

# MOVIMIENTO CONVECTIVO DEL AIRE HUMEDO EN UN DESTILADOR SOLAR PASIVO

Irene De Paul y Luis Saravia<sup>1</sup>  
INENCO<sup>2</sup>

Universidad Nacional de Salta  
calle Buenos Aires 177  
4400, Salta, Argentina  
Tel. 87-255423, Fax 87-255389  
E-mail depaul@ciunsa.edu.ar

## RESUMEN

El funcionamiento de distintos tipos de destiladores solares pasivos, ya sea de una etapa o multietapa, se basan en el transporte del vapor de agua desde la superficie de evaporación a la de condensación mediante el movimiento por convección natural de aire saturado de vapor. El cálculo teórico de la productividad de estos destiladores suele basarse en la evaluación del intercambio térmico mediante el uso de parámetros concentrados, como ocurre, por ej., en el trabajo original de Dunkle (1961). Ello no permite explicar las variaciones de productividad ante distintos tipos de geometrías y condiciones externas. Un estudio más detallado requiere la determinación más cuidadosa del movimiento convectivo del aire en el destilador y su variación con los distintos parámetros.

En este trabajo se evalúan distintos métodos experimentales para determinar el movimiento convectivo del aire en los destiladores, a saber: el uso de un haz laser de alta intensidad para determinar el movimiento del vapor de agua a escala real; el uso de modelos a escala pequeña que trabajan con agua en vez de aire y usan un haz laser disperso en un plano vertical para apreciar el movimiento convectivo; finalmente la utilización de técnicas termográficas para apreciar las variaciones de temperatura en el aire dentro del destilador.

Dichas técnicas se aplican al caso de un destilador tipo batea con cubierta de vidrio doblemente inclinada. Se aprecia que la convección del aire húmedo es de tipo turbulento y se ve afectada por el calentamiento de las paredes laterales, cuya altura incidirá en la productividad global del destilador.

## INTRODUCCION

El transporte de calor y masa en los distintos tipos de destiladores solares, ya sea de un efecto o multiefecto se produce en tres etapas: la evaporación del agua desde el recipiente a mayor temperatura, el movimiento convectivo del aire transportando vapor de agua y la condensación del vapor en la superficie a menor temperatura. Es el movimiento convectivo quien opone la mayor resistencia y define la cantidad de agua que se condensa, por lo que resulta importante estudiar con detalle el mismo y su dependencia de la geometría del destilador.

El cálculo teórico de la productividad de estos destiladores suele basarse en la evaluación del intercambio térmico mediante el uso de parámetros concentrados, como ocurre, por ej., en el trabajo original de Dunkle (1) y de Cooper (2). Ello no permite explicar las variaciones de productividad ante distintos tipos de geometrías y condiciones externas. Un estudio más detallado requiere la determinación más cuidadosa del movimiento convectivo del aire en el destilador y su variación con los distintos parámetros geométricos y formas de calentamiento.

Por otro lado, existen diferencias significativas en la bibliografía (5, 6) en cuanto a la productividad medida en sistemas de tipo similar, por ej. los destiladores de batea, y se ha discutido la razón de las mismas sin llegar a definir la situación, por lo que resulta de interés determinar hasta que punto influye el movimiento convectivo del aire y los cambios producidos en los mismos por variación de la geometría.

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

<sup>2</sup> Instituto UNSa-CONICET

La determinación experimental del movimiento convectivo del aire húmedo dentro de una cavidad calentada no es un problema sencillo y en este trabajo se evalúan las ventajas y problemas de tres posibles técnicas que pueden dar informaciones complementarias. Ellas son :

- a) la observación directa del movimiento convectivo del aire húmedo en un destilador a escala natural usando iluminación con un haz láser de potencia distribuido en un plano.
- b) la observación del movimiento convectivo en modelos a escala reducida que utilizan agua como fluido convectivo y donde se colocan microesferas de vidrio huecas para detectar el movimiento(3).
- c) La determinación de la distribución de temperaturas en las paredes del destilador mediante métodos termográficos y el análisis de las temperaturas del aire con los mismos métodos usando grillas de hilos de plástico suspendidas en el aire(4).

Las técnicas discutidas son ejemplificadas con el estudio del movimiento convectivo dentro de un destilador de batea con cubierta de vidrio doblemente inclinada.

### **OBSERVACION DEL DESTILADOR A ESCALA NATURAL**

La mayoría de los destiladores solares pasivos tienen dimensiones en corte que permiten la instalación de una sección longitudinal de los mismos en laboratorio para su observación experimental por métodos ópticos. Su calentamiento puede ser eléctrico o eventualmente se usan lámparas de simulación solar.

Se trata de observar el movimiento convectivo por observación de partículas trazadoras que son iluminadas con un haz láser que es dispersado en un plano mediante una lente cilíndrica. El plano vertical de luz puede entrar lateralmente a través de la cubierta transparente del destilador y se dispone de una ventana de observación directa en una de las paredes laterales verticales.

La observación se ve facilitada por el uso de un láser de media potencia, que requieren menos exigencias de las partículas trazadoras. En este caso se dispone de un laser de argón con 3 vatios en la línea verde (0.514 micrones) marca Innova 90.

Las observaciones iniciales han mostrado que las evoluciones del aire húmedo pueden ser apreciadas directamente sin ningún trazador con este nivel de iluminación, debido a que se aprecian claramente las inhomogeneidades producidas por el vapor de agua que se está desprendiendo de la superficie caliente del agua. Las mismas pueden ser registradas para su estudio detallado. El uso de una cámara de video que detecte niveles de iluminación de algunos lux es de gran ayuda para esta tarea ya que el movimiento es rápido y complicado.

En el caso del destilador de batea se ha usado un equipo de 52 cm de ancho, una altura en la cumbre de 22.5 cm y paredes laterales con una altura de 7 cm. Un termóstato externo calienta el agua manteniendo constante la temperatura a un valor prefijado. Su bomba la recircula a través de la batea volviendo por gravedad al depósito del destilador. Con una temperatura de agua cercana a los 50 C, la cubierta logra mantenerse a unos 6 C menos usando ventilación natural y no empleando ningún flujo de aire forzado sobre los vidrios. Este salto produce un franco movimiento turbulento en la cámara, donde se observa el desprendimiento de plumas de vapor de agua inestables desde la superficie de agua. En el aire se aprecian dos mecanismos de transferencia térmica en competencia: el calentamiento desde el piso que induce un flujo descendente a lo largo del techo y el calentamiento de las paredes laterales que induce un flujo ascendente, lo que se ilustra en la Fig. 1. Por un lado se aprecia una corriente de aire que sube en el centro, debajo de la cumbre y al llegar arriba se desliza hacia abajo a lo largo del vidrio. Por otro lado se ve una corriente de aire que sube por la pared lateral y luego tiende a ascender pegada al vidrio de la cubierta. Las dos corrientes se encuentran en un punto ubicado más cerca de la pared que de la cumbre dando lugar a una corriente descendente de aire húmedo.

Este fenómeno dará lugar a una productividad de agua condensada que dependerá de la relación que existe entre la altura de la cúspide y la de la pared lateral. Un aumento de esta última incrementará la corriente lateral ascendente en detrimento de la corriente central. Este proceso no está contemplado en las

estimaciones teóricas que usan parámetros concentrados por lo que será de interés estudiar el proceso con distintas alturas para cuantificar su efecto. En la referencia (6) se informa de un trabajo experimental en el que se ha detectado la variación de productividad con la altura de la pared lateral, aunque el autor atribuye el efecto a la acción de sombras laterales. La metodología propuesta en este trabajo permitirá dilucidar cual es el efecto predominante.

La formación de gotas en los vidrios por donde entra el haz molesta en la observación al difundir la luz fuera del plano de observación. Sería conveniente someter al vidrio a una limpieza especial de manera que el agua no forme gotas sino que se deslice en una capa uniforme. Esto se logra en algunos destiladores que se han empleado en Baja California Sur, y sería importante adaptar su uso a esta técnica experimental.

## **OBSERVACIÓN EN MODELOS A ESCALA REDUCIDA**

Esta técnica está siendo usada para el estudio del movimiento de aire dentro de locales (3). La reducción de tamaño conserva el número más importante del fenómeno, el de Rayleigh, cambiando el fluido, de aire a agua, y adaptando el salto térmico. La reducción de tamaño permite construir diferentes modelos con más sencillez y simplifica la observación.

El movimiento del agua es observado con trazadores. Las microesferas de vidrio huecas, con densidades cercanas a las del agua resultan ser trazadores de particular interés, ya que se mantienen flotando en el agua y reflejan muy bien el haz de iluminación. Como fuente también se ha usado el láser de argón ya nombrado y un láser de He-Ne de 10 mW. Las partículas pueden ser seguidas en su movimiento con una cámara de video, por lo que se puede determinar su velocidad y trazar campos vectoriales.

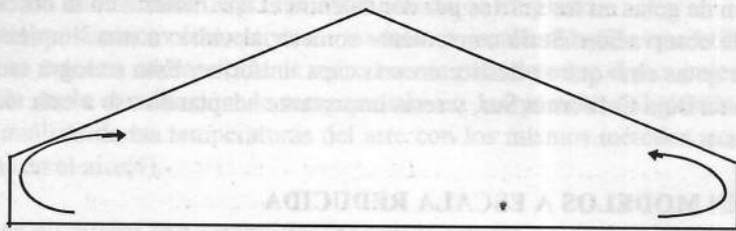
En el caso del destilador el modelo a escala se ha construido en acrílico con una reducción de 3 a 1 y tiene un ancho de 16 cm. Se calienta por debajo con una resistencia eléctrica cuya corriente se ajusta para obtener la temperatura necesaria. La observación directa del modelo muestra una muy buena visibilidad de las partículas. El movimiento global del agua es similar al del aire en el prototipo a escala natural aunque menos turbulento. Se observan las dos corrientes ascendentes en oposición y la formación de una corriente descendente en una región intermedia entre la cumbre y la pared lateral. En general las velocidades son menores y pueden ser observadas con más facilidad.

El hecho de que las dimensiones del prototipo a escala natural permita su observación con técnicas similares a la de los modelos da lugar a que los resultados obtenibles en los mismos sean directamente verificables y permitan determinar hasta que punto influye el hecho de que no todos los números adimensionados pueden ser mantenidos en el cambio, como ser, por ej., el caso del número de Prandtl. Esto era muy difícil de llevar a cabo en el caso de locales, por las dimensiones de éstos.

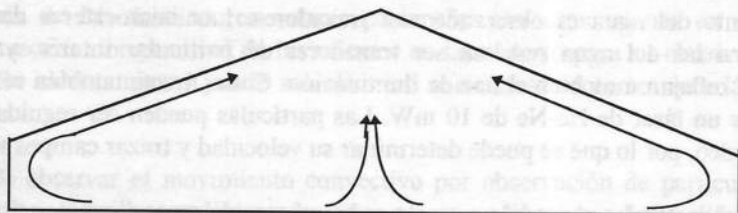
## **OBSERVACIÓN CON TERMÓGRAFO**

Este método de observación es complementario ya que determina la distribución de temperaturas y no los flujos del fluido. Se está implementando con una cámara termográfica Inframetrics 600 con un detector que trabaja en la zona de 12 a 14 micrones. Con ese fin el detector es enfriado a la temperatura de nitrógeno líquido utilizando un pequeño compresor que trabaja con un ciclo Stirling basado en el uso de helio. La salida de la cámara es observada en un monitor color de 5 pulgadas y puede ser grabada en una videograbadora o en una computadora. La cámara tiene una apreciación de hasta 0.1 C y un rango variable que puede llegar hasta 5 C como mínimo.

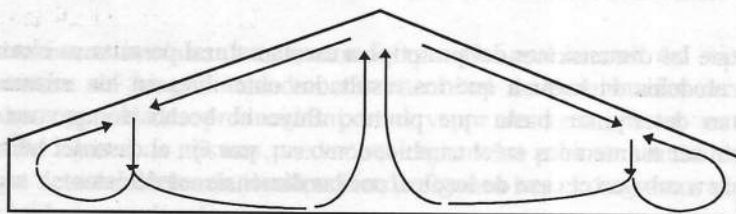
La temperatura del aire no puede ser medida directamente por su falta de emisión en el infrarrojo, pero se puede detectar indirectamente colocando una superficie sólida cuya temperatura será modificada por el aire que la lame. Una primer superficie natural son los vidrios del destilador, que se pueden observar desde fuera o desde el interior a través de una ventana pequeña. Debido a la masa del vidrio, las medidas externas solo dan un resultado promedio. Por otra parte, las mismas se ven perturbadas por la influencia de los objetos próximos que producen una imagen térmica al reflejarse en los vidrios. En cambio las internas muestran las variaciones debidas a la interacción con el aire.



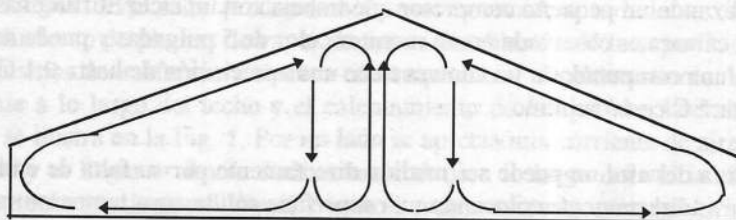
Al comienzo el calentamiento desde las paredes es el que inicia el movimiento convectivo.



Predomina el calentamiento desde las paredes produciendo un flujo ascendente sobre el techo. Comienza a formarse una pluma ascendente central.



Predomina el calentamiento desde el piso. La pluma central induce un flujo descendente sobre el techo que cierra las celdas convectivas en la proximidades de las paredes.



Nuevamente predomina el calentamiento desde las paredes. Las celdas convectivas se cierran en la zona central, con flujo ascendente sobre el techo. Este comportamiento global se repite.

En el caso del destilador en ensayo, la medida externa muestra una distribución de temperatura que está fuertemente influenciada por las pérdidas en los bordes. Para una temperatura del agua termostatzada de 57 C se observa una temperatura promedio a lo largo de la cúpide de 46.2 C y la zona central del vidrio a una temperatura de 45.7 C. En los bordes las temperaturas varían entre 39.8 y 42.5 C.

Cuando se enfoca el termógrafo hacia la superficie interior del techo, si bien la observación se dificulta porque sólo puede realizarse desde una única dirección, se alcanza a apreciar el pasaje de ondas de calor, posiblemente asociadas al movimiento convectivo del vapor de agua.

Se puede intentar medir la temperatura del aire en el interior de la cavidad colocando una superficie en el interior hecha de un material de baja conductividad térmica, por ej., un plástico. Otros trabajos (3) muestran que las superficies planas dan lugar a variaciones grandes, de varios grados, entre la temperatura de la superficie y la del aire que la lame. En cambio, si se colocan hilos de pequeño diámetro colgados paralelamente, es decir una malla, se logra reproducir con mucho más fidelidad la temperatura del aire en contacto con el hilo y ver la distribución de temperaturas en la zona donde está la malla. Las medidas que figuran en literatura usando este procedimiento (3) han sido hechas en un ambiente con temperatura casi constante en el entorno. Ello facilita la observación de la malla ya que la radiación recibida desde las paredes a través de la malla es uniforme y no disfraza las variaciones producidas por el aire. La situación es distinta dentro del destilador, donde la estructura de temperaturas no es homogénea y se superpone con la observación de la malla haciendo difícil la interpretación. Se ha encontrado que es más conveniente la colocación de la malla al sesgo, de manera que la cámara vea los hilos pero no le llegue radiación a través del espacio no cubierto por los hilos.

## CONCLUSIONES

En función de las experiencias realizadas se puede concluir lo siguiente:

1) La disponibilidad de un laser de mediana potencia abre todo un campo experimental de amplias perspectivas

a) Ahora es posible encarar la observación directa del movimiento del vapor de agua sin necesidad de ningún tipo de trazador.

A título de ejemplo, en el destilador clásico de batea se ha podido apreciar inmediatamente una estructura turbulenta en la que compiten dos mecanismos de transferencia térmica al aire: el calentamiento desde el piso y desde las paredes laterales. Los modelos de simulación disponibles no tienen en cuenta estas características y se requerirá recoger esta información experimental con más detalle a fin de ajustar adecuadamente los modelos de producción de un destilador. Esto implica abandonar los modelos clásicos de parámetros concentrados en favor de una modelización que tenga en cuenta los detalles relacionados con la circulación real del aire húmedo.

b) Los modelos a escala reducida pueden ser observados con mucho más detalle que lo que era posible con el laser de He-Ne.

La posibilidad de observar tanto el modelo a escala reducida como el prototipo real permitirá poner a punto la extrapolación a escala real de los datos obtenidos con los modelos. El uso de estos tiene la ventaja potencial de permitir el ensayo de diversas configuraciones geométricas con un mínimo de esfuerzo.

En el caso del destilador de batea se ha podido apreciar que el modelo muestra el mismo patrón de circulación que el prototipo real, aunque las velocidades involucradas fuesen distintas.

2) La disponibilidad de un termógrafo de alta resolución permite obtener datos complementarios, es decir distribuciones de temperaturas. Resulta muy sencillo determinar las distribuciones sobre las superficies adyacentes a la cavidad. La determinación de la distribución en el aire es más difícil ya que es necesario utilizar un elemento intermedio, en principio una malla plástica, la que se ve influida por la emisión radiante de las paredes. Este problema se encuentra en estudio.

## REFERENCIAS

1.- 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

2.- Cooper, P. I., Digital simulation of experimental solar still data, *Solar Energy*, **14**, 451, 1973.

3.- De Paul, I., Vilde, M. y Lesino, G., Modelo de circulación de aire en locales cerrados, *Actas de la 16ta. Reunión de Trabajo de la ASADES*, Vol. 1, pp.209, 1993.

4.- Hassani, V. A. y Stetz, M., Application of infrared thermography to room air temperature measurements, *ASHRAE Transactions*, pp. 1238, 1994.

5.- Clark, J. A., The Steady-State Performance of a Solar still, *Solar Energy*, vol **44**, No. **1**, 43-49, 1990.

6.- Hawlander, M.N.A. y Ng, K.C., An experimental study of solar stills. *Int. Symposium on Thermal Applications of Solar Energy*. Hakone, Japon, 1985.



CONCLUSIONES

En función de las experiencias realizadas se puede concluir lo siguiente:

1) La disponibilidad de energía solar térmica es suficiente para producir vapor de agua en cualquier momento del día.

2) Al estar el agua en movimiento dentro del recipiente el vapor de agua se condensa en la parte superior de la cubierta, en el lado que recibe mayor radiación solar.

3) La posibilidad de utilizar tanto el modo de calefacción como el modo de refrigeración en un mismo sistema es una ventaja importante.

4) Los modelos a escala reducida pueden ser operados con mucho más detalle que lo que sea posible con los modelos a escala real.

5) La posibilidad de utilizar tanto el modo de calefacción como el modo de refrigeración en un mismo sistema es una ventaja importante.

6) La posibilidad de utilizar tanto el modo de calefacción como el modo de refrigeración en un mismo sistema es una ventaja importante.

REFERENCIAS

1.- Doublet, R. V. Solar Still Design, *Water Resources Research*, Vol. 1, No. 1, 1965.