

Límites termodinámicos a la productividad de los destiladores solares pasivos

Thermodynamical productivity limitations for passive solar stills

Limites termodinâmicos á produtividade de equipamentos de destilação solar pasivi

Henry Alberto Salinas-Freire^{1*}; Osney Pérez-Ones²; Susana Rodríguez-Muñoz²

¹Universidad Técnica de Ambato, Campus Huachi, Av. Los Chasquis y Río Payamino, Ambato, Ecuador,

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Ave. 114 N° 11901 e/119 y 127. Marianao, Ciudad Habana, Cuba.

* ha.salinas@uta.edu.ec

Fecha recepción: 26 de febrero de 2018

Fecha aceptación: 1 de febrero de 2019

Resumen

La desalinización de agua de mar se ha estudiado con interés debido a la escasez de agua dulce para consumo humano. La destilación solar es un método antiguo; la productividad, consumo energético del proceso y el costo del agua desalinizada así obtenida dependen de la eficiencia que se alcance en cada una de las etapas de estos sistemas. La limitada capacidad de absorber la radiación solar y transformarla en calor útil para la evaporación, la interacción con el medio circundante, y las pérdidas de calor limitan la eficiencia global del proceso térmico y la productividad. Como la energía proviene de la radiación solar, la productividad máxima de este proceso estará limitada por la magnitud de la radiación solar total disponible en una zona del planeta debido a su ubicación geográfica, época del año y condiciones climáticas locales. Los procesos a partir de esa energía estarán limitados termodinámicamente por los coeficientes de transferencia térmica que se alcancen en el equipo, por el máximo que pueda alcanzar el calor de evaporación, mientras que las pérdidas al ambiente por convección y radiación sean mínimas. Se presentan análisis comparativos de varios modelos propuestos, datos reportados de destiladores, datos reportados de radiación solar que alcanzan valores promedio de hasta 7,2 – 7,4 kWh/m² en algunas regiones del planeta y se hacen estimaciones para productividad de estos equipos que alcanzan entre 6,7 y 6,9 kg/m²día y la eficiencia máxima teórica se encuentra alrededor de 0,16 de la radiación solar total.

Palabras clave: Desalinización; Destilador Solar Pasivo; Productividad Destilador Solar; Eficiencia Destilador Solar.

Abstract

Seawater desalination is a process that has been widely studied with great interest due the growing water scarcity for human use. Solar distillation is a very ancient method, the productivity, energy requirements and the consequent cost of the desalinated water depends at least of the efficiency that can be reached in every single step of those systems. Due the limited solar irradiance absorption and to water evaporation transformation capacity, due to glass and water radiation absorbance and the ambient interaction, heat losses limit the overall thermal process efficiency and consequently productivity. Since in passive solar stills all energy comes from solar irradiation, this process maximum productivity will be limited for total solar irradiance that may be available in a defined zone of the world defined by their geographical localization, season of the year and local climatic conditions. All thermal process with this energy will be thermodynamically limited by heat transfer coefficient values reached in the dispositive, by the maximum value that can reach the evaporative heat transfer coefficient, and heat radiation and convective losses coefficients being minimum. In this paper, comparative analysis is presented from several process

proposed models, device reported data; solar irradiation reported data reaching about 7.2 – 7.4 kWh/m² and estimations for productivity intervals for this devices area about 6.7 – 6.9 kg/m²d; efficiency calculated with available reported data are about 0.16 of the global solar irradiance.

Keywords: *Desalination; Passive Solar Still; Solar Still Productivity; Solar Still Efficiency.*

Resumo

A dessalinização da água do mar tem sido estudada com interesse por causa da escassez de água doce para consumo humano. Destilação solar é um método antigo, a produtividade, consumo de energia do processo e o custo da água dessalinizada assim obtido dependem da eficiência em cada fase de estes sistemas. A capacidade limitada de absorver radiação solar e transformando-a em calor útil para a evaporação, a interação com o meio circundante e as perdas de calor, limita a eficiência global do processo térmico e produtividade. Como a energia vem de radiação solar, a máxima produtividade deste processo é limitado pelo tamanho da radiação solar total disponível em uma área do planeta devido à sua localização geográfica, a época do ano e das condições climáticas locais. Os processos a partir dessa energia estão limitados termodinamicamente pelo coeficientes de transferência térmico que são alcançados no equipamento, pôr o valor máximo que pode atingir o calor de evaporação, enquanto que as perdas de calor para o ambiente por convecção e radiação são mínimas. São apresentados, análise comparativa dos diferentes modelos propostos, dados reportados de destiladores, dados de irradiação solar relatados que atingem valores médios até 7,2 - 7,4 kWh/m² em algumas regiões do mundo. São feitas estimações de coeficientes de transferência em estas etapas e os intervalos de produtividade para estes dispositivos que atingem até 6,7 - 6,9 kg/m²d e eficiência é entre 0,16 da radiação solar total disponível.

Palavras-chave: *Dessalinização; Destilador Solar Passiva; a Produtividade Destilador Solar; a Eficiência Destilador Solar.*

Introducción

La desalinización del agua de mar se conoce desde la antigüedad (1, 2), se ha reseñado (1, 3, 4) que Tales de Mileto y Aristóteles lo mencionan en sus escritos y describen cómo se habrían utilizado dispositivos primitivos basados en hervir el agua en vasijas de barro o calderos y recogerla en esponjas en los barcos para conseguir agua dulce durante viajes largos. Desde entonces se han estudiado y desarrollado varios métodos y sistemas de desalinización que han pasado de los prototipos a instalaciones de gran capacidad y esto ha permitido conocer costos y eficiencias de las etapas en cada proceso (5-9).

Entre los sistemas de desalinización empleados actualmente, se estudia con mucho interés aquellos basados en energías renovables por sobre aquellos que emplean energía de combustibles fósiles (10-16). La desalinización solar o SD consiste en colocar agua de mar en un recipiente donde a través de una película transparente, generalmente vidrio, se emplea la radiación solar para calentar la solución salina y evaporar una parte del agua que pasa al aire de la cámara y posteriormente condensa al entrar en contacto con una superficie más fría desde donde se colecta (17, 18). Estos

equipos no emplean otra fuente de energía y por lo tanto su rendimiento está en función de la radiación solar que se pueda captar, y de la eficiencia de los procesos al interior del equipo.

Por la forma de operación de los desalinizadores solares pasivos, todas las etapas de transferencia de masa y energía tienen límites, los cuales se analizan en este trabajo y se comparan con datos reportados, con el fin de determinar la productividad máxima teórica esperada.

Marco teórico

Los desalinizadores solares pasivos reciben toda la energía para su operación a partir de la radiación solar incidente, ésta se transfiere desde la cubierta de vidrio hacia el fondo del destilador y desde ahí, transformada en energía térmica, hacia el agua, las paredes, el fondo y la cubierta del equipo. Una parte de esa energía evapora agua y la restante se pierde al ambiente. Para su análisis se emplean varios modelos de transferencia de calor y masa (19, 20), así como correlaciones para las propiedades termodinámicas y de transporte del agua y del vapor (21). Los modelos matemáticos se usan para analizar el comportamiento del desalinizador en las mejores condiciones de

operación para la temperatura del agua, del vidrio y la radiación solar y se comparan los resultados. Para el desarrollo del presente trabajo se considera un destilador solar pasivo de una sola cubierta representado mediante el esquema de la Figura 1.

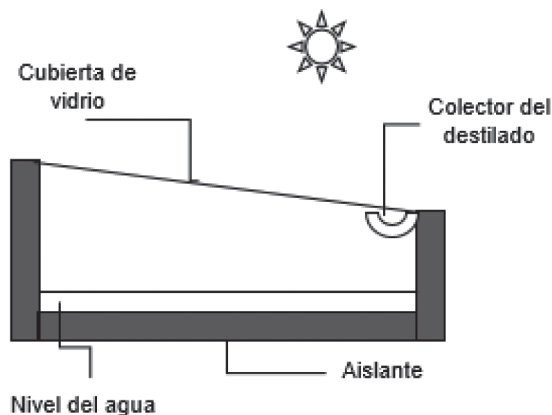


Figura 1. Esquema del destilador solar pasivo.

En el destilador, se considera que no hay pérdidas de masa por fugas del equipo, que no hay gradientes de temperatura en el vidrio, el agua o el material aislante y que las variaciones debidas a la temperatura en la capacidad calorífica de la base del destilador del vidrio y del aislante son despreciables (21, 22).

Radiación solar

La radiación solar que alcanza la superficie de la tierra no es monocromática (23), abarca una gama de longitudes de onda que van del infrarrojo hasta el ultravioleta, pasando por el espectro visible. En los desalinizadores solares esta radiación I_h llega hasta la superficie del vidrio donde una fracción α_v es absorbida, una fracción τ_v es transmitida y una fracción R_v es reflejada. La fracción transmitida atraviesa el aire húmedo con pérdidas despreciables y alcanza el agua en el fondo del

destilador, donde nuevamente la radiación total se divide entre lo absorbido α_w , reflejado R_w y transmitido τ_w . Un esquema de este proceso para el vidrio se muestra en la Figura 2, la fracción transmitida tiene el mismo compartimiento en el aire, aunque con pérdidas despreciables, al igual que en el agua del fondo del destilador.

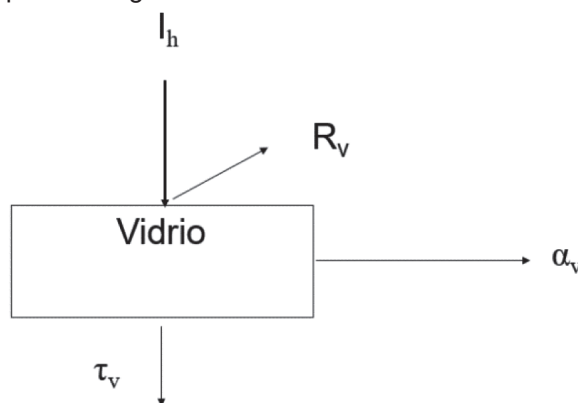


Figura 2. Esquema del proceso de incidencia de la radiación solar en el vidrio.

La fracción transmitida por el agua, llega hasta el fondo del destilador, generalmente pintado de color negro, donde la mayor parte se absorbe, una pequeña fracción se refleja y prácticamente nada se transmite; allí calienta la superficie del fondo del destilador, y este calor empieza a transmitirse hacia el agua y hacia el material aislante en el fondo y en las paredes del destilador. El agua es calentada y del total de la energía térmica generada que se transfiere al vidrio, una parte lo hace por convección natural, otra parte por radiación y otra parte evapora el agua de la solución salina y se transfiere en forma de calor de evaporación; esta es la única fracción de todo calor involucrado en el proceso que sirve para obtener destilado, se transfiere al vidrio donde se condensa el vapor por la diferencia de temperatura, y de allí se disipa al ambiente (24). Este proceso se muestra en la Figura 3.

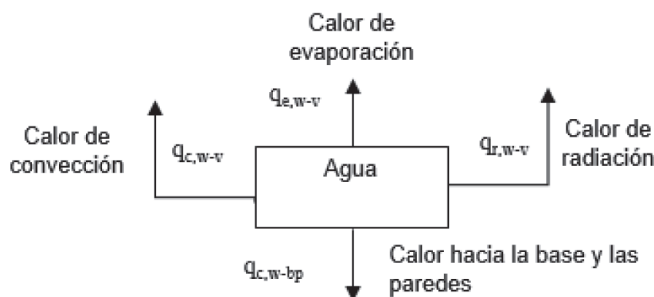


Figura 3. Transferencia de calor desde el agua caliente en el fondo del destilador.

La radiación solar varía de un lugar a otro dependiendo de factores como la ubicación geográfica, la época del año, la nubosidad y la hora del día. Los valores se pueden obtener por medición directa o a través de publicaciones de instituciones como el Banco Mundial. Es posible encontrar datos útiles para la mayoría de regiones (25).

En el proceso de absorción de la radiación solar, Cooper (18) y otros autores (26) han determinado

que solamente entre el 85 y el 95% de la radiación I_h incidente alcanza el fondo del destilador.

Balance de energía

De acuerdo con el diagrama de la Figura 1 se plantean los balances de energía así (22):

Para el recipiente que contiene el agua en el fondo del destilador:

$$I_h \tau_g \tau_w \alpha_b A_b = h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + U_f A_f (T_f - T_a) \quad (1)$$

Donde:

I_h = radiación incidente en el vidrio [W/m^2],
 τ_v = transmisividad del vidrio, adimensional
 τ_w = transmisividad del agua, adimensional
 α_b = absorptividad del recipiente o fondo del destilador, adimensional
 A_b = área de la base del destilador [m^2],
 A_f = área del fondo del destilador [m^2],
 $h_{c,b-w}$ = coeficiente de transferencia de calor por convección del fondo del destilador al agua

[$W/m^2^\circ C$],

T_p = temperatura de la base del destilador [$^\circ C$],

T_f = temperatura del fondo del destilador [$^\circ C$],

T_w = temperatura del agua [$^\circ C$],

U_f = coeficiente total de transferencia de calor del fondo del destilador al ambiente [$W/m^2^\circ C$], y

T_a = temperatura ambiente [$^\circ C$].

Balance de Energía para el agua en el recipiente del destilador:

$$I_g \tau_g \alpha_p A_w + h_{c,b-w} A_p (T_p - T_w) = m_w c_w \left(\frac{dT_w}{dt} \right) + h_{t,w-v} A_w (T_w - T_{vi}) + U_s A_s (T_w - T_a) \quad (2)$$

Donde:

A_w = área del agua del destilador [m^2],
 m_w = masa del agua en el destilador [kg],
 c_w = capacidad calorífica del agua [$J/kg^\circ C$],
 dT_w/dt = variación de la temperatura del agua respecto del tiempo [$^\circ C/s$],
 $h_{t,w-v}$ = coeficiente total de transferencia de calor desde el agua al vidrio [$W/m^2^\circ C$], y
 T_{vi} = temperatura de la cara interna del vidrio [$^\circ C$].

$$h_{t,w-v} = h_{c,w-v} + h_{r,w-v} + h_{e,w-v} \quad (3)$$

Donde:

$h_{c,w-v}$ = coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al vidrio [$W/m^2^\circ C$],

$h_{r,w-v}$ = coeficiente de transferencia de calor por radiación del agua al vidrio [$W/m^2^\circ C$],

$h_{e,w-v}$ = coeficiente de transferencia de calor por evaporación del agua al vidrio [$W/m^2^\circ C$].

El coeficiente total de transferencia de calor del agua al vidrio, definido por Sampathkumar (27) es:

Balance de Energía para el vidrio de la cubierta:

$$I_h \alpha_v A_v + h_{t,w-g} A_w (T_w - T_{vi}) = h_{r,v-c} A_v (T_{vo} - T_c) + h_{c,v-a} A_v (T_{vo} - T_a) \quad (4)$$

Donde:

α_v = absorbancia del vidrio, adimensional
 A_v = área del vidrio [m^2],
 $h_{r,v-c}$ = coeficiente de transferencia de calor por radiación del vidrio al cielo [$W/m^2^\circ C$],
 T_{vo} = temperatura de la cara externa del vidrio [$^\circ C$],
 T_c = temperatura del cielo [$^\circ C$],
 $h_{c,v-a}$ = coeficiente de transferencia de calor por convección del vidrio al ambiente [$W/m^2^\circ C$].

Correlaciones para las propiedades del agua y del aire

Para evaluar los coeficientes es necesario conocer las propiedades del agua y el aire en las condiciones de operación. Estas propiedades como densidad, viscosidad y presión de saturación de vapor, varían en función de la temperatura, por lo que se emplean correlaciones para su cálculo.

Presión de saturación o vapor del agua. Existen varias ecuaciones que relacionan la presión de vapor del agua con la temperatura, de las cuales se evalúan tres. La correlación de Dunkle (28), válida para temperaturas inferiores a 70°C, permite calcular la presión de vapor P del agua en Pa a la temperatura T (en °C) y se expresa en la Ecuación 5.

$$P = e^{25,317 - \frac{5144}{T+273,15}} \quad (5)$$

La ecuación de Antoine (29) también correlaciona presiones de vapor con temperatura para sustancias en un intervalo mayor. En el caso del agua, la ecuación que es válida entre 0 y 200°C es:

$$P = e^{23,238 - \frac{3841}{T-45}} \quad (6)$$

Sharma y Mullic (21) presentan una ecuación de Keenan y Keyes (1936) para calcular la presión de vapor del agua, la cual es válida entre 10 y 150°C, mediante:

$$P = 165960,72 \times 10^{-N} \quad (7)$$

Según Sampathkumar (27), el coeficiente de transferencia de calor de convección se puede expresar por:

$$h_{c,w-v} = 0,884[\Delta T']^{1/3} \quad (10)$$

$$\Delta T' = (T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_{vi})(T_w)}{(268,9 \times 10^3 - P_w)} \quad (11)$$

Donde

P_w = presión de vapor del agua a la temperatura T_w , [Pa], y

P_{vi} = presión de vapor del agua a la temperatura de la pared interna del vidrio, [Pa].

Estas correlaciones son válidas para temperaturas de operación alrededor de 50°C y un valor de $\Delta T'$ alrededor de 17°C, además son independientes del volumen de la cámara y válidas solamente para el flujo de calor hacia arriba en el espacio cerrado entre las superficies de evaporación y condensación.

Donde:

$$N = \frac{[X(a + bX + cX^3)]}{[T(1 + dX)]},$$

$$X = 647,27 - T,$$

T = temperatura [°C],

$$a = 3,2437814,$$

$$b = 5,86826 \times 10^{-3},$$

$$c = 1,1702379 \times 10^{-8}, \text{ y}$$

$$d = 2,1878462 \times 10^{-3}.$$

Transferencia de calor interna

Comprende la energía transferida desde la superficie del agua hacia la superficie interna del vidrio que ocurre principalmente por radiación, convección y evaporación (27).

Calor transferido por convección. Se define el calor de convección $q_{c,w-v}$ en W/m² transferido desde la superficie del agua hacia el vidrio (30) por la Ecuación 8.

$$q_{c,w-v} = h_{c,w-v} (T_w - T_{vi}) \quad (8)$$

Cooper (18), Sharma y Mullick (21) y Sampathkumar (27) establecen el flujo de calor desde la superficie del agua hacia el vidrio usando las ecuaciones de Dunkle:

$$q_{c,w-v} = 0,884 [(T_w - T_{vi}) + (\frac{P_w - P_{vi}}{268,9 \times 10^3 - P_w}) (T_w + 273)]^{1/3} (T_w - T_{vi}) \quad (9)$$

Calor transferido por radiación. La Ecuación 12 define el calor transferido por radiación entre la superficie del agua y la superficie interna del vidrio (30):

$$q_{r,w-v} = h_{r,w-v} (T_w - T_{vi}) \quad (12)$$

Donde:

$q_{r,w-v}$ = calor transferido por radiación, [W/m²],

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se define en la Ecuación 13 empleando la constante de Stefan-Woltzman σ :

$$h_{r,w-v} = \varepsilon_{ef} \sigma \frac{(T_w^4 - T_{vi}^4)}{(T_w - T_{vi})} \quad (13)$$

Donde:

ε_{ef} = emisividad efectiva, adimensional, y

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴].

Cooper (18) y Sharma-Mullick (21) establecen como un valor estimado de 0,9; reemplazándolo en la ecuación 13 y ésta en la 12 se obtiene:

$$q_{r,w-v} = 0,9 \cdot \sigma [(T_w)^4 - (T_{vi})^4] \quad (14)$$

Para obtener datos más exactos o casos particulares, la emisividad efectiva se calcula a partir de las emisividades del vidrio ε_v y del agua ε_w , mediante la Ecuación 15 (27).

$$\varepsilon_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad (15)$$

Calor transferido por evaporación. El calor $q_{e,w-v}$ en W/m^2 transferido por evaporación desde el agua hacia el vidrio, como función del calor de convección, según Cooper (18) es:

$$q_{e,w-v} = 16,273 \times 10^{-3} q_{c,w-v} \frac{(P_w - P_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (16)$$

Los valores de los coeficientes están relacionados de acuerdo con Setoodeh (31) mediante la Ecuación 17, donde se asume que el calor de vaporización del agua es constante.

$$h_{e,w-v} = 16,273 \times 10^{-3} h_{c,w-v} \frac{(P_w - P_{vi})}{(T_w - T_{vi})} \quad (17)$$

El coeficiente de transferencia de calor por evaporación según Sharma y Mullick (21) es definido por la Ecuación 18. Esta ecuación incluye las variaciones del calor de vaporización del agua con la temperatura.

$$h_{e,w-v} = \frac{6,86 \times 10^{-9} h_{c,w-v} (P_w - P_{vi}) h_{fg}}{(T_w - T_{vi})} \quad (18)$$

Coefficiente total de transferencia entre el agua y el vidrio. De acuerdo con el balance expresado en la Ecuación 2, el coeficiente total de transferencia se puede calcular por la Ecuación 3 (27).

Transferencia de calor externa. El calor se pierde en el destilador solar desde la superficie del vidrio hacia el ambiente por convección natural y radiación, y por las paredes y el fondo del destilador solar, que tienen un material aislante, por radiación y convección (27). Se analizará únicamente el calor perdido por el vidrio al ambiente por convección natural, y por radiación; asumiendo que en comparación con aquellos, el calor perdido por las paredes y el fondo es despreciable.

Calor transferido por convección. Las pérdidas de calor por convección $q_{c,v-a}$ en W/m^2 del destilador se pueden expresar en función de la velocidad del viento. Aboul-Einein (22), Shukla (32)] y Sampathkumar (27) emplean para el calor perdido y el coeficiente de transferencia entre el vidrio y el ambiente una correlación propuesta por Duffie and Beckman (1980):

$$q_{c,v-a} = h_{c,v-a} (T_{vo} - T_a) \quad (19)$$

$$h_{c,v-a} = 2,8 + 3,0V \quad (20)$$

Donde:

V = velocidad del viento [m/s].

El coeficiente de transferencia de calor por convección perdido por el destilador solar desde el vidrio hacia la atmósfera, o hacia el cielo, según Sharma y Mullick (21) se define en la Ecuación 21:

$$h_{c,v-a} = h_w \frac{(T_{vo} - T_a)}{(T_{vo} - T_c)} \quad (21)$$

Donde

$h_{c,v-c}$ = coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m^2], y

h_w = coeficiente de transferencia de calor debido al viento [W/m^2].

Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre el vidrio y el ambiente. El coeficiente de transferencia de calor de radiación transferido entre el vidrio y el ambiente definido por Mullick (21) es:

$$h_{r,v-a} = \varepsilon_v \sigma (T_{vo}^2 - T_c^2) (T_{vo} - T_c) \quad (22)$$

Donde:

ε_g = emisividad del vidrio, adimensional

T_c = temperatura del cielo, [K].

Coefficiente de pérdidas totales de calor entre el vidrio y el ambiente. Este coeficiente comprende la suma de las pérdidas por convección y por radiación, y se expresa mediante la Ecuación 23:

$$h_{t,g-s} = h_{c,v-c} + h_{r,v-a} \quad (23)$$

Donde:

$h_{t,g-s}$ = coeficiente total de transferencia de calor entre el vidrio y el ambiente, [W/m^2K],

Reemplazando las definiciones de la ecuación 21 y 22 en la ecuación 23 se obtiene:

$$h_{t,v-c} = h_w \frac{(T_{v0} - T_a)}{(T_{v0} - T_c)} + \varepsilon_v \sigma (T_{v0}^2 - T_c^2) (T_{v0} - T_c) \quad (24)$$

Algunos autores (1, 27, 33) emplean para el cálculo del coeficiente de pérdidas totales desde el vidrio al ambiente en función de la velocidad del viento una correlación que se muestra en la Ecuación 25.

$$h_{t,v-a} = 5,7 + 3,8V \quad (25)$$

Indicadores de rendimiento

Productividad empleando el calor de evaporación. La tasa de evaporación de agua instantánea \dot{m}_{ew} en kg/s, de acuerdo con Mowla (34), está dada por:

$$\dot{m}_{ew} = \frac{q_{ew}}{h_{fg}} \quad (26)$$

La evaporación M_{ew} para un período de tiempo t es:

$$M_{ew} = \int_0^t \dot{m}_{ew} dt \quad (27)$$

Si el período de tiempo es una hora, en segundos, se tiene (20, 22, 32):

$$m_{ew} = \frac{q_{ew}}{h_{fg}} \times 3600 \quad (28)$$

Para Setoodeh (31) y Sampathkumar (27) la masa de agua evaporada m_{ew} en un período de tiempo t se puede calcular por la Ecuación 29.

$$m_{ew} = \frac{q_{ew} A_w t}{h_{fg}} \quad (29)$$

Sampathkumar (27) define la producción diaria, incluyendo las horas de la noche, como:

$$M_{ew} = \sum_{i=1}^{24} m_{ew} \quad (30)$$

$$h_{fg} = 2,4935 \times 10^6 [1 - 9,4779 \times 10^{-4} T_v + 1,3132 \times 10^{-7} T_v^2 - 4,7974 \times 10^{-9} T_v^3] \quad (38)$$

Productividad empleando los números adimensionales Pr y Gr. Este método (19, 27), emplea los números adimensionales de Prandtl y Grashoff, como se muestra en la Ecuación 31.

$$h_{e,w-v} = 0,016273 \frac{k}{d} C (GrPr)^n \frac{(P_w - P_v)}{(T_w - T_{vi})} \quad (31)$$

Donde:

k = conductividad térmica del aire húmedo [W/m°C], y

d = longitud media característica entre las superficies de evaporación y de condensación [m],

C = constante, adimensional

Gr = número de Grashoff, adimensional y

Pr = número de Prandtl, adimensional.

Los números adimensionales de Grashoff y Prandtl son:

$$Gr = \frac{\beta g d^2 \rho^2 \Delta T'}{\mu^2} \quad (32)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (33)$$

Donde:

β = factor del coeficiente volumétrico de expansión térmica del aire [K⁻¹],

ρ = densidad del vapor [kg/m³], y

μ = viscosidad del aire húmedo [Pa.s].

Setoodeh (31) también presenta una correlación para ciertas propiedades que se evalúan a T_v que es la temperatura promedio entre T_w y T_g :

$$T_v = \frac{T_w + T_g}{2} \quad (34)$$

$$\beta = \frac{1}{(T_v + 273)} \quad (35)$$

$$\rho = \frac{353,44}{(T_v + 273,15)} \quad (36)$$

$$k = 0,0244 + 0,7673 \times 10^{-4} T_v \quad (37)$$

Donde para $T < 70^\circ\text{C}$ el calor latente de vaporización del agua h_{fg} es:

Para la viscosidad:

$$\mu = 1,718 \times 10^{-5} + 4,620 \times 10^{-8} T_v \quad (39)$$

Reemplazando las definiciones y despejando, se establece (19) que la productividad m_{ew} se puede calcular empleando los números de Grashoff y Pandtl mediante la Ecuación 41:

La capacidad calorífica del aire:

$$C_p = 999,2 + 0,1434 T_v + 1,101 \times 10^{-4} T_v^2 - 6,7581 \times 10^{-8} T_v^3 \quad (40)$$

$$m_{ew} = \frac{0,016273}{h_{fg}} \frac{k}{d} A_w t (P_w - P_g) C (GrPr)^n \quad (41)$$

Los valores de C y n se calculan, como propone Tiwari (33), mediante regresiones a partir de datos experimentales; en su trabajo, Sampathkumar (27) establece que C y n dependen del diseño específico

de cada destilador solar y del intervalo de temperatura del agua en que operan, por lo que se deben determinar en cada caso particular. En la Tabla 1 se presentan algunos valores reportados para C y n.

Tabla 1. Valores de C y n reportados y su rango de validez

Autor	C	n	Intervalo de validez
Kumar y Tiwari (19)	0,0322	0,4110	$1,794 \times 10^6 < Gr < 5,724 \times 10^6$
Tiwari (33)	0,0112	0,4088	
	0,0621	0,3999	
Sampathkumar (27)	0,0750	0,3300	$Gr > 3,2 \times 10^5$
Shukla (32)	0,079-0,065	0,329-0,378	

Productividad empleando la radiación solar incidente. P. I. Cooper (18) en su trabajo presenta una correlación lineal, válida para niveles de radiación I_h entre 0,4 y 1,39 kW/m² y para una temperatura ambiente de 30°C, para calcular la productividad instantánea la cual se muestra en la Ecuación 42.

$$\dot{m}_{ew} = 3,125 \times 10^{-4} I_h - 3,438 \times 10^{-5} \quad (42)$$

Eficiencia máxima teórica a partir de la radiación solar. Cooper (18) presenta una ecuación para hallar la eficiencia máxima teórica diaria que se muestra en la Ecuación 45. Empleando esta ecuación se obtienen datos más altos que los hallados empleando la ecuación 44 para el mismo caso.

$$\eta_o = 0,727 - 2,88 \times 10^{-2} \frac{\theta_s}{I_r} \quad (44)$$

Eficiencia

A partir del agua evaporada. Para calcular la eficiencia η_t de un destilador solar pasivo a partir del calor de vaporización la masa de agua condensada y la radiación incidente medida, se emplea la Ecuación 43 (20):

$$\eta_t = \frac{\sum m_{ew} h_{fg}}{[\sum I_h(t) A_s] \Delta t} \quad (43)$$

Donde:

A_s = superficie de la base del destilador, [m], y Δt = período de tiempo, [s].

Donde:

η_o = eficiencia máxima teórica diaria, adimensional, θ_s = horas de luz de un día medidas desde la salida del sol hasta el ocaso, [h].

Para los cálculos se consideran los datos (35) de un destilador solar con los valores presentados en la Tabla 2 (22):

Donde x_a y x_v son el espesor del agua y del vidrio respectivamente y k_v la conductividad térmica del vidrio.

Tabla 2. Parámetros del destilador solar pasivo.

$A_w = 1,000 \text{ m}^2$	$R_v = 0,05$
$A_v = 1,035 \text{ m}^2$	$R_w = 0,05$
$x_a = 0,040 \text{ m}$	$\epsilon_w = 0,95$
$x_v = 0,004 \text{ m}$	$\epsilon_v = 0,94$
$d = 0,45 \text{ m}$	$\alpha_v = 0,05$
$k_v = 0,0351 \text{ W/m K}$	$\theta = 15^\circ$

Resultados

Desviaciones de las correlaciones para estimar la presión de saturación de vapor del agua. La presión de vapor del agua entre 0 y 100°C calculada mediante las correlaciones de Antoine, Sharma y Dunkle difieren entre sí y con respecto a los datos de Lemmon, McLinden y Friend reportados en Perry (36); su desviación se muestra en la Figura 4.

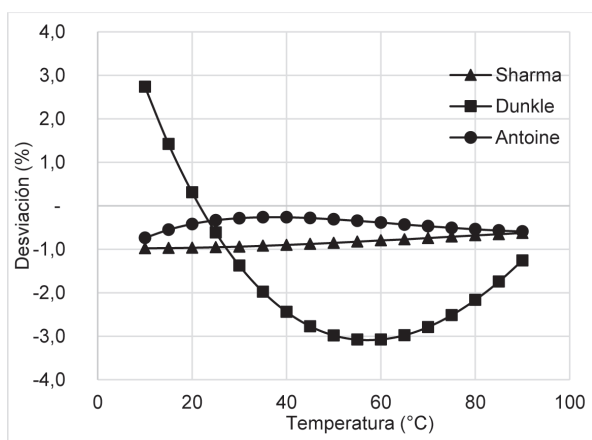


Figura 4. Desviación porcentual de la presión de vapor del agua calculada según las correlaciones de Dunkle, Antoine y Sharma-Mullick (Keenan-Keyses).

Se aprecia que la correlación de Dunkle es la que presenta mayores desviaciones, entre +2,7 y -3,1%, mientras que los menores valores son para la de Antoine con -0,4 y 0,7%.

Transferencia de calor interna

Calor de convección

En la Figura 5 se muestra el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección en función de la temperatura del agua T_w y la temperatura de la cara interna del vidrio T_{vi} . Se aprecia que se incrementa a medida que aumenta T_w y disminuye T_{vi} .

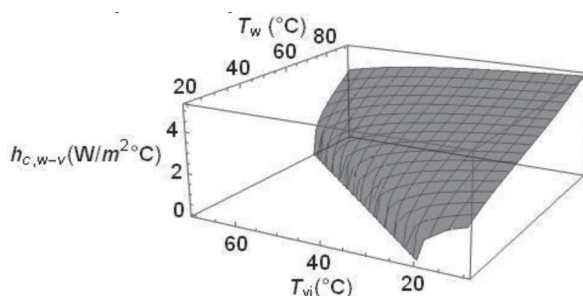


Figura 5. Coeficiente de transporte de calor por convección $h_{c,w-v}$ en función de las temperaturas del agua T_w y del vidrio T_{vi} .

Calor transferido por radiación

El comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por radiación con respecto a las temperaturas del agua T_w y del vidrio T_{vi} , se aprecia en la Figura 6. El coeficiente puede alcanzar 9,0 $\text{W/m}^2\text{°C}$ cuando la diferencia de temperatura es de 50°C, valores superiores, cuando ambas temperaturas son iguales o la temperatura del vidrio es mayor que la del agua, carecen de sentido físico. La magnitud del coeficiente aumenta a medida que se incrementa la temperatura del agua y disminuye la temperatura del vidrio.

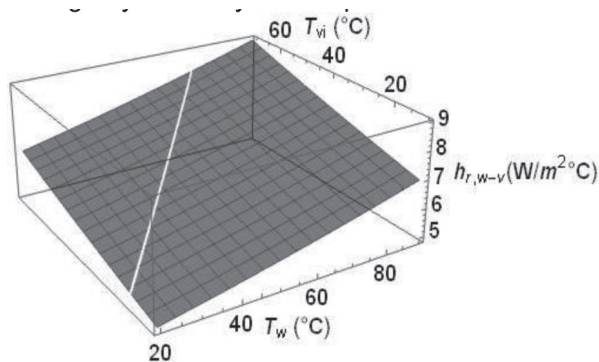


Figura 6. Coeficiente de transporte de calor por radiación $h_{r,w-v}$ en función de las temperaturas del agua y del vidrio.

Calor de evaporación

El comportamiento del coeficiente de transferencia de calor de evaporación calculado a partir de la ecuación 17 en función de las temperaturas del agua y del vidrio se muestra en la Figura 7. El valor que alcanza este coeficiente es mucho mayor en magnitud que el calor de convección y el calor de radiación, alrededor de 120 W/m²°C para diferencias de temperatura de 60°C, el segmento donde la temperatura del vidrio es mayor que la del agua, carece de sentido físico.

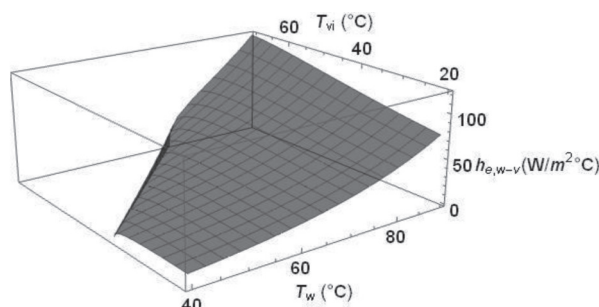


Figura 7. Coeficiente de transporte de calor por evaporación propuesto por Mowla y Tiwari $h_{e,w-v}$ en función de las temperaturas del agua T_w y la cara interna del vidrio T_{vi} .

Los valores calculados con las Ecuaciones 17 y 18 varían muy poco. El comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua y la superficie interna del vidrio calculado mediante la Ecuación 18 se muestra en la Figura 8.

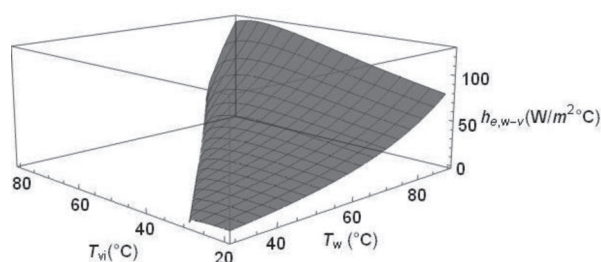


Figura 8. Coeficiente de transporte de calor de evaporación $h_{e,w-g}$ considerando el calor de vaporización variable en función de las temperaturas del agua y del vidrio.

Coeficiente total de transferencia entre el agua y el vidrio

Corresponde a la suma del calor transferido por radiación, convección y evaporación, se calcula con la ecuación 3 y se muestra en la Figura 9. Este coeficiente puede alcanzar hasta 135 W/m²°C para diferencias de temperatura de 50 °C.

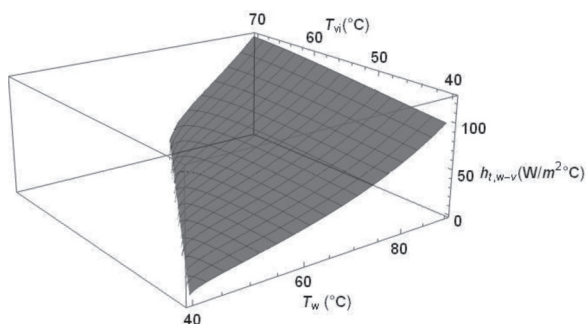


Figura 9. Coeficiente total de transferencia de calor entre el agua y el vidrio $h_{t,w-v}$ en función de las temperaturas del agua T_w y la cara interna del vidrio T_{vi} .

Indicadores de rendimiento

Productividad empleando el calor de evaporación

El comportamiento de la productividad diaria calculada a partir de los coeficientes de transferencia por convección y por evaporación, por la Ecuación 30, se observa en la Figura 10 en función de T_w y T_{vi} .

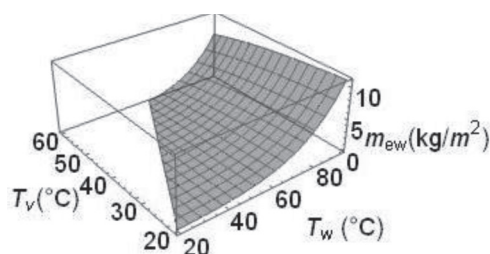


Figura 10. Productividad diaria del destilador calculada empleando los coeficientes de transferencia, en función de las temperaturas del agua T_w y la cara interna del vidrio T_{vi} .

Productividad empleando números adimensionales

En la Figura 11 se observa el comportamiento de la productividad en función de las temperaturas del agua y del vidrio, donde se han empleado 0,0112 y 0,4088 para C y n respectivamente. Se debe notar que en este caso, los valores de productividad son menores que aquellos mostrados en la Figura 10 en las mismas condiciones de temperatura calculadas empleando el calor de evaporación. Los valores máximos reportados en la práctica alcanzados para la productividad son alrededor de 0,550 kg/m²h (33). Se aprecia que la productividad aumenta con el incremento de la temperatura del agua y la disminución de la temperatura del vidrio.

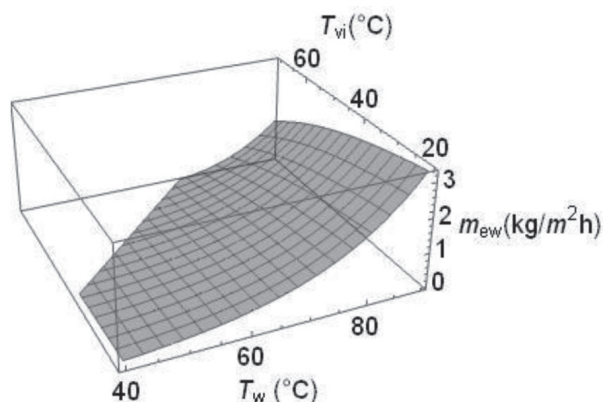


Figura 11. Productividad de destilado calculada empleando los números adimensionales, en función de las temperaturas del agua T_w y del vidrio T_{vi} .

Magnitudes de los coeficientes de transferencia

Empleando los modelos de transferencia descritos, se puede calcular un rango que pueden alcanzar

los valores de los coeficientes de transferencia de calor, que se muestra en la Tabla 3.

En la tabla 3 se aprecia que en condiciones de bajas temperaturas y con una baja velocidad del viento, el total de energía incidente solamente se puede aprovechar en un 37 % sin considerar las pérdidas por reflexión del material transparente que varían entre 10 y 15 % de la radiación incidente (18), y en condiciones de alta temperatura y alta velocidad de viento este calor evaporativo puede alcanzar hasta un 62 % del total. Esto es en condiciones ideales, considerando por ejemplo que todo el tiempo el cristal del evaporador está en posición perpendicular respecto a la radiación incidente, lo cual no se cumple en los evaporadores solares pasivos. La velocidad del viento afecta de dos maneras el proceso; enfriando la cara externa del vidrio del evaporador y ayudando en la condensación, y al mismo tiempo enfriando el resto del equipo, por lo que una alta velocidad incrementa las pérdidas por convección.

Tabla 3. Valores que alcanzan los coeficientes de transferencia de calor en los destiladores solares pasivos

	Coeficiente de transferencia de calor (W/m ² h)	
	Mínimo	Máximo
Transferencia de calor interna	$T_v = 40^\circ\text{C}$ y $T_w = 50^\circ\text{C}$	$T_v = 50^\circ\text{C}$ y $T_w = 90^\circ\text{C}$
Por convección	2,61	3,98
Por radiación	5,68	8,99
Por evaporación	10,56	122,20
Transferencia de calor externa	Velocidad del viento $V = 1$ m/s	Velocidad del viento $V = 15$ m/s
Pérdidas por convección	5,8	47,8
Pérdidas totales	9,5	62,7

Productividades teóricas y experimentales

Se ha calculado la productividad máxima teórica a partir de la radiación solar mediante la ecuación 44 y se muestra junto con los datos obtenidos experimentalmente en varios ensayos en la Figura 12.

Las máximas productividades teóricas se ubican entre 0,42 y 0,75 kg/h mientras que las experimentales alcanzan máximos entre 0,15 y 0,30 kg/h. De acuerdo con el atlas publicado por

el Banco Mundial (25), hay zonas de alta radiación solar que alcanzan un promedio anual entre 7,2 y 7,4 kW.h/m², empleando este modelo (18), el valor de productividad de 6,7 a 6,9 kg/m²día representa un máximo teórico en condiciones ideales.

Se ha calculado la eficiencia máxima teórica empleando la Ecuación 43 del modelo de radiación solar y se presenta en la Figura 13 junto con la eficiencia obtenida experimentalmente en varios ensayos.

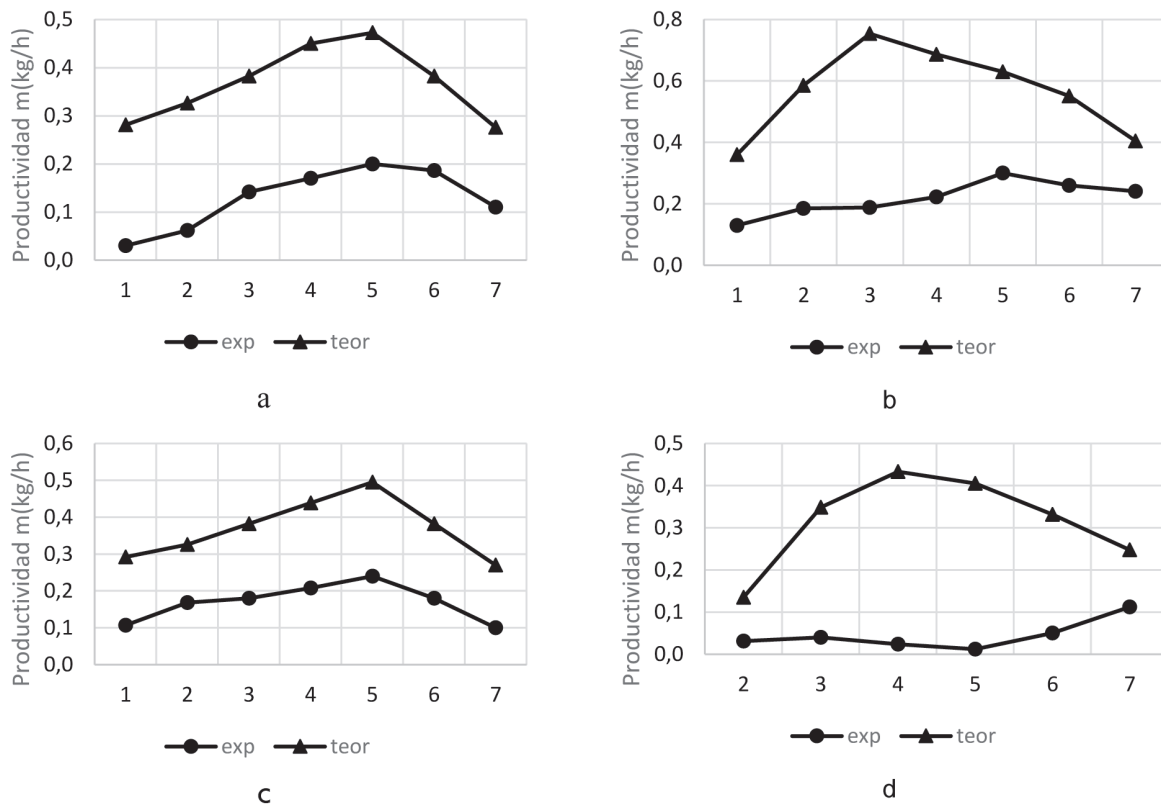


Figura 12. Comparación de productividades máxima teórica y experimental para cuatro casos. a) Shukla (32), b) (32), c) (32) y d) Dev (37).

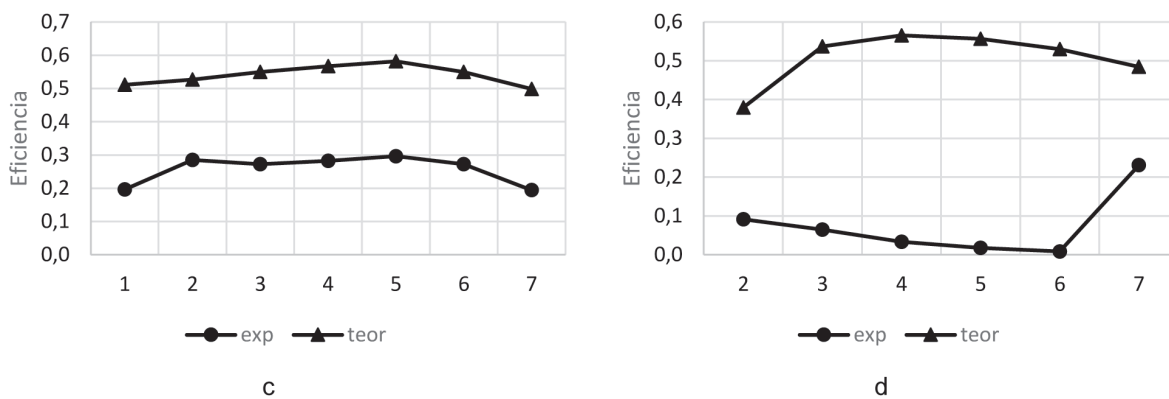


Figura 13. Comparación de eficiencia máxima teórica y experimental para cuatro ensayos. a) Shukla (32), b) (32), c) (32) y d) Dev (37)

Se aprecia que la eficiencia máxima teórica alcanza valores entre 0,25 y 0,63 mientras que los datos experimentales se ubican entre 0,01 y 0,45.

Conclusiones

1. En un destilador solar pasivo siempre estarán presentes los mecanismos de transferencia por convección y radiación al interior, así como las pérdidas por reflexión y convección al exterior, por lo tanto el calor aprovechable máximo teórico para evaporar el agua oscilará entre 33 y 56 % de la radiación solar total en condiciones ideales.
2. El rendimiento del destilador solar calculado mediante el modelo de los coeficientes de transferencia de calor, y el calculado empleando las correlaciones de los números adimensionales proporcionan datos que representan con precisión el fenómeno, mientras que las correlaciones basadas en la radiación solar presentan los máximos teóricos para productividad y eficiencia, que son coherentemente superiores a los medidos en todos los casos.
3. La productividad de los destiladores solares pasivos en función de la irradiación solar disponible, tiene límites termodinámicos definidos para su productividad entre 6,7 y 6,9 kg/m²día, los cuales están determinados por la intensidad de la radiación solar incidente, los materiales de construcción, las condiciones locales de temperatura y la velocidad del viento.

Referencias bibliográficas

- [1] Dwivedi V, Tiwari G. Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode. *Desalination*. 2010;250(1):49-55.
- [2] Hernández H, Rubalcaba E, Hermosillo J-J. Improvement of a MEH desalination unit by means of heat recovery. *Energy Procedia*. 2014;57:2781-6.
- [3] Moya EZ, editor *Desalinización del agua del mar mediante energías renovables*. Actas del I y II seminario del agua; 1997: Instituto de Estudios Almerienses.
- [4] Tiwari G.N. SHN, Tripathi R. Present status of solar distillation. *Solar energy*. 2003;75:7.
- [5] Moore BA, Martinson E, Raviv D. Waste to water: a low energy water distillation method. *Desalination*. 2008;220(1-3):502-5.
- [6] Youssef P, Al-Dadah R, Mahmoud S. Comparative analysis of desalination technologies. *Energy Procedia*. 2014;61:2604-7.
- [7] Al-Weshahi MA, Tian G, Anderson A. Performance enhancement of MSF desalination by recovering stage heat from distillate water using internal heat exchanger. *Energy Procedia*. 2014;61:381-4.
- [8] Darwish M. Qatar water problem and solar desalination. *Desalination and Water Treatment*. 2014;52(7-9):1250-62.
- [9] Khayet M. Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review). *Desalination*. 2013;308:89-101.
- [10] Ma Q, Yi C, Lu H, Xie L, Fan J, He W. A conceptual demonstration and theoretical design of a novel "super-gravity" vacuum flash process for seawater desalination. *Desalination*. 2015;371:67-77.
- [11] El-Sebaei A, El-Bialy E. Advanced designs of solar desalination systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;49:1198-212.
- [12] Asiedu-Boateng P, Nyarko B, Yamoah S, Ameyaw F, Tuffour-Acheampong K. Comparison of the Cost of Co-Production of Power and Desalinated Water from Different Power Cycles. *Energy and Power Engineering*. 2013;5(01):26.
- [13] Hamed OA, Kosaka H, Bamardouf KH, Al-Shail K, Al-Ghamdi AS. Concentrating solar power for seawater thermal desalination. *Desalination*. 2016;396:70-8.
- [14] Gabriel KJ, Linke P, El-Halwagi MM. Optimization of multi-effect distillation process using a linear enthalpy model. *Desalination*. 2015;365:261-76.
- [15] Compain P. Solar energy for water desalination. *Procedia Engineering*. 2012;46:220-7.
- [16] Abdelmoez W, Mahmoud MS, Farrag TE. Water desalination using humidification/dehumidification (HDH) technique powered by solar energy: a detailed review. *Desalination and Water Treatment*. 2014;52(25-27):4622-40.
- [17] Abdallah SB, Frikha N, Gabsi S. Study of the performances of different configurations of seawater desalination with a solar membrane distillation. *Desalination and Water Treatment*. 2014;52(13-15):2362-71.

- [18] Cooper P. The maximum efficiency of single-effect solar stills. *Solar Energy*. 1973;15(3):205IN1215-214217.
- [19] Kumar S, Tiwari G. Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. *Solar energy*. 1996;57(6):459-64.
- [20] Goosen MF, Sablani SS, Shayya WH, Paton C, Al-Hinai H. Thermodynamic and economic considerations in solar desalination. *Desalination*. 2000;129(1):63-89.
- [21] Mullick S. Estimation of heat-transfer coefficients, the upward heat flow, and evaporation in a solar still. *Journal of solar energy engineering*. 1991;113:37.
- [22] Aboul-Enein S, El-Sebaei A, El-Bialy E. Investigation of a single-basin solar still with deep basins. *Renewable Energy*. 1998;14(1-4):299-305.
- [23] Ho-ming Yeh N-tM. Energy balances for upward-type, double-effect solar stills. *Energy*. 1990;15(12):9.
- [24] Imad Al-Hayek OB. The effect of using different designs of solar stills on water distillation. *Desalination*. 2004;169:7.
- [25] ESMAP, cartographer World GHI Global horizontal Irradiance Poster map [Map]. www.worldbankgroup.com: Solargis; 2017.
- [26] Yeh H-M, Ma N-T. Energy balances for upward-type, double-effect solar stills. *Energy*. 1990;15(12):1161-9.
- [27] Sampathkumar K, Arjunan T, Pitchandi P, Senthilkumar P. Active solar distillation—a detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(6):1503-26.
- [28] Dunkle R. Solar water distillation: the roof type still and the multiple effect diffusor. *Int Dev in Heat Transfer*;(). 1961.
- [29] Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM, García CR. *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. 7ma ed. Mexico: Interamericana M-H; 2007.
- [30] Cengel Y. *Transferencia de calor y masa*. 3a ed. Mexico: McGraw Hill; 2007.
- [31] Setoodeh N, Rahimi R, Ameri A. Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD. *Desalination*. 2011;268(1):103-10.
- [32] Shukla S, Sorayan V. Thermal modeling of solar stills: an experimental validation. *Renewable Energy*. 2005;30(5):683-99.
- [33] Tiwari G, Shukla S, Singh I. Computer modeling of passive/active solar stills by using inner glass temperature. *Desalination*. 2003;154(2):171-85.
- [34] Mowla D, Karimi G. Mathematical modelling of solar stills in Iran. *Solar Energy*. 1995;55(5):389-93.
- [35] Dev R, Tiwari GN. Characteristic equation of a passive solar still. *Desalination*. 2009;245(1-3):246-65.
- [36] Perry R. GD. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 8 ed. Hill M, editor. New York: McGraw Hill; 2008 2008. 2735 p.
- [37] Dev R, Tiwari G. Characteristic equation of a passive solar still. *Desalination*. 2009;245(1-3):246-65.