

DESTILADORES SOLARES LIGEROS DE AGUA DE MAR

Luis Palacios Hammeken, Miguel A. Porta y José Luis Fernández, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F., 04510 México. Tel. (5) 622 3423; Fax (5) 616 2894

RESUMEN

Los destiladores solares de agua de mar son dispositivos sencillos de fabricar y operar. Se han ensayado en diversas partes del mundo para obtener agua destilada del agua de mar, tanto para consumo humano como para uso agrícola.

El destilador consiste de una charola poco profunda, con agua de mar. Esta charola se expone a la radiación solar y cuando el agua se calienta se produce el desprendimiento de vapor puro que topa y se condensa en una superficie semitransparente, que se coloca ligeramente inclinada, para confinar el volumen de aire sobre la película de agua de mar. El vapor puro de agua se condensa y se recolecta en canaletas que conducen el agua al exterior.

Este trabajo revela la gran sensibilidad de la eficiencia del destilador al tirante inicial de agua a destilar, y cómo seleccionar el tirante óptimo.

INTRODUCCION

Los destiladores solares de agua de mar son dispositivos sencillos de fabricar y operar. En producción industrial, sin embargo, requieren alta densidad de mano de obra calificada en su construcción, pero su operación sigue siendo muy simple. Se han ensayado en diversas partes del mundo desde hace cientos de años y en México desde hace varias décadas para obtener agua destilada del agua de mar [1] tanto para consumo humano como para usos agrícolas. El agua que así se produce es de la más alta calidad posible, con menos sólidos disueltos totales que la que se obtiene del proceso de tridestilación en laboratorios de procesos físico-químicos.

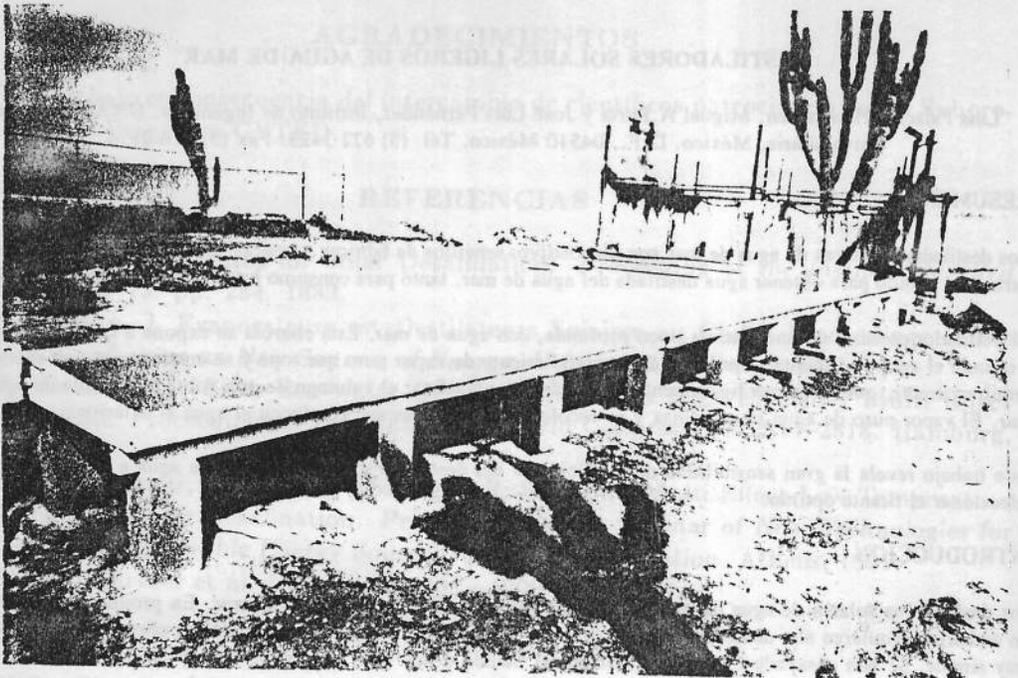
Sin embargo, algunos aspectos de su diseño son todavía mal entendidos, por lo que su empleo, aun en las zonas más desérticas de la costa del Noroeste mexicano, es todavía muy raro.

Un aparato típico se ilustra en la fotografía y esquema de la fig. 1. Básicamente, un destilador solar consiste en una charola muy poco profunda, usualmente pintada de negro en su interior, que contiene agua de mar. Esta agua se expone a la radiación solar. Una vez que el agua a destilar se ha calentado, se produce el desprendimiento de vapor puro de agua de la superficie del agua de mar. Esto ocurre porque la presión de vapor en el agua crece cuando la temperatura aumenta; no es necesario, por lo tanto, alcanzar temperaturas de ebullición para producir la emigración del vapor puro.

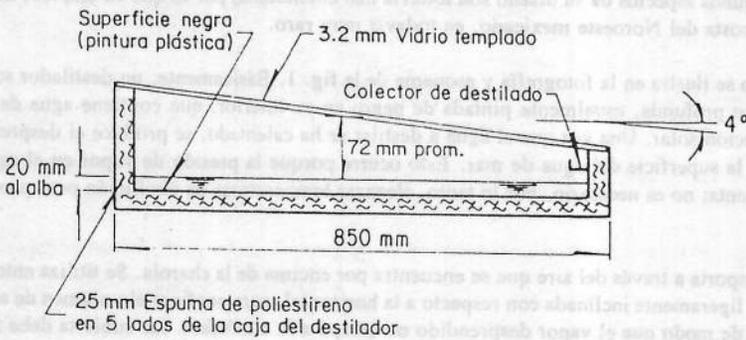
Este vapor se transporta a través del aire que se encuentra por encima de la charola. Se utiliza entonces una superficie semitransparente, ligeramente inclinada con respecto a la horizontal, para confinar el volumen de aire sobre la película de agua de mar, de modo que el vapor desprendido no escape a la atmósfera. La cubierta debe ser transparente para permitir el paso de la energía solar. Si la cubierta es de vidrio, que resulta opaco a la radiación infrarroja, se producirá entonces el efecto de *invernadero*, esto es, el calor solar se atraparán en el espacio confinado, con lo que las temperaturas serán más altas y la operación será más eficiente.

Cuando se topa con la superficie interna de la cubierta, la cual suele estar más fría que el agua del interior debido al enfriamiento al ambiente (y por lo tanto su presión efectiva de vapor será más baja que la del agua a destilar), el vapor se condensará. Por eso es necesario que la cubierta transparente esté un poco inclinada, de modo que el agua condensada escurra por el interior y se recolecte en canaletas especiales que se colocan para este fin (fig 1). El agua así destilada se conducirá hasta el exterior del aparato para su posterior almacenaje y uso.

La producción característica de un destilador solar de este tipo es del orden de 4 litros diarios por metro cuadrado en un día bien soleado. La producción depende de la insolación, el clima, el ambiente, la calidad de los materiales, la fabricación, el diseño del destilador solar y su correcta operación.



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Destilador solar de agua de mar McCracken - Porta, (b) Dibujo esquemático de la sección transversal

Diversos autores [2-4] han hecho importantes aportaciones al análisis paramétrico de destiladores solares de agua de mar. Otros [5,6] han hecho investigaciones más detalladas de la importancia relativa de cada componente del destilador en el resultado final.

Un aspecto que generalmente se aborda apenas superficialmente, y eso con serias limitantes en la interpretación técnica, es la importancia del efecto de inercia de los materiales componentes [7]. En el presente trabajo se estudia especialmente un parámetro de singular importancia, que es el tirante inicial de agua a destilar. Esta es una de las escasas variables disponibles para el control, y su relevancia debe enfatizarse.

CONSIDERACIONES GENERALES

Supóngase, para fines de esta presentación, que interesa un destilador solar simple, de cubierta en una sola pendiente, de los que se suelen conocer como destiladores solares ligeros o de *contenedor somero*. En este tipo de aparatos los efectos de almacenaje de calor del fondo y de la cubierta son despreciables. En este caso, los fenómenos de retardo en el transitorio térmico, y la característica de la producción de agua destilada a lo largo del día, se pueden asociar a la capacidad de almacenaje de energía térmica de la película de agua en el fondo de la charola del destilador y muy tenuemente a otros elementos que participan con su inercia térmica en este fenómeno [7].

Una buena forma de ilustrar la capacidad de producción de estos dispositivos es medir simultáneamente la entrega de agua destilada por unidad de tiempo, y la irradiancia solar. Después, ajustando las escalas de las mediciones, se puede presentar la variación en el tiempo de cada una de esas variables; esto se muestra en la fig. 2, en días sin nublados fuertes, expresando la producción de agua destilada en litros por unidad de tiempo.

La meta de las investigaciones en curso es identificar la bondad de cada uno de esos y de otros parámetros. Una herramienta adecuada para intentar este análisis es la modelación matemática. No obstante, la sola modelación es herramienta insuficiente si no se valida mediante los resultados experimentales pertinentes.

MODELO MATEMATICO

Los modelos matemáticos que mejor describen la productividad de los destiladores solares ligeros, o de tipo invernadero, también llamados *de caseta* o *destiladores solares directos*, son de parámetros concentrados. Se suelen reconocer en la literatura como *modelos de Cooper* [2].

En general existe acuerdo con respecto a la forma que deben guardar estos modelos. Se trata de resolver en forma simultánea los balances térmicos de las partes principales del destilador, o sea de la cubierta transparente, el agua a destilar, y los materiales del fondo del destilador.

Donde el acuerdo no es tan generalizado es en lo referente al tratamiento de las condiciones climáticas que afectan la operación del destilador y las condiciones de control. En lo que respecta a estas

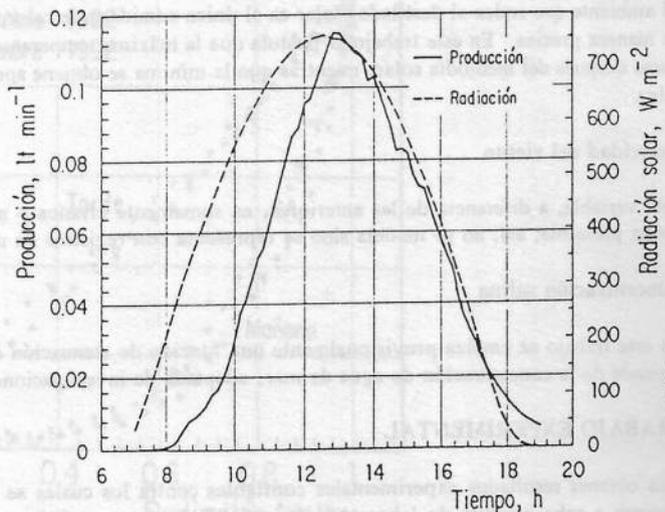


Fig. 2 Relación de producción de agua destilada y radiación solar en función del tiempo

últimas, algunos autores proponen que el agua a destilar debe conservar un tirante constante, por lo que debe haber

una alimentación continua mientras el destilador esté destilando agua. Otros autores, los presentes incluidos, consideran que la mejor práctica es alimentar una cierta cantidad de agua a destilar antes del alba, cuando el aparato está frío, y no volver a alimentarlo sino 24 horas después. Esta práctica implica que la película de agua disminuirá continuamente a lo largo del día, lo cual producirá una serie de variaciones al interior del dispositivo que deben tomarse en cuenta en la solución del modelo.

Por lo que corresponde a las condiciones climáticas, se reconoce que la variabilidad del clima hace físicamente imposible su cabal predicción. No obstante se pueden identificar condiciones del clima que sean representativas de una gran cantidad de ocurrencias reales, y que puedan ser modeladas correctamente. Para ello se acude a la observación de los tres principales componentes del clima en cuanto a la operación de los destiladores solares, que son la irradiancia solar, la temperatura del ambiente y la velocidad del viento.

Una última consideración, y muy importante en el análisis de destiladores solares someros, o sea, con una delgada capa de agua al interior de la charola en el inicio, es el factor de concentración salina. Cuando la concentración es baja como en el agua de mar (0.03 aproximadamente en volumen), la presión parcial de vapor del agua es una función de la temperatura esencialmente, e independiente de la concentración. Sin embargo, esa misma presión descendiende fuertemente hacia concentraciones elevadas (orden de 0.5) y es prácticamente nula a más altas concentraciones (0.9). Por esta razón debe emplearse una función de atenuación de la presión parcial de vapor conforme la concentración aumenta.

Irradiancia solar

La disponibilidad de energía solar como medio de calentamiento, se determina por unidad de área horizontal del destilador; es la absortancia efectiva a la energía solar de la superficie negra en el fondo de la charola, reducida por la reflexión de la cubierta y por la absortancia imperfecta del material negro.

Temperatura ambiental

El ambiente que rodea al destilador solar es el único sumidero de calor, por lo cual su temperatura debe modelarse de manera precisa. En este trabajo se postula que la máxima temperatura del ambiente se suele presentar hacia dos horas después del mediodía solar, mientras que la mínima se obtiene aproximadamente una hora antes de que el sol salga.

Velocidad del viento

Esta variable, a diferencia de las anteriores, es sumamente errática y muy difícil, por lo tanto, de representar en forma plausible; así, no se modela sino se representa con registros de mediciones físicas.

Concentración salina

En este trabajo se emplea provisionalmente una función de atenuación de la presión parcial de vapor de agua que depende de la concentración de agua de mar, adaptada de investigaciones con agua geotérmica.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Para obtener resultados experimentales confiables contra los cuales se pudiese validar el modelo matemático, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio bajo condiciones atmosféricas reales pero bien controladas. El aparato experimental es un destilador solar muy similar al Sunwater™ registrado por Horace McCracken. Sin embargo, tiene diversas mejoras tales como una menor distancia entre el agua y la cubierta trasparente, un mayor contenido de aislamiento térmico y más trasmittancia en la cubierta. La distancia media entre la cubierta y la superficie del agua es de 7.2 cm. La cubierta está inclinada unos 4° con respecto al plano horizontal, y las dimensiones efectivas internas son de 0.85 m por 9.63 m. Así, el área efectiva de destilación es de 8.18 m². El tirante inicial de agua de mar es de 20 ± 1 mm, de modo que el contenido inicial de agua a destilar es de unos 165 l. El destilador produce al menos

unos 40 litros diarios de agua destilada, por lo que el tirante final de salmuera es del orden de 15 mm. Se emplea agua fresca del mar para lavar el interior de la charola cada mañana aproximadamente 1 h antes del alba. Las pruebas experimentales se inician en este momento unas 3 h tras el ocaso, lo que asegura que se monitorea prácticamente todo el proceso de producción de agua destilada. De los 40 o más litros producidos al día unos 4 a 6 se producen después del ocaso.

Durante las horas de la mañana, mientras el nivel de la irradiancia aumenta, la producción de destilado aumenta más lentamente que la irradiancia; esto se debe sin duda a que parte del calor solar se emplea en calentar el agua a destilar y parte a calentar los componentes del aparato. Todas las temperaturas, en este lapso, están aumentando. Así, podría decirse que en este periodo el aparato completo se está calentando, y una parte del calor se está almacenando en los componentes del destilador solar, incluyendo el agua a destilar.

Por el contrario, durante la tarde, cuando la irradiancia disminuye, la irradiancia y la producción, siguen casi exactamente la misma tendencia, y los puntos en la fig 3 se agrupan casi en una línea recta que une el valor máximo de la producción y la irradiancia con el mínimo (adimensionalizados ambos). Esta curva está muy por arriba de la curva matutina, lo que sugiere que una parte importante del calor solar que se almacenó en la mañana es recuperado para el proceso de destilación en el lapso vespertino.

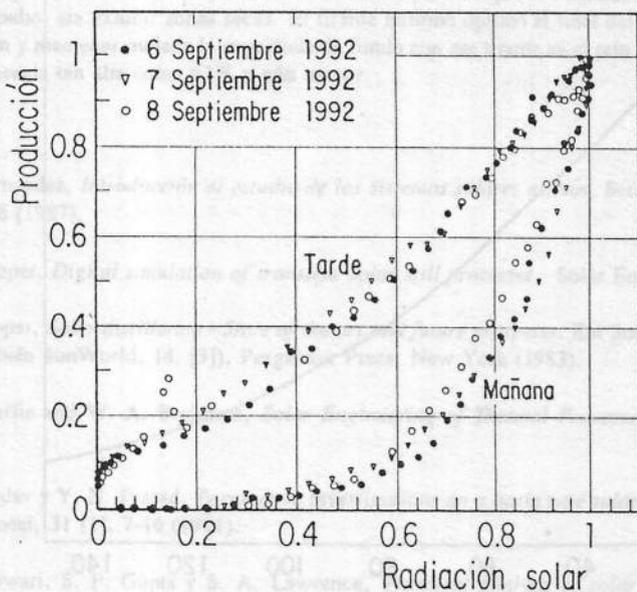


Fig.3 Relaciones adimensionales de producción y radiación solar para tres días de prueba

ESBELTEZ DE LA CAPACIDAD TERMICA

La observación del párrafo precedente da lugar a la definición de un *factor de esbeltez de la inercia térmica*, S_r , que se define como la relación entre la máxima distancia vertical entre las curvas de producción matutina y vespertina dividida entre la ordenada máxima de la fig 3, y es una cantidad, por tanto, adimensional.

Estos destiladores serán más sensibles al cambio de las condiciones climáticas entre el día y la noche. Por ejemplo, en zonas costeras es frecuente que haya fuertes brisas hacia el ocaso, lo que puede resultar en una mejor capacidad productiva de estos destiladores hacia esas horas. Para seleccionarlos y operarlos, no bastará con conocer, por tanto, la sola irradiancia.

La creciente inercia térmica se traduce en los casos bajo análisis para el ejemplo, en una reducida producción diaria de destilado, pero no necesariamente será este siempre el caso.

IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Para identificar cuanto puede afectar cada parte del destilador solar ligero su inercia térmica global, se pueden analizar teóricamente los casos de un destilador con una cubierta transparente de inercia térmica variable o un tirante inicial creciente de salmuera, o de inercia térmica creciente en los elementos constructivos de la charola.

Como se observa, la variabilidad del tirante afecta de manera sumamente notable el valor de S_r , sin embargo, este valor es, para fines prácticos, insensible al valor de la capacitancia térmica en la cubierta y en el fondo (el cual, recuérdese, está aislado térmicamente).

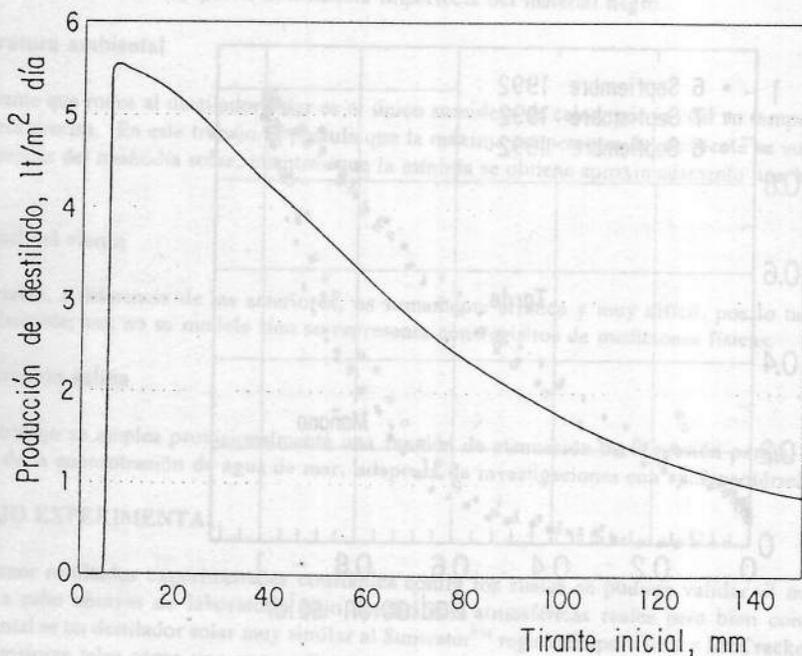


Fig 4. Variación de la producción de destilado con el tirante inicial

Una observación más detallada indica que la relación de S_r con el tirante es aproximadamente lineal desde tirantes mínimos hasta unos 30 mm; por otro lado, S_r es aproximadamente constante y casi igual a la unidad, cuando el tirante de inicio es superior a unos 55 mm.

La discriminación de estas distintas maneras de comportarse térmicamente no es observable sin la participación del concepto de inercia térmica en forma explícita. Por ejemplo, obsérvese en la fig. 4, una representación *convencional* de la producción como función del tirante inicial. Este corresponde a la región en la cual la concentración salina controla la producción, de modo que a tirantes iniciales inferiores a 10 mm la producción es básicamente constante.

CONCLUSIONES

Probablemente el destilador solar ligero, tipo invernadero, que se aborda en este estudio, sea el aparato más sencillo para desalar agua de mar. Posiblemente su costo de producción de agua destilada es el más bajo de las tecnologías disponibles, aplicables a las costas del Noroeste mexicano. Sin embargo, su uso es muy limitado, una posible explicación a esta omisión es el desconocimiento generalizado de la enorme sensibilidad de su operación a algunos parámetros, como la política de llenado. Efectivamente, el concepto es sencillo; asimismo las posibilidades de frustrar las expectativas del usuario, por desconocimiento de esos y otros conceptos, son muchas.

La eficiencia de operación, es sumamente dependiente del tirante inicial de agua salada. Es más importante el calor almacenado que el solo efecto de volumen. Además, si la parte impermeable sobre el aislamiento del fondo es buen conductor y almacén de calor, su participación en la capacidad térmica del almacén de agua se traducirá en una pérdida de productividad. Esta consideración es pertinente ya que, en la búsqueda de métodos constructivos que permitan un mínimo de tirante, será necesario explorar materiales rígidos, térmicamente estables de planaridad constante, para integrar la primera capa del fondo.

Es desde luego muy conveniente que el proceso constructivo permita que el destilador llegue a operar con películas de agua muy delgadas, sin exhibir zonas secas. El tirante mínimo óptimo al final del ciclo diario de producción es del orden de 2 mm y mantener mojada la superficie de fondo con ese tirante es el reto inmediato, logrando a cambio alcanzar una eficiencia tan alta como 67% o aún mayor.

REFERENCIAS

1. J. L. Fernández, *Introducción al estudio de los sistemas solares activos*. Series del Instituto de Ingeniería, No. D-26 (1987).
2. P. I. Cooper, *Digital simulation of transient solar still processes*. Solar Energy, 12, 313-331 (1969).
3. P. I. Cooper, *Solar distillation - State of the art and future prospects*. En: Solar energy and the Arab world (ver también SunWorld, 14, [3]), Pergamon Press, New York (1983).
4. J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª ed., Wiley-Interscience (1991).
5. Y. P. Yadav y Y. N. Prasad, *Parametric investigations on a basin type solar still*. Energy Conversion and Management, 31 (1), 7-16 (1991).
6. G. N. Tiwari, S. P. Gupta y S. A. Lawrence, *Transient analysis of solar still in the presence of dye*. Energy Conversion and Management, 29 (1), 59-62 (1989).
7. M. A. Porta y J. L. Fernández, *Experimental evaluation of thermal inertia effects in diffusion-type solar stills*. Memorias del International Symposium of Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects, pp. 179-184, Cancún, México (1993).

Octubre, 1993