

PROPUESTA DE MODELO DE UN DESTILADOR TIPO BATEA

Irene De Paul
INENCO#
Av. Bolivia 5150 - 4400 Salta
TE: 87-255424
E-mail: depaul @ ciunsa.edu.ar

RESUMEN. Los modelos de destilador de batea empleados hasta el presente en simulación numérica no tienen en cuenta la naturaleza del medio encerrado en el recinto ni las características fluidodinámicas de la circulación en su interior. A partir de la experiencia adquirida en ensayos de visualización de flujos y medidas térmicas y de velocidad realizadas en un modelo a escala de laboratorio se propone un nuevo modelo físico para un destilador tipo batea, que contemple esas características.

Palabras claves: destilador, modelo físico, visualización de flujos.

INTRODUCCIÓN

Los modelos teóricos usuales a partir de los cuales se calcula el rendimiento de un destilador de batea no tienen en cuenta la naturaleza del medio encerrado en el recinto ni las características fluidodinámicas de la circulación en su interior (Dunkle, 1961, Cooper, 1973, Sayigh, 1977, Duffie y Beckman 1980). En trabajos previos se analizó el comportamiento tanto térmico como fluidodinámico de un destilador solar tipo batea con cubierta a dos aguas ensayado en los laboratorios del INENCO (De Paul *et al.* 1995, 1996, 1997, 1998, 1999). Los resultados mostraron que el medio encerrado en el destilador es una mezcla de aire, vapor de agua y agua condensada en forma de gotas, en movimiento turbulento, para todo el rango de temperaturas de agua ensayado. El conocimiento experimental adquirido acerca del funcionamiento del destilador permite formular un modelo físico más completo a partir del cual se pueden establecer las ecuaciones, condiciones de borde y restricciones experimentales que rigen el funcionamiento del dispositivo (De Paul, 2000). En el presente trabajo se propone un modelo físico basado en estas experiencias y el modelo matemático correspondiente que permita su simulación computacional.

MODELO FÍSICO

En la descripción del modelo físico se hará referencia a la Figura 1.

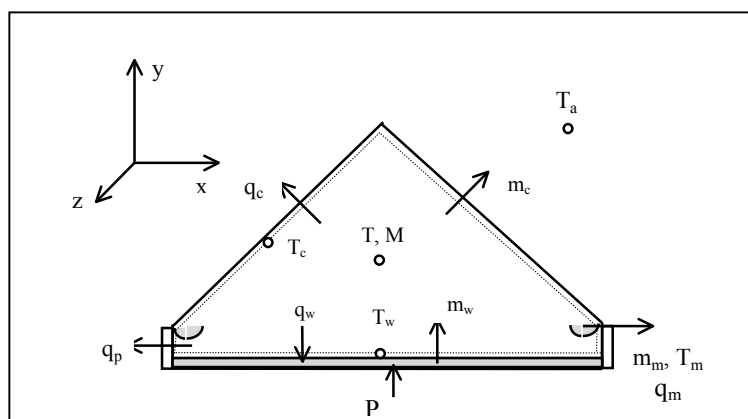


Figura 1 . Modelo físico de funcionamiento de un destilador.

Se supone el sistema funcionando en estado estacionario, en un ambiente a temperatura constante T_a , donde el agua a destilar se calienta a potencia P constante. El volumen en el cual se plantea el análisis, en línea punteada en la Figura 1, consiste en una mezcla de aire saturado y pequeñas gotas de agua condensada, de masa constante M , que permanece a temperatura promedio constante T , a presión atmosférica. Se plantea, en principio, que la mezcla encerrada en el volumen evoluciona en el tiempo, en tres dimensiones.

Si bien se supone que la masa total encerrada M permanece constante, desde la superficie en contacto con el agua ingresa por evaporación, a temperatura T_w , un caudal másico m_w , mientras que sobre las cubiertas sale por condensación, a temperatura T_c , un caudal másico m_c . En estado estacionario ambos caudales son constantes, iguales al caudal de destilado medido m_m .

Durante la evaporación el agua de la batea se enfría al perder calor de evaporación; para mantener la temperatura constante T_w se requiere suministrar una potencia de calentamiento constante P . La masa de vapor que ingresa al volumen transporta el calor de cambio de fase q_w desde la superficie del agua hacia las cubiertas de vidrio donde condensa. Sobre las cubiertas la mezcla se enfría por convección-conducción hacia el ambiente y se calienta al liberarse calor de condensación. La masa de agua condensada es evacuada a temperatura T_m y transporta un calor q_m . El movimiento de la mezcla aire-vapor está regido por las ecuaciones de la dinámica de fluidos correspondientes a un fluido incompresible, teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas de flotamiento, responsables del transporte convectivo del vapor de agua desde la superficie del agua hacia las cubiertas.

La energía irradiada desde la superficie del agua contribuye a aumentar la temperatura de la mezcla de aire y vapor de agua, y se puede calcular T como el promedio entre la temperatura del agua y la de la cubierta. La mezcla de aire y vapor de agua puede considerarse un cuerpo negro a temperatura T (Mason, 1964).

En estado estacionario, la potencia total suministrada debe ser igual a la potencia total evacuada y perdida.

$$P = Q_{ev} + Q_{per} \quad (1)$$

La potencia evacuada está asociada a la energía que lleva la masa de agua destilada producida. La potencia térmica perdida debe incluir las pérdidas convectivas, conductivas y radiativas hacia el ambiente.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales obtenidos permiten incorporar información tanto cualitativa, a partir de la visualización de flujos, como cuantitativa, a partir de las medidas realizadas. El flujo es turbulento, lo que provoca homogeneización de la temperatura en el interior del volumen. Sin embargo, se observó cierto patrón de circulación global de tipo cuasiperiódico en la experiencia. El patrón de circulación observado en el plano x - y se esquematiza en la Figura 2.

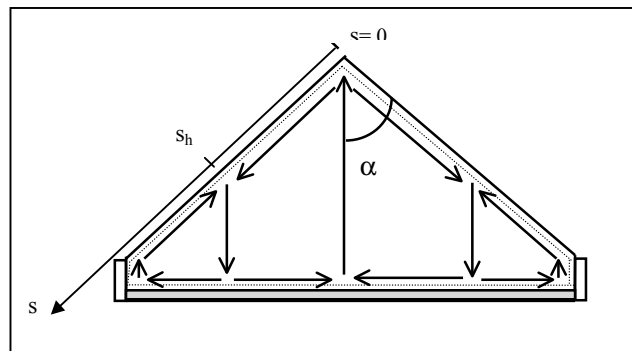


Figura 2. Patrón de circulación global en el plano x - y .

La posición del punto de hundimiento s_h a lo largo de la cubierta oscila en el tiempo con un período de 3 minutos en el caso $\alpha = 70^\circ$ y 3.75 minutos en el caso $\alpha = 45^\circ$.

Si bien en las experiencias realizadas se observó un patrón global de circulación en el plano z - y , se pudo asociar esa circulación a un calentamiento no uniforme del agua producido por una deformación de la placa de aluminio colocada sobre el piso para homogeneizar el calentamiento. En el modelo propuesto no se tendrá en cuenta este efecto; se supone que el calentamiento es uniforme, y la temperatura del agua constante en toda su superficie. Por lo tanto no se formulan hipótesis acerca del patrón de circulación global en el plano z - y .

Las experiencias fueron desarrolladas de modo tal que la temperatura del agua varió entre 30°C y 55°C . En este rango, los números de Rayleigh medidos para $\alpha = 45^\circ$ variaron entre 2.8×10^6 y 6.07×10^6 , mientras que para $\alpha = 70^\circ$ variaron entre 6.4×10^5 y 1.3×10^6 .

Dentro del rango de temperaturas ensayado los coeficientes de transferencia térmica sobre la cara interior de las cubiertas determinados experimentalmente, responden a las siguientes ecuaciones, en función de la temperatura del agua T_w .

$$H(T_w, \alpha = 45^\circ) = 7.4 T_w - 124.36 \quad \text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$H(T_w, \alpha = 70^\circ) = 1.33 T_w - 18.31 \quad \text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

La eficiencia medida, en función de la temperatura del agua, está dada por

$$\eta (T_w, \alpha = 45^\circ) = 0.0035 T_w + 0.1493 \quad (4)$$

$$\eta (T_w, \alpha = 70^\circ) = 0.0042 T_w + 0.0111 \quad (5)$$

La productividad por unidad de área de condensación, medida en $\text{cm}^3 / \text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, en función de la temperatura del agua y del ángulo α está dada por

$$p (T_w, \alpha) = 0.4978 T_w \alpha + 64.662 T_w - 14.547 \alpha - 1620.41 \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que en el volumen considerado hay una importante cantidad de agua en forma de vapor y pequeñas gotas, sometida a un proceso de mezcla turbulenta, que absorbe la radiación infrarroja, los intercambios radiativos no se producen entre la superficie del agua y las cubiertas sino entre el agua y el medio encerrado a temperatura T , y entre el medio a T y las cubiertas.

MODELO MATEMÁTICO

En función del modelo físico planteado se puede formular el modelo matemático correspondiente, representado por el siguiente conjunto de hipótesis, ecuaciones y condiciones de borde.

Hipótesis

- Flujo en tres dimensiones
- Flujo incompresible
- Estado estacionario
- Ambiente a temperatura constante
- Potencia suministrada constante
- Flujo turbulento

Ecuaciones

Conservación de la masa

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

Transporte de impulso

$$\rho \frac{D \mathbf{V}}{D t} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad \mu : \text{viscosidad} \quad (8)$$

Transporte de energía

$$\frac{D T}{D t} = \alpha \nabla^2 T \quad \alpha = k / \rho c_p \quad \text{difusividad} \quad (9)$$

Difusión de masa en un sistema binario

$$\frac{D \omega}{D t} = D \nabla^2 \omega \quad \omega = \rho_{\text{vapor}} / \rho \quad (10)$$

$D =$ difusividad del vapor de agua en aire

Aproximación de Boussinesq, en las fuerzas de volumen

$$\rho = \rho_o (1 - \beta \partial T / \partial y) \quad \beta = \text{compresibilidad} \quad (11)$$

Transferencia radiativa

$$\text{desde el agua} \quad q_{rw} = \sigma (\epsilon_w T_w^4 - T^4) \quad (12)$$

$$\text{hacia la cubierta} \quad q_{rc} = \sigma (T^4 - \epsilon_c T_c^4) \quad (13)$$

Condiciones de borde

Sobre las superficies sólidas

$$\mathbf{V} = 0 \quad (14)$$

Sobre la superficie del agua

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = (m_w / \rho_v) \Big|_s \quad (15)$$

$$T = T_w = \text{constante} \quad (16)$$

$$m_w = m_m = \text{constante} \quad (17)$$

$$q_w = -\lambda m_w \quad \lambda : \text{calor de evaporación a } T_w \quad (18)$$

Sobre paredes laterales adiabáticas

$$q_p = 0 \quad (19)$$

Sobre cubiertas

$$m_c = m_m = \text{constante} \quad (20)$$

$$q_c = \text{constante} \quad (21)$$

$$q_{cf} = -\lambda_c m_c \quad \lambda : \text{calor de condensación a } T_c \quad (22)$$

Otras consideraciones

Flujo turbulento : las componentes del campo de velocidad \mathbf{V} en las tres direcciones son

$$u = U + u' \quad \text{según } x$$

$$v = V + v' \quad \text{según } y$$

$$w = W + w' \quad \text{según } z$$

siendo U, V y W los valores promedio y u', v' y w' las fluctuaciones de los valores instantáneos respecto al promedio. El campo de velocidades promedio, U y V , debe reproducir el patrón de circulación global observado (Figura 2).

$$T = \bar{T} + T'$$

siendo \bar{T} la temperatura promedio y T' la fluctuación de los valores instantáneos respecto al promedio.

Es importante evaluar los parámetros físicos, tanto del vapor como del agua condensada, a la temperatura correspondiente a las condiciones en que se analiza el fenómeno.

Si bien se plantea la ecuación de difusión de masa para un sistema binario, debido al carácter turbulento del flujo, es de esperar que los efectos difusivos sean importantes sólo sobre las superficies sólidas y líquidas. Lo mismo se esperaría para la difusión térmica, en particular en las proximidades de las superficies de las cubiertas. Por lo tanto es importante prestar atención a la resolución de este sistema en las capas límites dinámica, térmica y difusiva.

El conocimiento adquirida en experiencias de visualización de flujos y medidas térmicas y de productividad realizadas en laboratorio permiten mejorar el modelo convencional de destilador tipo batea para predecir su funcionamiento en etapas de simulación numérica. Los modelos empleados hasta el presente no tienen en cuenta la naturaleza del medio encerrado dentro del destilador, lo cual conduce a proponer, por ejemplo, intercambios térmicos radiativos entre la superficie del agua y las cubiertas de vidrio. Las técnicas de visualización de flujos mostraron que el medio es una mezcla saturada de aire, vapor y gotas de agua, semejante al se tendría en una nube, que desde el punto de vista radiativo se comporta como un cuerpo negro.

Otro aspecto importante es el carácter turbulento del flujo en el interior que impide una transferencia directa por convección del vapor desde la superficie del agua hacia las cubiertas donde condensa: la recirculación de agua en el interior es importante. A pesar de la turbulencia, existen patrones de circulación global, que dependen de la geometría del destilador, que pueden tener influencia en su productividad y deben ser tenidos en cuenta en un modelo de simulación.

Las relaciones empíricas acerca de productividad, eficiencia, coeficiente de transferencia térmica sobre cubiertas y número de Rayleigh en distintas condiciones de funcionamiento deben tenerse en cuenta considerando que las experiencias fueron realizadas en laboratorio y que para un sistema real funcionando a la intemperie las condiciones externas serán más variables.

La validez del presente modelo sólo podrá comprobarse una vez realizada su simulación numérica y la comparación de los resultados obtenidos a partir de ella con medidas realizadas en un sistema real.

BIBLIOGRAFÍA

- Cooper, P. I. (1973). Digital simulation of experimental solar still data, *Solar Energy*, **14**, 451.
- De Paul, I. y Saravia, L. (1995). Visualización de flujos aplicada al estudio del movimiento convectivo del aire húmedo en un destilador solar. En *Memorias del 4o. Simposio Internacional sobre recientes avances en Mecánica y Física de Fluidos*, Kuz, V., Gratton, R., Ferreri, J. C. (Editores), pp. 129-136, La Plata, R. Argentina.
- De Paul, I., Hoyos, D. y Saravia, L., (1996). Medidas de velocidad del vapor de agua en el interior de un destilador solar tipo batea. En *Actas 19a. Reunión de ASADES, Tomo II*, pp. 07.13, Mar del Plata, R. Argentina.
- De Paul, I., D. Hoyos, L. Saravia., (1997). Productividad de un destilador tipo batea en función de diferentes parámetros. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **1**, 1, pp: 97.
- De Paul, I. D. Hoyos, L. Saravia, (1998). Balance de energía y función de predicción para un destilador solar tipo batea. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. **2**, 1, pp :02.57.
- 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. *EnergíasRenovables 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 Doctoral*. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta.
- Duffie, J. A., Beckman W. A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*, Cp. 20, J. Wiley and Sons.
- Dunkle, R. V. (1961). Solar water distillation : the roof type still and a multiple effect still. En *Int. Development in Heat Transfer, Part 5*, pp. 895, Conference at Denver, USA.
- Mason, J.B. (1964). *The physics of clouds*. Oxford University Press.
- Sayigh, A. A. M. (1977). *Solar Energy Engineering*, Academic Press.

ABSTRACT – Current models of basin type solar stills employed in numerical simulations do not take care of the nature of the medium nor the fluiddynamic characteristics of the circulation inside it. Taken account of the experience acquired from flow visualization tests and thermal and velocity measurements performed on a laboratory scale prototype, a new physic model is proposed for a basin type solar still that take account of these characteristics.