

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN DESTILADORES CON DISTINTAS PENDIENTES, MEDIDAS DE CAMPO

Esteban S., Vilte M., De Paul I., Hoyos E.

INENCO

Facultad de Ciencias Exactas- Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177- (4400) Salta-Tel: 0387-4255389.

e-mail: depaul@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan las medidas térmicas y de producción realizadas sobre dos destiladores, cuyas dimensiones de batea y condiciones de aislamiento son idénticas, pero difieren en pendiente de la cubierta, uno de 4° y otro de 22°. Se realiza un análisis para explicar las diferencias de producción y el comportamiento térmico de ambos sistemas. Dicho análisis se realiza para investigar la influencia que ejercen las distintas geometrías, tanto en los procesos de condensación y evaporación, así como en la transferencia de la radiación recibida por ambos destiladores. También se presenta un ajuste óptimo para los valores de producción horario nocturno y diurno que puede ser usado cuando sólo se cuenta con los valores acumulados del destilado en parte de la jornada diaria

**PALABRAS CLAVES:** destilado horario, temperatura de agua, pendiente, producción, destilación

### INTRODUCCIÓN

Con el fin de analizar la influencia de la pendiente en la productividad de un destilador se realizaron una serie de experiencias de laboratorio y de campo. En un trabajo anterior se presentaron los primeros resultados obtenidos en condiciones de funcionamiento real (experiencia de campo), en días claros; estas experiencias mostraron que existen diferencias tanto en el comportamiento térmico como en la producción (Franco y otros, 2000).

Las condiciones meteorológicas no permitieron tener un número suficientemente grande de medidas como para tener resultados concluyentes, que permitieran comparar los resultados obtenidos en experiencias de campo con los obtenidos en experiencias de laboratorio realizadas tanto en estado estacionario (De Paul, 2000) como en condiciones de calentamiento diurno-enfriamiento nocturno (De Paul, 1998,1999).

Por esta razón se decidió realizar experiencias de campo en secuencias de varios días, independientemente de las condiciones climáticas, asegurando solamente que ambos destiladores se encontraban al comienzo del día en las mismas condiciones, es decir, con la misma cantidad de agua a destilar, y que eran sometidos a las mismas condiciones meteorológicas externas y de calentamiento solar. En este trabajo se comparan las temperaturas de agua, de cubierta y ambiente de los destiladores como también su producción horaria, durante 10 días.

### DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

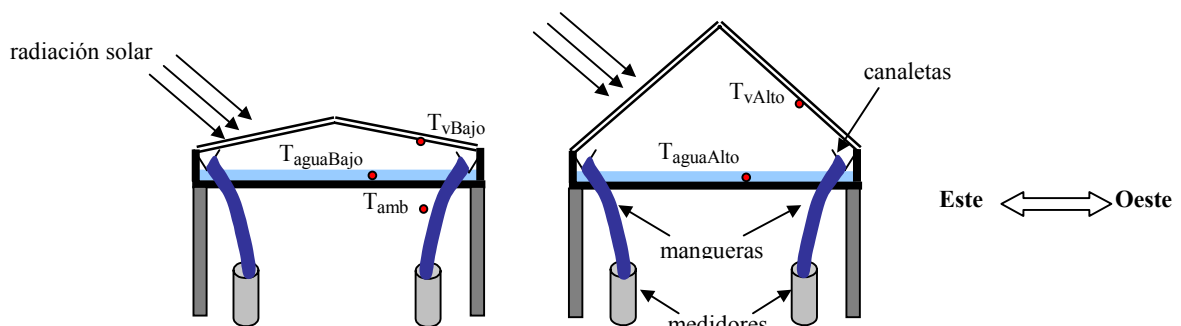


Figura 1. Vista de frente de los destiladores ensayados

La batea de ambos destiladores tiene las siguientes dimensiones: 1m x1,93m x0,1m. La base de la misma posee un aislamiento de poliestireno expandido con una densidad de 25 kg/m<sup>3</sup>, de 3cm de espesor y una capa de poliuretano. La carga de 50 litros en ambos destiladores es mantenida constante, mediante la reposición diaria del destilado total producido el día

anterior. En la figura 1 se esquematiza la ubicación de los destiladores, los sensores de temperatura y los medidores de producción.

Para mejorar el aprovechamiento de la radiación solar se ubicaron los destiladores en la terraza del edificio de física. Por otro lado se optimizó la precisión de los medidores de producción, también a fin de evitar la evaporación del destilado entre las canaletas y los medidores se conectaron mangueras.

## MEDIDAS REALIZADAS

Se realizaron medidas de temperaturas de agua, de vidrio y ambiente para ambos destiladores, cada 15 minutos durante 10 días. Los sensores utilizados son termocuplas tipo K, conectadas a un sistema de adquisición de datos Omega de 6 canales. Se midió en forma manual la producción diaria cada hora, en tanto que en la primera lectura de la mañana se tomó la producción nocturna acumulada. Los medidores utilizados para producción son probetas graduadas de 1lt, 100 ml y 10 ml, con una apreciación de 10 ml, 1ml y 0,1ml, respectivamente.

Los ensayos realizados corresponden a una secuencia de 10 días, en la cual se tuvieron dos días parcialmente nublado y el resto totalmente despejados con vientos moderados, con temperatura ambiente diurna promedio alrededor de 19 °C. La salida del sol se produce alrededor de las 8:30 hs mientras que la puesta del sol a horas 18:30 hs.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### 1. MEDIDAS DE TEMPERATURAS: CONTENIDO DE AGUA

En la figura 2 se puede ver la evolución temporal de la temperatura de agua de los dos destiladores. En la misma se observa que se dan diferencias apreciables en ambos destiladores alrededor de los valores máximos donde la temperatura de agua del destilador bajo es superior a la del alto. Es de destacar también que a primeras horas de la mañana esta situación se invierte, llegando a ser superior la temperatura del destilador alto. Esta diferencia puede explicarse si se tiene en cuenta que antes de la salida del sol (8:30 hs) se forma sobre la cubierta de ambos destiladores una película de escarcha que se mantiene por algunas horas. Esta película disminuye el ingreso de la radiación solar incidente condición que se mantiene mayor tiempo en el destilador bajo, ya que en la cubierta del destilador alto el escurrimiento de la misma es más rápido por tener mayor pendiente.

A partir de las 12:00 hs ambas cubiertas de vidrio están limpias y presentan las mismas condiciones; comenzando el destilador bajo a levantar levemente su temperatura de agua por encima del alto, produciendo un destilado mayor, esta situación continúa hasta que se aproximan al máximo, en esta zona la diferencia es muy apreciable. Esta diferencia de temperatura de agua a favor del destilador bajo es notable pero llama la atención. Como se sabe el empuje convectivo en interior de los destiladores depende de la altura entre la superficie del agua y la cubierta, por lo que en el destilador alto es mayor que el en bajo. Esto provoca que la presión de vapor disminuya en la superficie del agua favoreciendo al proceso de evaporación. El vapor que asciende hacia la cubierta se lleva calor de cambio de fase contribuyendo a bajar la temperatura de agua en el destilador de mayor pendiente.

Queda la incógnita de porqué siendo el empuje convectivo mayor en el destilador alto su producción es menor que la del bajo. Esto se podría explicar teniendo en cuenta la geometría de ambos sistemas. Si se realizan cálculos sencillos en mediodía solar donde la radiación directa que incide en la superficie del vidrio es  $I \cdot \cos\theta$ , siendo  $I$  la radiación solar directa y  $\theta$  la pendiente de los destiladores; se concluye que a la batea del destilador bajo llega más energía que al alto. Esto explica que la temperatura de agua en este destilador sea superior y que por consiguiente esto resulte acompañado de una producción mayor.

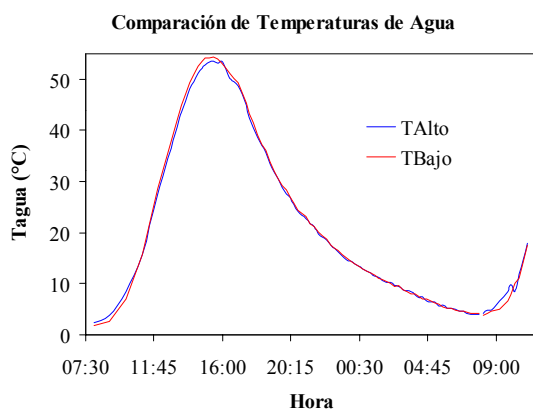


Figura 2. Temperatura de agua en función del tiempo

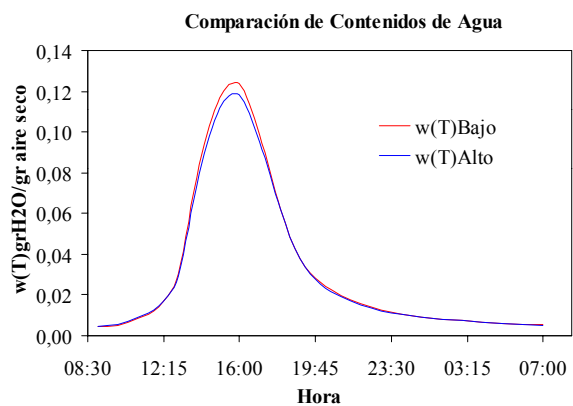


Figura 3. Contenidos de agua vs tiempo

Teniendo los valores de temperatura de agua y de cubierta se calculó la temperatura de vapor como el promedio entre ambas y contenido de vapor  $w(T)$  en el interior de los destiladores, como se propone en trabajos anteriores (De Paul, 2000). La

figura 3 muestra la variación de  $w(T)$  con el tiempo. Se puede visualizar que este evoluciona en forma pareja durante la mayor parte del día, presentando diferencias notables alrededor de las 16:00 hs, cuando alcanzan sus máximos valores. Podemos afirmar así que en el destilador bajo el contenido de vapor es mayor que en el alto.

## 2. PRODUCCIÓN TOTAL DIARIA Y HORARIA

Las figuras 4 y 5 muestran la producción total diurna y nocturna de los dos destiladores para todos días medidos, las cuales revelan que en todos los casos el destilador de menor pendiente alcanza una producción mayor. Esta diferencia es superior durante el día e inferior en las noches. El destilador bajo tiene una producción total diaria superior a la del destilador alto entre un 5% a 10%. Por otra parte de las gráficas también se desprende que la producción nocturna no es despreciable y representa cerca del 30% de la producción total diaria.

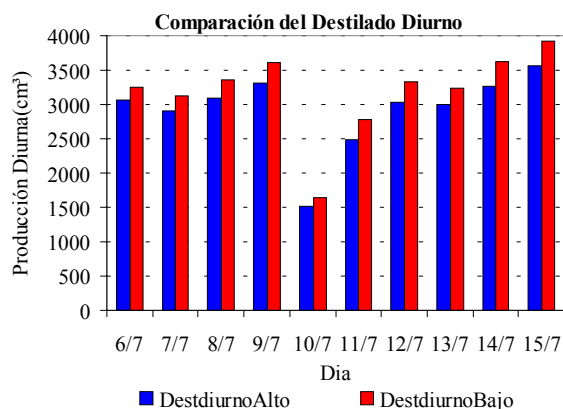


Figura 4. Producciones diurnas en ambos destiladores

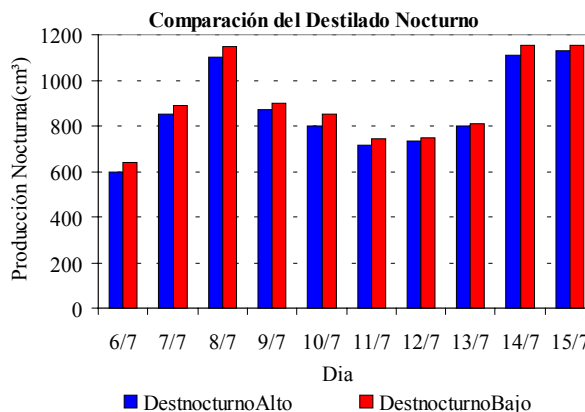


Figura 5. Producciones nocturnas en ambos destiladores

La tabla 1 muestra los valores característicos medidos o calculados para algunos de los días ensayados. Se puede observar que el destilado promedio horario (DPH) es aproximadamente de 300 cm³; este parámetro es poco significativo si consideramos la gran amplitud de valores medidos de la producción horaria lo que se puede apreciar en la figura 6. El destilado horario medido alcanza un valor máximo próximo a los 800 cm³, entre las 15 hs y 16 hs y un valor mínimo de prácticamente 10 ml, entre las 9 hs y 10 hs de la mañana, registrándose por lo tanto una gran dispersión en la producción horaria.

	Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5		Día 6	
	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo
$T_{max}(^{\circ}C)$	53,8	54,3	53,4	54,8	43,4	44,2	46,4	47,4	53,4	54,0	53,5	54,9
$T_{promedio}(^{\circ}C)$	32,9	33,5	32,5	33,1	27,9	28,5	28,0	28,0	30,1	30,4	31,0	31,5
DPH(cm³)	310	341	280	330	318	352	300	330	330	360	330	330
DTD(cm³)	3120	3330	3310	3610	3025	3335	3000	3285	3273	3626	3562	3916
DTN (cm³)	1100	1150	870	900	735	750	800	810	1110	1155	1131	1153
DT(cm³)	4220	4480	4180	4510	3760	4085	3800	4095	4383	4781	4693	5069
$W_{max}$	0,0596	0,0604	0,0592	0,0617	0,0289	0,0299	0,0367	0,0367	0,1183	0,1239	0,1202	0,1295
$W_{prom}$	0,0328	0,0336	0,0330	0,0337	0,0183	0,0187	0,0212	0,0213	0,0529	0,0548	0,0547	0,0577

Tabla 1. Parámetros característicos de los destiladores, para las distintas experiencias.

Los demás parámetros que se presentan en la tabla son: destilado total diurno (DTD), medido entre las 8:30 hs y 18:30 hs; destilado total nocturno (DTN) medido a partir de las 18:30 y hasta las 8:30 del día siguiente; destilado total (DT), calculado como la suma de DTD y DTN; contenido de vapor de agua máximo ( $W_{max}$ ) expresado en gramos de agua por gramo de aire seco, alcanzado durante la jornada diurna; contenido de agua promedio  $W_{prom}$ .  $T_{max}$  y  $T_{prom}$  corresponden a la temperatura de agua máxima y promedio alcanzada entre las 8:30 hs y 18:30 hs.

Los valores de los parámetros que se muestran en la tabla reafirman que lo discutido anteriormente acerca de las figuras 2 y 3 se cumple también para el resto de los días medidos.

La figura 6 muestra medidas muy cuidadosas realizadas entre las 7 hs de la mañana y 23 hs de la noche, en una secuencia de dos días claros. La figura muestra una distribución asimétrica con valores que crecen rápidamente a partir de las 11 hs y decrecen lentamente después de la 16 hs. En esta figura también se observa que durante las primeras horas de la mañana la producción del destilador alto es mayor que la del bajo, esto está de acuerdo con el hecho de que en dicho intervalo la temperatura de agua en este destilador es mayor, por lo discutido anteriormente. Durante el resto del día se puede apreciar que la producción horaria siempre es mayor en el destilador bajo.

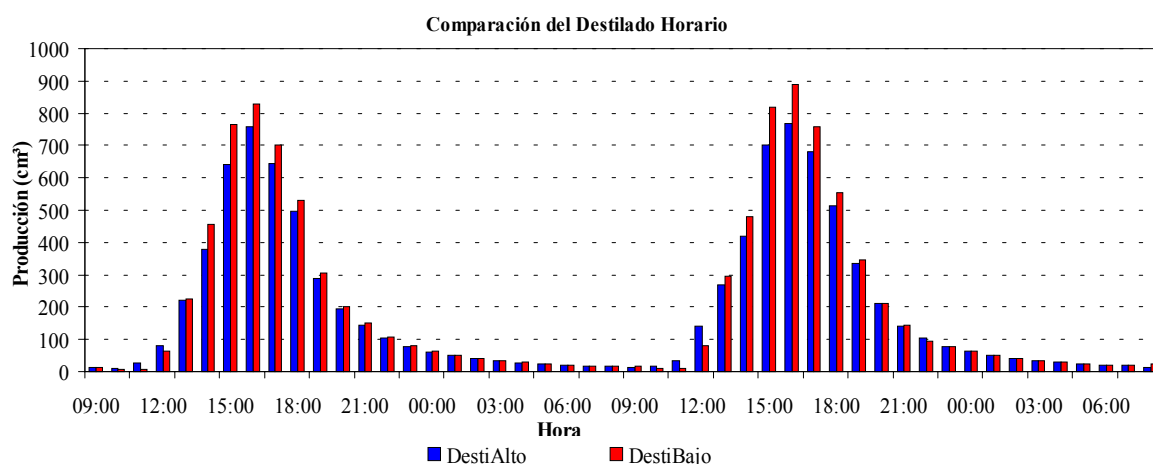


Figura 6. Producción horaria de los destiladores ensayados

### 3. APROXIMACIÓN PARA EL DESTILADO HORARIO

Como en algunos días se dispone de parte de las medidas horarias nocturnas (de 19 hs a 23 hs) y se cuenta con el total acumulado (de 24 hs a 8 hs) medido a primera hora de la mañana, se buscó realizar un ajuste analítico que permitiera reproducir los valores de producción horaria en este último período. Empleando para éste los valores de producción medidos durante el enfriamiento diurno y los primeros de la mañana e interpolando la producción horaria nocturna de manera tal que la producción total acumulada coincidiera con los valores medidos. Además, se tuvo en cuenta que el destilado horario nocturno no llega a ser nulo, que alcanza su valor mínimo a las primeras horas de la mañana y que la disminución del destilado horario diurno y nocturno se produce de forma lenta y continua. Con estos requisitos se ha llegado a que la curva que mejor ajusta las medidas experimentales es una distribución estadística: Lorentziana, figura 8, cuya expresión es:

$$F_{Lorentz}(x) = \frac{2 \cdot A}{\pi} \cdot \frac{w}{w^2 + 4 \cdot (x - x_c)^2} \quad (1)$$

donde A es el área de la curva, w es el ancho a la mitad de máximo, y  $x_c$  es el centro de la distribución.

Como en algunas experiencias entre las 8:00 hs y 12:00 hs, sólo se ha registrado el valor acumulado del destilado y no la producción horaria, es necesario nuevamente encontrar una curva de ajuste a partir de valores medidos. En este caso se tiene en cuenta que el aumento de la producción a partir de las 11:00 hs es rápido, de modo que la curva que mejor ajusta la producción horaria de la mañana es la distribución estadística Gaussiana, figura 8, dada por:

$$F_{gauss}(x) = \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-2(x-x_c)^2/w^2} \quad (2)$$

donde nuevamente, donde A es el área de la curva, w es el ancho a la mitad de máximo, y  $x_c$  es el centro de la distribución.

En este último caso se dispone del valor de destilado acumulado entre las 8 y las 12 hs, rango en el que se sabe por mediciones realizadas en otras jornadas que el destilado horario alcanza un mínimo. Se recurrió entonces a los datos de estas jornadas para las que además de tener registradas las medidas de temperaturas se cuenta con los valores de destilado horario en todo el rango mencionado. Con estos valores de producción horaria y de temperatura de agua, se calcula un ajuste con un polinomio de orden 4, figura 7, y se estima el destilado horario mínimo para los días en que sólo se cuenta con valores acumulados. Con este valor estimado y los demás valores experimentales obtenidos durante el día se obtiene un ajuste preciso de los valores del destilado horario en el rango mencionado.

Se utiliza la temperatura de agua en el ajuste, ya que se sabe por trabajos anteriores (De Paul, 2000) que ésta es una de las variables principales de la cual depende la producción horaria. Cabe aclarar que el destilado horario en función de la temperatura de agua también puede ser ajustado a través de una función exponencial como se menciona en el trabajo citado, pero en nuestro caso el polinomio de orden 4 da un ajuste más preciso.

La figura 8 muestra tanto los valores experimentales como los obtenidos mediante el ajuste propuesto en los rangos horarios mencionados anteriormente para ambos destiladores.

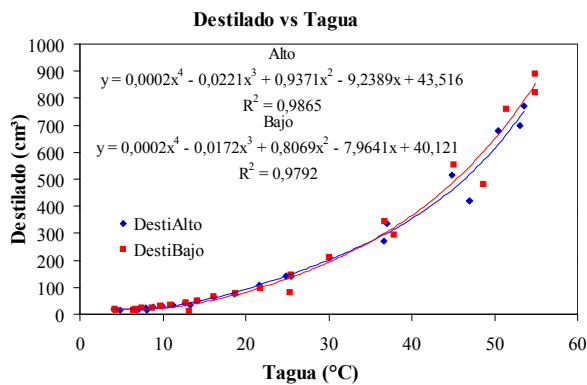


Figura 7. Destilado horario vs Tagua

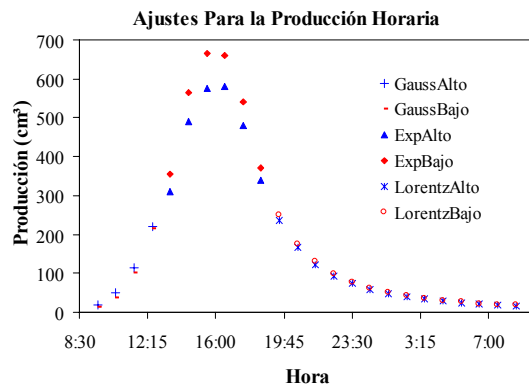


Figura 8. Ajuste para la producción horaria

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran la complejidad de la interacción de los destiladores con el medio y por ende de los procesos físicos involucrados en la producción. Por lo tanto, una comprensión más profunda de estos procesos permitirá establecer en qué medida los fenómenos mencionados determinan el comportamiento de ambos sistemas. En base a los resultados obtenidos podemos afirmar que:

- El destilador más bajo produce de un 5 % a un 10 % más que el más alto. Esto se puede explicar porque, a pesar de estar en las mismas condiciones externas, el bajo recibe más energía del sol porque la pendiente de la cubierta permite interceptar una fracción de radiación solar mayor y por lo tanto el agua de la batea se calienta más.
- Se obtuvieron expresiones analíticas que ajustan la producción horaria tanto en la etapa de calentamiento diurno como en la de enfriamiento nocturno, que permite interpolar valores horarios cuando sólo se dispone de medidas de producción acumulada en períodos de varias horas.
- En nuestros ensayos, la producción horaria nocturna, nunca llega a ser nula para la masa total de agua a destilar. Por otro lado la producción total nocturna es importante, representando el 30% de la producción total diaria.

## BIBLIOGRAFÍA

- De Paul, I. (2000). Contenido de agua y productividad de un destilador tipo batea a alta temperatura.. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 4, 1, pp: 03.21 – 03.25.
- Franco, et al (2000). Producción y comportamiento térmico en destiladores de batea con distintas pendientes en la cubierta. Primeros resultados. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 4, 1, pp: 03.65 – 03.70.
- 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.

**ABSTRACT:** In this work thermal and production measurements carried out on two distillers whose basin dimensions and isolation conditions are identical, but with different slope in the covers, are presented. An analysis to explain the production differences and the thermal behavior of both systems is carried out. This analysis is performed for exploring the influence of the different geometries on the condensation processes and evaporation, as well as in the transfer of the radiation received by both distillers. A good analytical expression is presented that allows the interpolation of hourly measurements when only accumulated values are available during nocturnal and diurnal measurements.