

## EFFECTOS DE HISTÉRESIS EN LA PRODUCCIÓN DE UN DESTILADOR

I. De Paul, M. A. Perales, C. González, J. Quintana, S. Gündel, B. Ramos, I. Ramos, G. Aguirre  
 Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta – Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 Salta  
 Tel. 0387-4255389 – Fax 0387-4255449 e-mail: [depaul@unsa.edu.ar](mailto:depaul@unsa.edu.ar)

**RESUMEN.** Con el objetivo de optimizar la producción de destilado se realizaron ensayos con un destilador de laboratorio sometido a calentamiento que reproduce el calentamiento solar de día claro, cuyas cubiertas tienen una pendiente de 20° y se compararon con resultados previos obtenidos con una pendiente de 45°. Se observó que tanto el destilado promedio horario como el destilado total diario eran mayores en el caso de mayor pendiente. Se comprobó que la producción depende de la historia del funcionamiento del destilador, mostrando un efecto de histéresis y se analizó la influencia estacional.

**Palabras clave:** Destilación, optimización del funcionamiento, efecto de histéresis.

### INTRODUCCION

La discrepancia entre lo predicho para la producción de un destilador a partir del modelo propuesto por Dunkle [Dunkle, 1961] y los resultados experimentales dio origen a una serie de experiencias tendientes a profundizar el conocimiento del funcionamiento de dichos dispositivos y esclarecer la influencia de la pendiente de las cubiertas en la producción. En experiencias previas [De Paul 2000, De Paul 2001a, De Paul 2001b] se analizó la influencia de la pendiente ante condiciones de funcionamiento estacionario y de calentamiento diurno constante y enfriamiento nocturno. En [De Paul y Quintana 2003, De Paul y Quintana 2004] se analizó la producción y comportamiento térmico ante condiciones de calentamiento que reproducían el calentamiento solar no uniforme para una pendiente en las cubiertas de 45° mientras que en [De Paul y Quintana 2004, De Paul y otros 2006] se mostró que ante condiciones de calentamiento no uniforme como el de origen solar, el coeficiente de transferencia térmica convectivo  $h$  en el interior de un destilador alcanzaba valores excepcionalmente altos, fenómeno originado en un comportamiento caótico del destilador [Manneville 2004] y se propuso realizar más experiencias con alta frecuencia de muestreo para tener un conocimiento más profundo de las características de funcionamiento de dichos dispositivos.

Las primeras experiencias que se realizaron sobre un destilador de laboratorio cuyas cubiertas formaban un ángulo de 45° respecto de la horizontal mostraron que la producción estaba determinada fundamentalmente por la temperatura del agua. Posteriormente se ensayó el destilador con una pendiente de 20° en las cubiertas, para comparar el comportamiento en ambas situaciones ante las mismas condiciones de calentamiento y esclarecer la influencia de la geometría del sistema. Como resultado de estos ensayos se observó un comportamiento diferente en la producción de destilado a una dada temperatura del agua, dependiendo de si esta temperatura era alcanzada durante el calentamiento o el enfriamiento. Este fenómeno de histéresis es otra manifestación de la presencia de un comportamiento caótico del destilador que depende de la historia de su funcionamiento [Vadasz 2000].

### DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

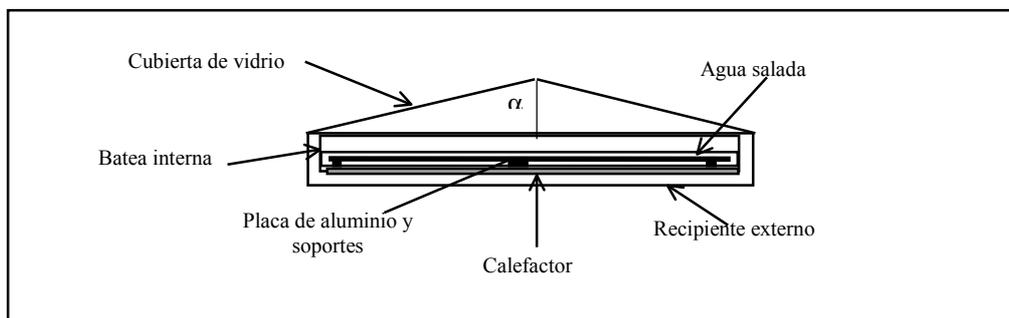


Figura 1. Esquema del destilador empleado en laboratorio.

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 cuya pendiente se puede variar entre 20° y 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 es un recipiente doble: la batea que contiene el agua para destilar, contenida en un segundo recipiente en el que un conjunto de resistencias eléctricas permiten calentar el agua simulando el calentamiento solar.

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. El volumen de agua destilado se midió en vasos graduados con una precisión de  $10^{-6} \text{ m}^3$  y  $2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ . El calentamiento se realizó manualmente empleando un autotransformador con el que se suministró corriente variable a las resistencias del calefactor, que permitió reproducir 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]. El periodo de muestreo de las temperaturas fue de cinco minutos mientras que el destilado se midió manualmente cada diez minutos.

Se realizaron seis series de medidas con pendiente de  $45^\circ$  y nueve series con pendiente de  $20^\circ$ ; cada serie consta de 4 a 5 días consecutivos de medidas cada una. El destilado se midió desde el momento que comenzaba a producirse, alrededor de la 10:00 hs de la mañana hasta las 19:30 hs, cortándose el calentamiento a las 19:00hs. A las 8:00 hs del día siguiente se recogió el destilado nocturno y, haciendo uso de resultados previos [Esteban y otros, 2001], se interpoló el destilado horario durante la noche.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en los ensayos con las cubiertas a  $45^\circ$  fueron presentados en trabajos anteriores [De Paul y Quintana 2003, De Paul y Quintana 2004, De Paul y otros 2006], mostrando que el destilado promedio horario crecía con la temperatura máxima alcanzada por el agua y presentaba oscilaciones de origen caótico.

Los resultados que se presentan aquí corresponden a las medidas realizadas con una pendiente de  $20^\circ$  en las cubiertas, reproduciendo las mismas curvas de calentamiento que las anteriores. En la figura 2 se presentan las curvas de calentamiento del agua de una serie de cinco días mostrando la repetibilidad de la experiencia a lo largo de los cinco días de medidas, y destacando la etapa de calentamiento de la de enfriamiento.

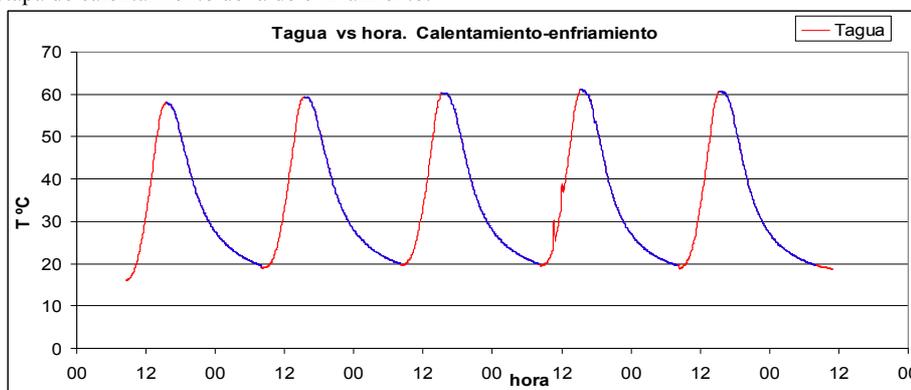


Figura 2. Evolución temporal de la temperatura del agua en una serie de cinco días.

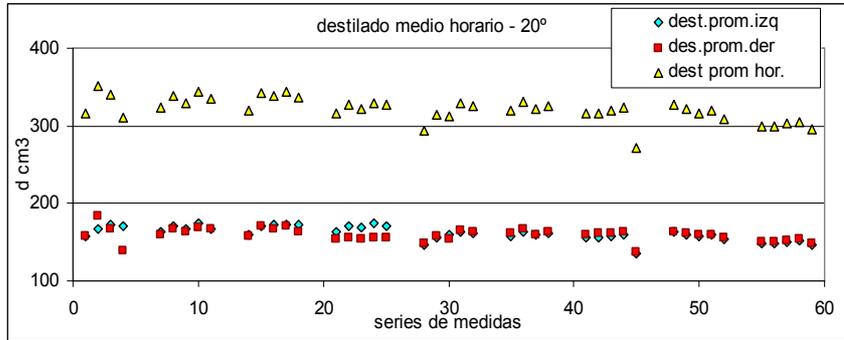
La Tabla I permite establecer una comparación entre la producción promedio horaria total (DPT) y total diaria (DTD), entre la cubierta izquierda (DTizq, DPizq) y la derecha (DTder, DPder), del destilador con pendiente de  $20^\circ$  y  $45^\circ$  en las cubiertas, ante las mismas condiciones de calentamiento similares a la solar de días claros. Se observa que los valores totales son mayores para el caso de  $45^\circ$  en un 17.7% y 10.5% respectivamente, en los valores promedio sobre todas las series de medidas. Se muestran también los valores máximos y mínimos obtenidos observándose que tanto el DPT como el DTD máximos son mayores a  $45^\circ$  mientras que los mínimos son un 25% mayores para el DPT mientras que son un 25% menores para el DTD.

Totales diarios en $\text{cm}^3/\text{día}$ /Promedios horarios en $\text{cm}^3/\text{hora}$						
	DTizq	DPizq	DTder	DPder	DTD	DPH
<b><math>20^\circ</math></b>						
Prom.	1814	161,5	1775	159,5	3589	321,2
DESV. ST.	95,4	8,8	84,1	8,5	155,9	15,5
%	5,3	5,5	4,7	5,3	4,3	4,8
MAXIMO	1980	175,0	1920	184,5	3870	352,1
MINIMO	1530	135,0	1540	137,2	3070	272,2
<b><math>45^\circ</math></b>						
Prom.	1986,2	188,2	1980,0	189,9	3966,2	378,0
DESV. ST.	238,6	12,7	216,7	9,8	452,9	22,3
%	12,0	6,8	10,9	5,2	11,4	5,9
MAXIMO	2260	213,4	2160	208,8	4420	421,4
MINIMO	1130	167,6	1170	173,6	2300	341,2
<b>Comparación <math>45^\circ</math> vs <math>20^\circ</math> - %</b>						
Prom.	9,5	16,5	11,5	19,0	10,5	17,7
MAXIMO	14,1	21,9	12,5	13,2	14,2	19,7
MINIMO	-26,1	24,1	-24,0	26,6	-25,1	25,4

Tabla I. Comparación de la producción del destilador con pendiente de  $20^\circ$  y  $45^\circ$  en las cubiertas.

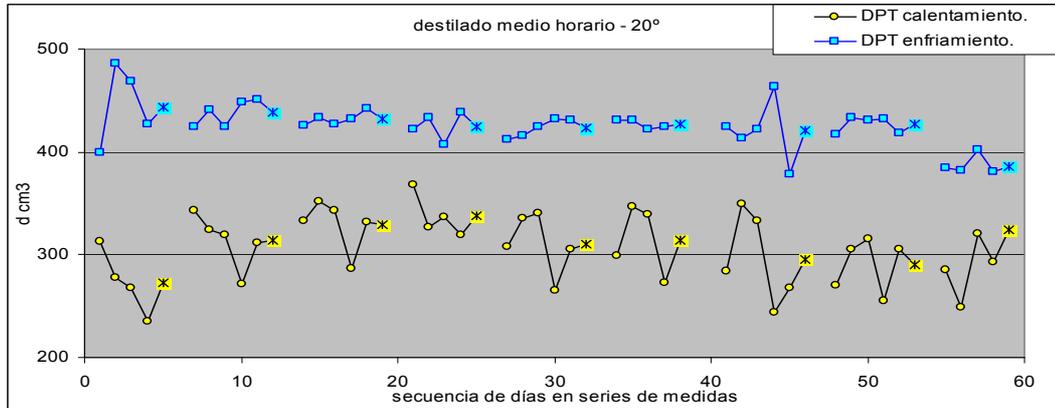
**Comportamiento en condiciones de calentamiento y enfriamiento**

La figura 3 muestra el destilado medio horario obtenido sobre cada cubierta (identificadas como izquierda, DPizq, y derecha DPder), y el destilado medio total, promediado en el día, correspondiente a cada día de todas las series de medidas realizadas.



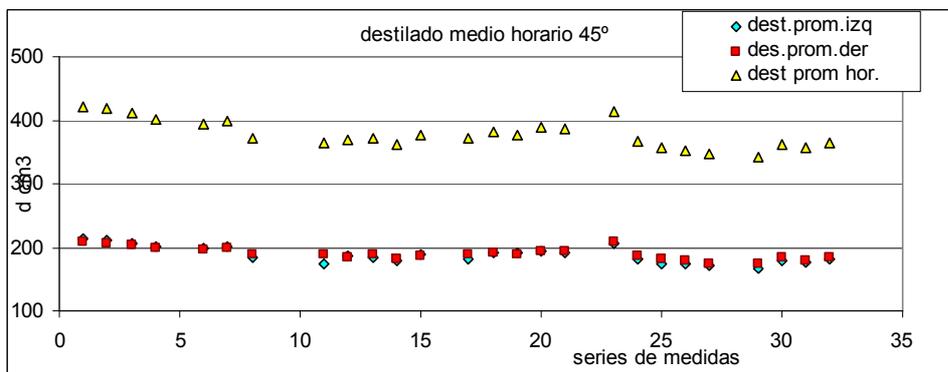
**Figura 3. Destilado promedio horario sobre cada cubierta y total con 20°, todas las series de medidas**

La figura 4 muestra el destilado medio horario total correspondiente a las etapas de calentamiento y de enfriamiento, destacando con el último punto el valor promedio de cada serie. El DPT durante el enfriamiento es mayor que en el calentamiento en porcentajes que van desde el 14.6% al 89.9%.



**Figura 4. Destilado promedio horario a 20°, en calentamiento y enfriamiento, todas las series de medidas.**

A los efectos de comparar con los resultados obtenidos en las experiencias realizadas con pendiente de 45° se muestran en las figuras 5 y 6 los mismos valores. El DPT durante el enfriamiento es mayor que en el calentamiento en porcentajes que van desde el 2.9% al 60.5%.



**Figura 5. Destilado promedio horario sobre cada cubierta y total con 45°, todas las series de medidas**

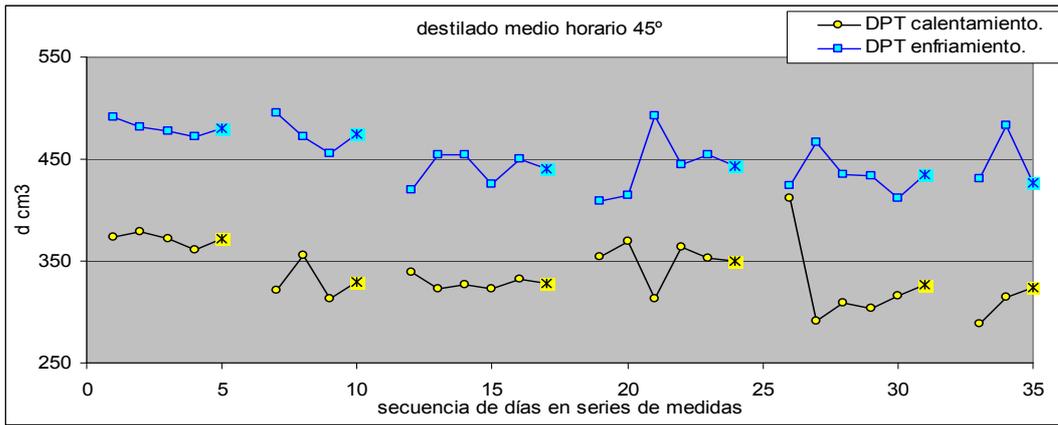


Figura 6. Destilado promedio horario a 45°, en calentamiento y enfriamiento, todas las series de medidas

La Tabla II muestra el destilado medio horario en cm<sup>3</sup>/hr promediado sobre todas las series de medidas realizadas, discriminado en las etapas de calentamiento (T creciente) y enfriamiento (T decreciente).

20°	T creciente			T decreciente		
	DPizq	DPder	DPT	DPizq	DPder	DPT
Promedio	153,5	152,8	306,6	213,8	210,8	424,5
Desv. St.	16,8	18,2	33,4	11,7	13,4	22,5
%	11,0	11,9	10,9	5,5	6,4	5,3

45°	T creciente			T decreciente		
	DPizq	DPder	DPT	DPizq	DPder	DPT
Promedio	166,9	170,3	336,9	225,2	224,5	450,2
Desv. St.	15,8	14,5	30,1	14,7	12,1	26,9
%	9,4	8,5	8,9	6,5	5,4	6,0

Tabla II. Destilado medio horario en cm<sup>3</sup>/hr promediado sobre todas las series de medidas realizadas, discriminado entre las etapas de calentamiento y enfriamiento.

La figura 7 muestra el destilado promedio horario total en función de la temperatura del agua para el primer día de una serie de medidas destacando la etapa de calentamiento en rojo de la de enfriamiento en azul que presenta una trayectoria de enfriamiento similar a la de calentamiento. La figura 8 muestra lo mismo pero correspondiente a tres días más tarde, observándose que el destilado medio es diferente en ambas situaciones, teniendo una mayor producción durante el enfriamiento que durante el calentamiento. Este comportamiento se observa con mayor o menor nitidez en todas las series de medidas poniendo en evidencia que la historia previa de funcionamiento del destilador condiciona su producción.

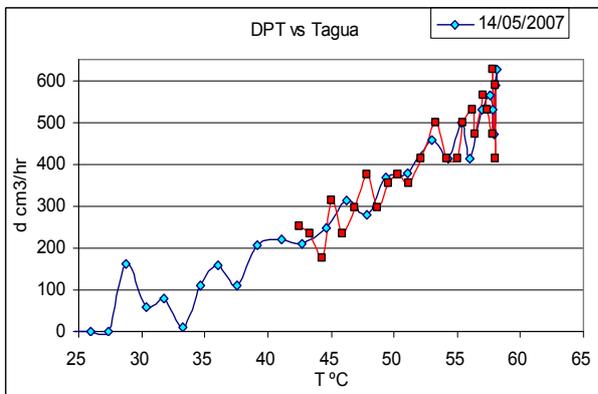


Figura 7. Destilado promedio horario correspondiente al primer día de la serie, calentamiento y enfriamiento.

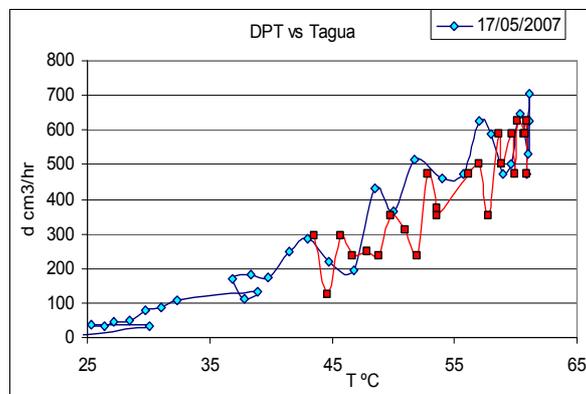


Figura 8. Destilado promedio horario correspondiente al penúltimo día de la serie, calentamiento y enfriamiento.

## Comportamiento estacional

Considerando que, en función de los resultados obtenidos, la historia del funcionamiento del destilador influye en su producción se analizaron los datos obtenidos en distintas épocas del año en condiciones en que la temperatura ambiente en el laboratorio era distinta. La figura 9 muestra el DPT correspondiente a una serie de cinco días graficada como función de la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente, mostrando una tendencia creciente según una relación cuadrática con un buen coeficiente de determinación.

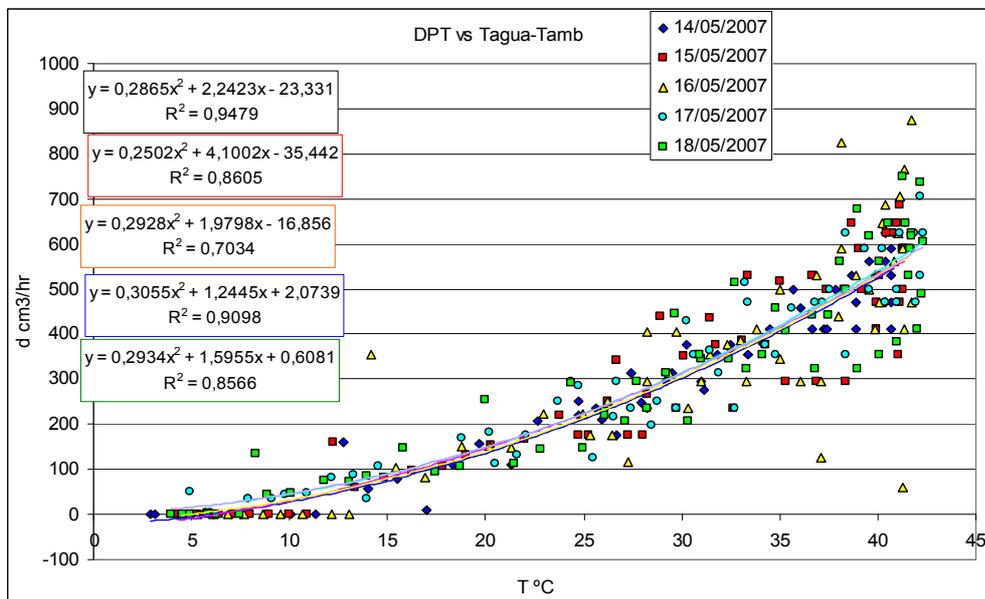


Figura 9. Destilado promedio horario en función de la diferencia Tagua-Tamb, serie completa

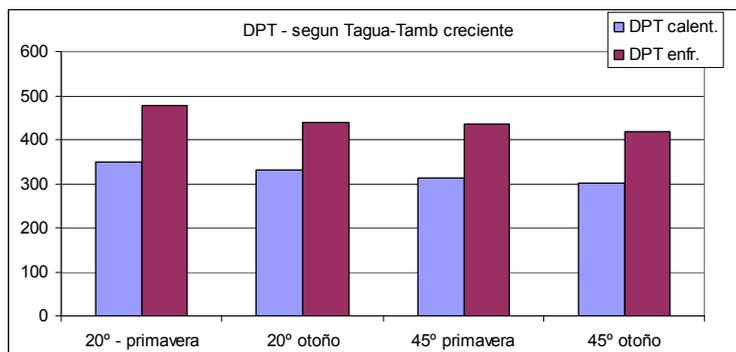
La Tabla III muestra los valores de DPT promedios en cada serie, ordenada según la época del año en que fueron realizadas las medidas, para ambas pendientes de las cubiertas del destilador.

Comportamiento estacional 20°					calentamiento	enfriamiento
Época	Día	Tagua °C	Tamb °C	Tagua - Tamb °C	DPT cm³/hr	DPT cm³/hr
Primavera	26-9-06	36,7	21,4	15,2	273,2	444,0
	2-10-06	37,2	22,3	15,0	313,9	438,2
	9-10-06	38,7	24,2	14,5	329,1	432,3
	13/11/0613	40,5	26,1	14,4	337,7	425,3
Otoño	14-5-07	33,6	17,5	16,1	311,1	423,0
	21-5-07	34,1	17,5	16,6	314,7	427,4
	28-5-07	30,1	13,6	16,5	295,7	420,5
	18-6-07	32,6	16,7	16,0	290,5	426,6
	25-6-07	32,2	15,8	16,4	294,5	387,1
Comportamiento estacional 45°					calentamiento	enfriamiento
Época	Día	Tagua °C	Tamb °C	Tagua - Tamb °C	DPT cm³/hr	DPT cm³/hr
Primavera	29-11-05	39,0	25,7	13,4	371,4	480,2
	05-12-05	33,3	23,8	9,5	329,8	474,2
Otoño	17-04-06	33,7	19,6	14,1	328,5	440,5
	24-04-06	35,7	21,9	13,8	350,5	443,1
	08-05-06	32,3	18,0	14,4	326,3	434,3
	15-05-06	32,8	18,2	14,6	314,6	442,9

Tabla III. Valores promedios para cada serie de medidas de variables características, para ambas pendientes de cubiertas, destacando el comportamiento estacional.

Se observa que la producción media de enfriamiento es mayor que la de calentamiento, en porcentajes que pueden variar mucho: entre el 2.9 y el 60.5% para 45° y entre 14.6 y 89.9% para 20°, mostrando una tendencia levemente creciente con Tamb.

Sin embargo, si se grafican los mismos valores en función de la diferencia entre Tagua y Tambiente, (figura 10) se observa una tendencia decreciente, resultado a priori inesperado, ya que cuanto mayor sea esta diferencia de temperatura tanto mayor sería la condensación del vapor sobre las cubiertas y se esperaría una mayor producción de destilado. Estos resultados se confirman si se analizan los coeficientes de correlación entre DPT y las temperaturas medias del agua y el ambiente, y la diferencia Tagua-Tamb. (Tabla IV)



**Figura 10. Tendencia decreciente del destilado promedio horario total con la diferencia de temperatura Tagua-Tamb.**

	Tamb	Tagua	Tagua-Tamb
calentamiento	0,686	0,272	-0,975
enfriamiento	0,798	0,423	-0,999

**Tabla IV. Coeficientes de correlación entre el destilado promedio horario total Y las temperaturas ambiente, agua y Tagua-Tamb.**

## CONCLUSIONES

Las medidas realizadas con calentamiento similar al solar sobre el destilador con pendiente de 20° en las cubiertas muestran que tanto el destilado promedio horario total (DPT) como el destilado total diario (DTD) son mayores para el caso de 45° en los valores promediados sobre todas las series de medidas.

El DPT durante el enfriamiento es mayor que en el calentamiento en las dos configuraciones geométricas ensayadas.

Para una dada geometría, el destilado medio horario (DPT) es mayor durante el enfriamiento que durante el calentamiento, siendo la diferencia más importante en los últimos días de cada serie, poniendo en evidencia que la historia previa de funcionamiento del destilador condiciona su producción.

Se observa que la producción media de enfriamiento es mayor que la de calentamiento, en porcentajes que pueden variar mucho: entre el 2.9 y el 60.5% para 45° y entre 14.6 y 89.9% para 20°, mostrando una tendencia levemente creciente con Tamb.

La dependencia del DPT y el DTD con la diferencia entre Tagua y Tambiente muestra una tendencia decreciente, resultado a priori inesperado, ya que se esperaría una mayor condensación del vapor sobre las cubiertas al aumentar esta diferencia y sería mayor la producción de destilado. Los coeficientes de correlación entre DPT y las temperaturas medias del agua y el ambiente, y la diferencia Tagua-Tamb confirman estos resultados.

Si bien la frecuencia de calentamiento solar en un dispositivo colocado al aire libre no se puede controlar, la información obtenida puede servir al momento de programar el funcionamiento de un destilador calentado artificialmente, ya sea en una sola etapa o en multietapas, haciendo uso de los efectos de memoria en la producción cíclica de un destilador.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Boccaletti, S., Gluckman, B. J., Kurths, J., Pecora, L. M., Meucci, R., Yordanov, O. Ed. (2004). Experimental Chaos. 8<sup>th</sup>. Experimental Chaos Conference - Italy, 2004. American Institute of Physics Conference Proceedings Vol 742. Melville, New York.
- Brittingham, R.A., Mladin, E.C., Zumbrennen, D.A. (1995). Heat transfer transients in stagnation flows due to changes in flow velocity. Journal of Thermophysics and heat transfer, 10, 1, 186-189,
- Burmeister, L. C. (1983). Convective heat transfer. J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.

- Chikhaoui, A. Marcillat, 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.
- 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. (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. (2002). A new model of a basin-type solar still. *Journal of Solar Energy Engineering*. **Vol. 124**, 3, pp: 311-314. ISSN 0199-6231
- De Paul, J. M. Quintana. (2002). 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. ISSN. 0329-5184.
- De Paul, J. M. Quintana. (2004). Peculiaridades del funcionamiento no estacionario de un destilador solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **Vol. 8**, versión CD, pp.03.01-03.06. ISSN. 0329-5184.
- De Paul, I., Perales, M. A., Ramos, I., Quintana, J., González C., Gündel, S., Ramos, B. (2006). “Características caóticas del funcionamiento de un destilador” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **Vol. 10**, versión CD, pp.03.07-03.13. ISSN. 0329-5184.
- Del Campo, E. M., Sen, M., Ramos, E. (1988). Analysis of laminar natural convection in a triangle enclosure. *Numerical Heat Transfer*, **13**, pp: 353-372.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley and Sons.
- 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.
- Mac Adams, W. H. (1978). *Transmisión de calor*, 3ª Edición. Mc Graw Hill. México.
- Manneville, P. (2004). *Instabilités, chaos et turbulence*. Editions de l'École Polytechnique. Francia.
- Sayigh, A. A. M. (1977). *Solar Energy Engineering*, Academic Press.
- Vadasz, P. (2000) Subcritical transitions to chaos and hysteresis in a fluid layer heated from below. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 5, pp:705-724.
- Vasseur, P., Robillard, L., Sen, M. (1987). 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.
- Zumbrunnen, D.A., Aziz, M. (1993). Convective heat transfer enhancement due to intermittency in an impinging jet. *Journal of Heat Transfer*, **115**, 91-98,

**ABSTRACT.** With the aim of optimizing the distillate production essays were performed on a laboratory still with 20° inclination of the covers, under conditions similar to clear day solar heating. The results were compared with those obtained previously with a 45° slope in the covers. It was observed that the hourly mean distillate as well as the total daily distillate were higher in the case of higher slope and that the still production depends on the history of the functioning of the still, showing an hysteresis effect. The stational influence was analyzed.

**Keywords:** Distillation, optimization of production, hysteresis effect.