



Diseño, construcción y estudio del comportamiento térmico de un destilador de doble caseta con convección natural

Margarita Castillo-Téllez ^{1*}, Beatriz Castillo-Téllez ², Chan González Jorge de J Chan-González.¹, Concepción Mex-Álvarez ¹, Lennin D Chan-Dzib¹, Carlos J Hernández-Estrella.¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, predio s/n por Av Humberto Lanz Cárdenas y Unidad Habitacional Ecológica ambiental, Col. Ex Hacienda Kalá, San Francisco de Campeche 24085, Campeche, México

²Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara. Km. 191, México 45D No. 23, Guadalajara 46200, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: mcastill@uacam.mx

Recibido 30 de julio de 2020; aceptado 27 de septiembre de 2020

RESUMEN

En la mayoría de las regiones alejadas de las grandes ciudades, en las que no se cuenta con infraestructura hidráulica o regiones costeras, el problema de la falta de agua se presenta al mismo tiempo con el problema del abastecimiento de energía eléctrica. Cuando el abastecimiento de agua no es suficiente para una población, se requiere de la perforación de pozos profundos o acarreo de lugares muy lejanos cercanos a ríos o alguna otra fuente superficial, o bien, tratar de desalar el agua de mar; de hecho, existe numerosa evidencia del uso de la energía solar para producir agua potable a partir de agua de mar desde hace muchos años. Los destiladores solares se pueden construir mediante

diferentes configuraciones y con diferentes materiales, y se destinan a muy variados usos. La presente investigación se enfoca en el análisis de las condiciones que influyen directamente sobre el funcionamiento de un destilador solar de doble caseta; se construyó un destilador tomando en consideración el análisis del estado del arte en este campo, así como las características termodinámicas y ópticas de los materiales; además, se estableció un sistema de alimentación de agua continua para el destilador, logrando mantener el nivel constante, y finalmente, se desarrolló un sistema computacional que permite medir en tiempo real el agua destilada producida, esto mediante el uso de una báscula conectada a una computadora personal.

PALABRAS CLAVE: Destilación solar, convección natural, eficiencia térmica, producción de agua

ABSTRACT

In most regions far from large cities, where hydraulic infrastructure or coastal regions are not available, the problem of lack of water is in hand with the problem of electricity supply. When water supply is not sufficient for a population, deep well drilling or hauling from far-flung places near rivers or some other surface source is required, or by trying to desalinated seawater; in fact, there is a lot of evidence of the use of solar energy to produce drinking water from seawater for many years. Solar distillers can be built using different configuration and with different materials, and are intended for many different uses. This research focuses on the analysis of the conditions that directly influence the operation of a double slope solar still; a still was built taking into account the analysis of the state of the art in this field, as well as the thermodynamic and optical characteristics of the materials; thus a continuous water supply system was established for the still, managing to maintain the constant level, and finally, developed a computer system that allows to measure in real time the distilled water produced, this by using a scale connected to a personal computer.

KEY WORDS: Solar distillation, natural convection, thermal efficiency, distilled water.

INTRODUCCIÓN

El proceso de destilación consiste en eliminar los sólidos disueltos en el líquido para obtener un subproducto de mayor pureza, por lo tanto, la destilación constituye una alternativa viable para producir agua potable para el consumo del ser humano.

En un proceso de destilación, es necesario que al líquido se le suministre energía con la finalidad de que cambie de fase. La destilación se basa en el ciclo natural del agua, y al día de hoy, se han logrado desarrollar destiladores solares que mejoran el rendimiento de este proceso, los cuales generalmente se clasifican en dos tipos: pasivos y activos (Hassan et al., 2020).

Existen varios parámetros que se deben estudiar al analizar los aspectos geométricos de los destiladores solares, tales como si la configuración es de una o doble caseta, los materiales utilizados, el ángulo de la cubierta con respecto al absorbedor o charola contenedora del agua a destilar, la profundidad del espejo de agua en el absorbedor, el tipo de aislante que se utilice para evitar pérdida de calor ganado, el espesor del vidrio o material transparente que forma la cubierta o envolvente, entre

otros. En el caso de destiladores de doble caseta, la cubierta se coloca en dirección norte-sur, logrando aprovechar así la radiación solar durante todo el día (Docencia et al., 2010) y buscando optimizar el aprovechamiento de la incidencia solar, ya que la productividad aumenta cuando aumenta la radiación solar incidente (Tarawneh et al., 2007). Se encuentran en la literatura estudios sobre diferentes tipos de destiladores, ya sea con convección natural (Omri et al., 2005) o forzada (Castillo et al., 2015), con aditamentos especiales, como espejos reflectantes, diferentes materiales o acoplamiento de otras tecnologías solares fototérmicas o fotovoltaicas, como por ejemplo, paneles fotovoltaicos (Elbar et al., 2020), tubos evacuados (Fallahzadeh et al., 2020) o concentradores parabólicos (Hassan et al., 2017). Como puede verse, hasta la fecha han sido desarrollados y estudiados diferentes prototipos de destiladores solares de agua, cada uno con diferentes características; sin embargo, todos estos modelos constan de las mismas zonas que son importantes para su buen funcionamiento, es decir, para lograr su análisis energético, se consideran los siguientes componentes: el absorbedor, que es una superficie opaca absorbadora, utilizada o diseñada para obtener la mayor captación solar para el sistema, el

cuerpo de agua que al calentarse se evaporará, y el condensador o cubierta, que es utilizado como superficie en la que se lleva a cabo la condensación del vapor (ITESO, 1995).

En el presente trabajo, se realizó un estudio bibliográfico intensivo y, de acuerdo a los diferentes análisis que se llevaron a cabo para la elección de materiales, se definió el diseño final del destilador, mismo que sirvió como apoyo para lograr optimizar variables y materiales que den como resultado una mayor productividad de agua destilada, buscando obtener un prototipo fabricado con materiales de fácil adquisición y nulo mantenimiento, con la intención de promover la adopción de esta tecnología en hogares mexicanos, presentándose los resultados obtenidos al evaluar su eficiencia térmica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Construcción del destilador experimental.

Para la experimentación, se diseñó y construyó un destilador solar de doble caseta (DSDC) con un colector solar tipo charola, cuyo fondo es de forma cuadrada de 0.5 m de largo, proporcionando un área de captación de 0.25 m². La charola se construyó usando lámina de

cobre de calibre 16, cuyo fondo se recubrió con pintura de color negro mate, buscando que fuera resistente a altas temperaturas para incrementar la absorción de la radiación solar. La envolvente del destilador está formada por vidrio de 3 mm de espesor, colocado a dos aguas a una inclinación de 23° respecto de la horizontal. La figura 1 muestra el destilador solar en operación.

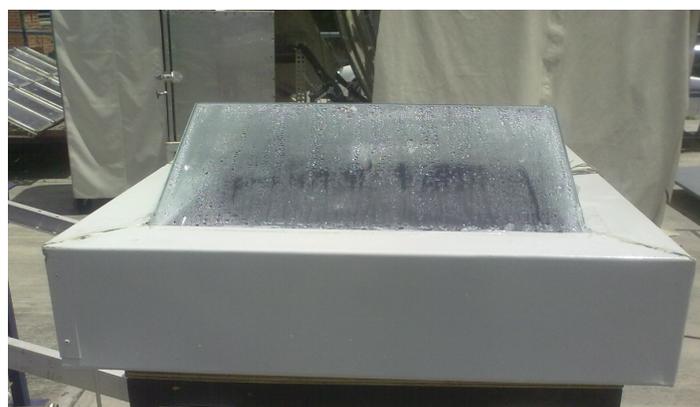


Figura 1. Prototipo del destilador solar en operación.

Las paredes laterales y el fondo de la charola se aislaron térmicamente con espuma de poliuretano de espesor de 10 cm, la cual se cubrió con una protección exterior metálica para garantizar el aislamiento térmico del sistema y disminuir la transferencia de calor hacia el ambiente. Para lograr encontrar el espesor adecuado, se llevaron a cabo una serie de cálculos en los que se involucró la ecuación que modela la conductividad térmica (ecuación de Fourier), descrita en la ecuación 1.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde Q indica la rapidez con la que fluye el calor a través de una capa de espesor (Δx), que es proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT) y el área A , mientras que k es la constante de conductividad.

Se consideraron las temperaturas de ambos materiales para la base interna del absorbedor, y se tomó como referencia una temperatura de 60 °C (Castillo, 2008), mientras que para la cara exterior del aislamiento, se consideró la temperatura ambiente y se sumó a ésta incrementos de 5° C hasta llegar a 500° C. Los cálculos se realizaron para realizar una comparación entre diferentes materiales aislantes, resultando el más adecuado el poliuretano.

El flujo de calor a través de la pared, compuesta por el cobre y la espuma de poliuretano, se muestra en la figura 2.

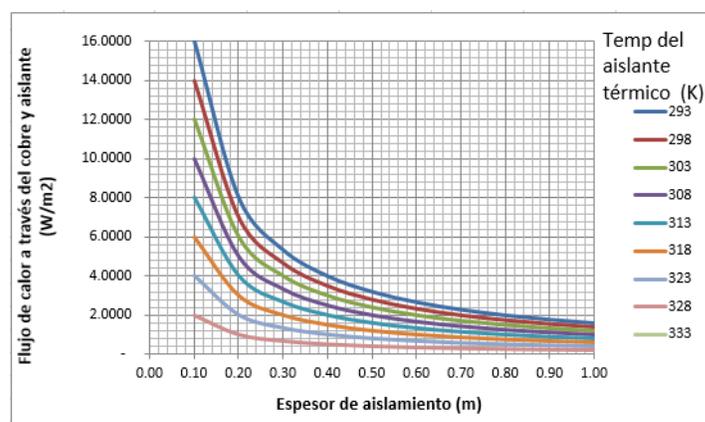


Figura 2. Diferentes espesores de la espuma de poliuretano con respecto al flujo de calor a través del cobre y el aislante.

El destilador se diseñó con un orificio a uno de sus costados para alimentar la charola con una manguera de ¼ de pulgada con el agua a destilar. En la base del mismo y en una esquina, se ubicó otro orificio con la finalidad de eliminar la salmuera.

Cabe señalar que la cubierta tiene una función básica dentro del desempeño general del destilador, la cual consiste en permitir la mayor transmisión de radiación solar al sistema y la menor absorción. Para seleccionar cual debe ser la cubierta óptima, se realizó un estudio sobre las características ópticas de materiales transparentes disponibles en el mercado, tales como vidrio, acrílico y policarbonato, que fueron medidos mediante dos técnicas: un fotodiodo para medir los efectos de atenuación en la transmisión de la luz solar

cuando incide normalmente a la superficie de las cubiertas consideradas, y un espectrofotómetro de doble haz con un intervalo de 290 a 2500 nm, de la marca Shimadzu modelo PC201, para conocer el espectro de la transmisión, reflexión y absorción en función de la longitud de onda de la radiación solar. Se muestra en la figura 3 la absorbancia de los diferentes materiales analizados y se adiciona el espectro de la radiación solar con fines comparativos para poder realizar la selección del material para la cubierta.

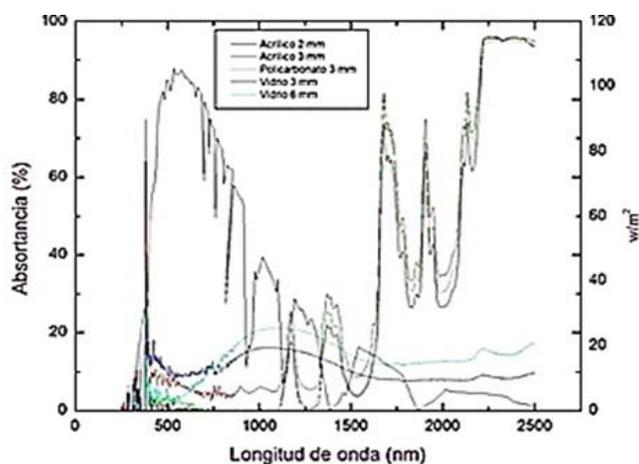


Figura 3. Espectro de la transmisión óptica de los materiales analizados comparados con el espectro de la radiación solar bajo condiciones.

Fuente: elaboración propia.

Las cubiertas de vidrio se sellaron con silicón para eliminar fugas de vapor de agua y disminuir así las pérdidas de agua destilada.

En la parte central del DSDC, se encuentra un recipiente que distribuye el agua al destilador, manteniendo un nivel constante de agua salubre a tratar. Asimismo, se registra de manera continua la cantidad de agua destilada mediante una computadora portátil, conectada por un puerto serial a la báscula que contiene el agua destilada.

La función del absorbedor dentro del desarrollo del destilador requiere que sus características básicas presenten un alto valor de conductividad térmica, para poder transmitir a la masa de agua el calor y una excelente capacidad anticorrosiva, esto con el fin de elegir el material más adecuado. También se analizó la conductividad térmica de diferentes metales, y con base en dicho análisis, se seleccionó el cobre.

Instrumentación del destilador solar.

Se adquirieron datos diariamente mediante un adquisidor de datos Campbell modelo CR-10; se utilizaron sensores LM-335 para obtener temperaturas diarias del absorbedor, caseta, agua a destilar y aislante, y se midieron cada diez minutos (figura 4). Además, se adquirió información meteorológica diaria: irradiancia solar, temperatura ambiente, velocidad, dirección del viento y humedad relativa, las cuales se registran de

manera continua en el Instituto de Energías Renovables (IER) en Temixco, Morelos. En la tabla 1 se presenta la descripción de los datos proporcionados por fabricantes de los diferentes sensores utilizados en esta estación solarimétrica.

Variable	Descripción	Modelo	Calibración
Velocidad y dirección del viento	Wind Sentry mod 03002-5 R.M. Young Company	03002-5	Bianual (fabricante)



Figura 4. Instrumentación del destilador solar y conexiones de sensores al adquisidor de datos.

Tabla 1. Descripción de los instrumentos de medición proporcionados por fabricantes.

Variable	Descripción	Modelo	Calibración
Radiación global	Piranómetro marca Eppley, sensor Campbell	PSP	Anual (IGF-UNAM) (K=7.68)
Temperatura ambiente y humedad relativa	Sensor Campbell, CS500	1000 ΩPRT, DIN 43760B	Bianual (fabricante)

RESULTADOS

Caracterización térmica del destilador solar

Como ejemplo del comportamiento térmico del destilador solar, se presenta un día de prueba. En la figura 5 se pueden observar las temperaturas alcanzadas en las diferentes zonas monitoreadas del prototipo en operación.

La temperatura máxima que alcanza la charola negra llega a 65° C y 6° C en el agua a destilar; en la caseta se midieron 59° C, y en el aislante, la temperatura máxima fue de 30° C. Es importante notar que, mientras se incrementan las temperaturas en cada área del destilador, se incrementa también la producción de agua destilada diaria, así como que la profundidad de agua con la que se trabajó es de 2 mm.

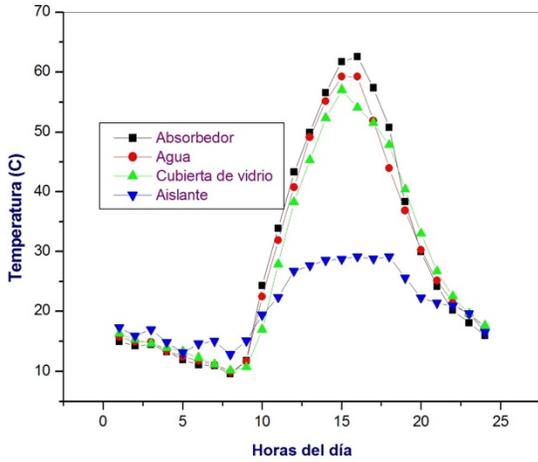


Figura 5. Temperaturas alcanzadas en el destilador solar en un día de pruebas.

La figura 6 muestra la producción de agua obtenida durante un período de 12 días consecutivos, del 12 al 23 de abril, mediciones que fueron las primeras pruebas de operación de agua que se llevaron a cabo en el destilador, las cuales indicaron una producción de agua diaria con temperaturas medias de 63° C en el área evaporación-condensación, con las irradiaciones que se indican en el área del captador, considerando que se recibe para el pico de la irradiancia una potencia de 250 watts de energía solar.

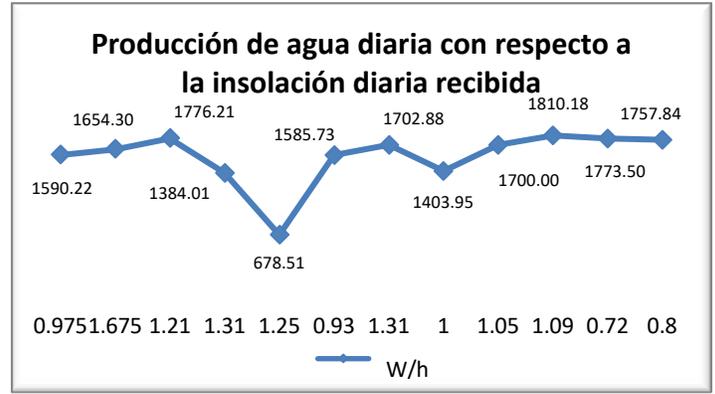


Figura 6. Producción de agua diaria en litros, en función de la insolación de agua recibida en el destilador solar

Simulación del comportamiento térmico del destilador solar.

Se ha desarrollado un programa en Visual Basic que simula el comportamiento esperado del destilador solar, manipulando las variables geométricas, ópticas, térmicas y ambientales para proponer materiales, predecir espesores y climas óptimos para simular la producción diaria de agua destilada en diferentes escenarios (ver figura 7).

Suma_ganancia_energ_esp	25000.2142	mm/ano_esp	0.9	hcost	114402911	W/m2/h	pot_exposicion_esp	400.468	1/h	Suma_ganancia_energ_ano	158.35
Suma_pérdida_energ_esp	14.5913911	mm/ano_esp	0.05	hcost	4760446	W/m2/h	Co_esp	4179	J/kg/K	Pérdida_cabr_ano	8886956
Area_captador	207050209	W/m2	K_agua	0.58	W/mK	hcost_esp	2500	W/m2/h	hcost_esp	0.058	W/m2
Area_destilador	250274635	W/m2	K_vidro	372	W/mK	hcost_esp	7888	W/m2/h	hcost_esp	0.138	W/m2
Area_esp	2500	W/m2	grendel	0.81	W/mK	A	0.25	m2	hcost_esp	1007	J/kg/K
Area_esp	143083074	W/m2	k_esp	0.026	W/mK	L_cabr	0.00161	m	hcost_esp	0.00181	N.s/m2
Calculo_esp	4.7883428	W/m2	k_esp	0.026	W/mK	hcost_esp	235	grosos	hcost_esp	0.432	W/m2
Pot	121648546	Pa	H_Labs	0.0016	m	sigma	5.68E-8	W/m2/K	hcost_esp	64.8E-6	1/h
Paga	117465021	Pa	H_esp	0.05	m	hcost_esp	200	N.s/m2	hcost_esp	47577443	W/m2/K
Tamb	20	°C	Absor_esp_tot	0.2096	%	hcost_esp	900847917191	N.s/m2	hcost_esp	68	N.s/m2
Tair	70	°C	hcost_esp_tot	0.814	%	hcost_esp	174727034642	N.s/m2	hcost_esp	1276204752733	N.s/m2
Tagua	80	°C	hcost_esp_tot	0.9003	%	hcost_esp	13068275420	N.s/m2	hcost_esp	138446344821	N.s/m2
Tabr	80	°C	hcost_esp_tot	0.04	%	hcost_esp	31.6844193699	N.s/m2	hcost_esp	1.833256351035	N.s/m2
Tair	25	°C	hcost_esp_tot	0.13	%	hcost_esp	0.71	N.s/m2	hcost_esp	3.668127007953	N.s/m2
Acumulacion_energ_esp	2159.136	W/m2	hcost_esp_tot	0.1056	%	hcost_esp	0.40	N.s/m2	hcost_esp	15.80	N.s/m2
Max_esp	3.592	kg/m3	Acumulacion_energ_ano	1593.36321	W/m2	hcost_esp	3208.82	W/m2	hcost_esp	5.1778598	W/m2
vol_esp	0.00096	m3	Acumulacion_energ_ano	9179568	kg/m3	hcost_esp	1.93	kg/m3	hcost_esp	18.7414422	kg/m3
densidad_esp	2700	kg/m3	vol_esp	0.0005796	m3	hcost_esp	0.04825	m3	hcost_esp	3074	kg/m3
pot_exposicion_esp	833	J/kg/K	densidad_esp	8933	kg/m3	hcost_esp	40	kg/m3	hcost_esp	0.40	%

Figura 7. Programa desarrollado en Visual Basic de las temperaturas obtenidas en el destilador solar

En la figura 8 se presenta, a manera de ejemplo, un comparativo de la producción de agua a destilar respecto a la simulación obtenida con el programa Visual Basic y datos experimentales.

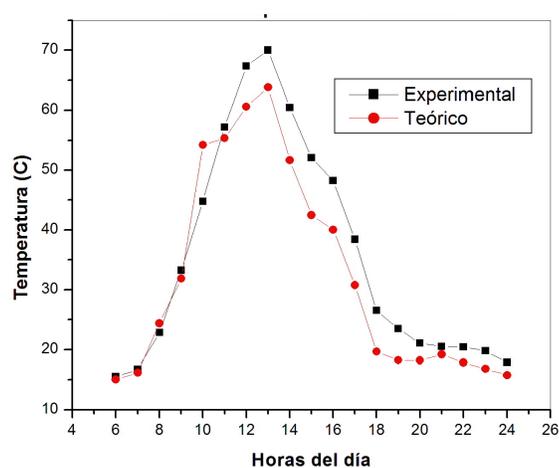


Figura 8. Comparativo de la temperatura del agua a destilar experimental vs teórico.

CONCLUSIONES

El análisis del estado del arte ha contribuido a dar forma a las características geométricas del destilador, determinando los componentes básicos, las dimensiones y los ángulos. El análisis de las características de reflectancia, absorción y transmitancia de los materiales dio excelentes resultados y una guía para la selección de los mismos;

por ejemplo, se pudieron determinar claramente las ventajas de utilizar vidrio (gráfica en la que se analizan las propiedades ópticas) para la caseta, así como el espesor ideal del aislante (gráfica en la que se analizan diferentes aislantes mediante la ecuación de Fourier) para mejorar el rendimiento. Asimismo, se determinó el uso de poliuretano y se fijó el espesor ideal en función del aislamiento deseado dadas sus características.

El desarrollo del programa en Visual Basic, con la finalidad de simular el comportamiento del destilador, es la solución ideal para realizar pruebas futuras sin tener que realizar pruebas físicas, sino únicamente manipulando los valores de las variables involucradas en la eficiencia de los destiladores solares.

BIBLIOGRAFÍA

Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., Sánchez-Juárez, Á., & Fernández-Zayas, J. L. (2015). Experimental study on the air velocity effect on the efficiency and fresh water production in a forced convective double slope solar still. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1192–1200. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.032>

- Castillo Tellez, M. (2008). Desarrollo y análisis energético de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada, 1–70. *Desalination*, 417(February), 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.014>
- Docencia, S., & Manuales, S. (2010). *Investigación y desarrollo Destilación solar de agua de mar en México , 1983 a 2003*.
- Elbar, A. R. A., & Hassan, H. (2020). Enhancement of hybrid solar desalination system composed of solar panel and solar still by using porous material and saline water preheating. *Solar Energy*, 204(February), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.058>
- Fallahzadeh, R., Aref, L., Gholamiarjenaki, N., Nonejad, Z., & Saghi, M. (2020). Experimental investigation of the effect of using water and ethanol as working fluid on the performance of pyramid-shaped solar still integrated with heat pipe solar collector. *Solar Energy*, 207(February), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.032>
- Hassan, H., & Abo-Elfadl, S. (2017). Effect of the condenser type and the medium of the saline water on the performance of the solar still in hot climate conditions. *Desalination*, 417(February), 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.014>
- Hassan, H., Ahmed, M. S., Fathy, M., & Yousef, M. S. (2020). Impact of salty water medium and condenser on the performance of single acting solar still incorporated with parabolic trough collector. *Desalination*, 480(September 2019), 114324. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114324>
- ITESO. (1995). Curso ITESO: Energía Solar, 158. Retrieved from http://www.solartronic.com/download/curso_iteso.pdf
- Omri, A., Orfi, J., & Nasrallah, S. Ben. (2005). Natural convection effects in solar stills. *Desalination*, 183(1–3), 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.025>
- Tarawneh, K., & Muafag, S. (2007). Effect of Water Depth on the Performance Evaluation of Solar Still. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(1), 23–29.
- Toure, S., & Meukam, P. (1997). A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan (Côte d’Ivoire).

Renewable Energy, 11(3), 319–330.

[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00131-](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00131-0)

0