de un error de medida.
- La representación de h en función del tiempo muestra oscilaciones, con máximos muy marcados, aproximadamente simétricos respecto de la hora en el que el agua alcanza la máxima temperatura.
- La temperatura del agua muestra oscilaciones muy marcadas durante la etapa de calentamiento.
- El destilado promedio en función del tiempo muestra oscilaciones muy marcadas durante todo el intervalo de medida, más marcadas alrededor de la hora en el que el agua alcanza la máxima temperatura.
- Los valores anómalos de h pueden alcanzar valores de hasta un 108% mayores que los de referencia.
- El análisis de Fourier de las series temporales de Tagua, h y destilado muestra máximos en ciertas frecuencias características, que se repiten en algunas medidas y que pueden ser comunes a los espectros correspondientes a la temperatura del agua y del coeficiente de transferencia térmica h.
- Estos resultados sugieren que estamos en presencia de un fenómeno de tipo caótico, que se manifiesta en oscilaciones en el calentamiento del agua y la producción de destilado, y valores anormalmente grandes del coeficiente de transferencia térmica, cuando el calentamiento es no estacionario.
- Si se pudiera asociar estas frecuencias a parámetros constructivos del destilador, tal vez se podría mejorar el diseño de manera de optimizar la producción de agua destilada.
- Tal vez se pueda extender esta hipótesis a otros sistemas solares.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Brittingham, R.A., Mladin, E.C., Zumbrennen, D.A. "Heat transfer transients in stagnation flows due to changes in flow velocity". *Journal of Thermophysics and heat transfer*, **10**, 1, 186-189, (1995).
- Burmeister. "Convective heat transfer". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983)
- Chikhaoui, A. Marcollat, 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.
- 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.

- 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.
- De Paul, I. (2000)a. "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. (2000)b. "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)c. 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. (2001)a. "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. (2001)b. "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., 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, J. M. Quintana. "Características del funcionamiento no estacionario de un destilador solar". *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **Vol. 6**, versión CD, pp.02.07-02.12. (2002). ISSN. 0329-5184.
- Del Campo, E. M., Sen, M., Ramos, E. "Analysis of laminar natural convection in a triangle enclosure". *Numerical Heat Transfer*, **13**, pp: 353-372. (1988).
- 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).
- Mladin, E.C., Zumbunnen, D.A. "Dependence of heat transfer to pulsating stagnation flow on pulse characteristics". *Journal of Thermophysics and heat transfer*, **9**, 1, 181-192, (1994).
- Sayigh, A. A. M. *Solar Energy Engineering*, Academic Press, (1977).
- Vasseur, P., Robillard, L, Sen, M. "Unicellular convective motion in an inclined fluid layer with uniform heat flux." Bifurcation Phenomena in Thermal Processes and Convection. HTD-Vol. 94, AMD-Vol. 89, pp: 23-29. ASME. (1987).
- Zumbunnen, D.A., Aziz, M. "Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet". *Journal of Heat Transfer*, **115**, 91-98, (1993).

**ABSTRACT.** Essays on a still functioning in conditions similar to real non stationary heating were performed at laboratory with the aim of analysing apparently anomalous previous results. An electrical heated still was employed, varying the electrical current trying to reproduce the heating curves observed in real stills functioning in the open air, in winter clear days. Results show that the temperature of the water, the convective heat transfer coefficient and the production shows oscillations with characteristics frequencies, that suggest a chaotic phenomenon. A deeper knowledge of this characteristic could allow a better design of stills to optimise the production.

**Keywords:** Distillation, h coefficient, chaotic phenomenon, optimisation of production.