




Desalinizador solar de respuesta rápida: análisis energético y evaluación Fast-response solar desalination plant: energy analysis and evaluation

J. G. Drury-Zamora^a , M. A. Alvarez-Perez^b , J. D. Ponce-Rocha^a 

^a Dirección de Ingeniería y Construcción de Plantas, CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Av. Del Retablo 150, Constituyentes Fovissste, Cp. 76150, Querétaro, Querétaro, México.

^b Dirección de Sistemas Mecánico, CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Av. Manantiales 23-A Parque Industrial Bernardo Quintana, CP. 76246, El Marqués, Querétaro.

Resumen

En este trabajo se evalúa el desempeño energético de un destilador solar (DS), compuesto por un disco concentrador parabólico acoplado a un condensador, empleado para la desalinización de agua mediante la concentración de energía solar. El dispositivo se prueba en condiciones reales de operación durante el 19 y 28 de abril de 2023 ubicado en el sitio con coordenadas 20.570549°N100.271558°W en ciudad de El Marqués, Querétaro. En un día soleado de abril se obtuvieron 0.60 L de agua dulce durante 1.30 h de operación. Por otro lado, con los datos de la caracterización del reflector de disco parabólico, se implementa un modelo para una simulación de trazado de rayos empleando el software Tonatiuh Ray Tracer 2.2.4 los parámetros de simulación corresponden a DNI de 1000 W/m², 1.00E+7 rayos, altura solar 83.68° (correspondiente al medio día solar del 28 de abril) y target rectangular a nivel de la base del recipiente receptor, lo cual permitió determinar la cantidad de energía transferida al receptor y de acuerdo con el análisis energético una capacidad de hasta 3.47 kg de producción de agua dulce durante 4 horas de alta insolación con una eficiencia térmica del 82.00 %.

Palabras Clave: destilación solar, irradiancia solar, agua potable.

Abstract

This study evaluates the energy performance of a solar still (DS), consisting of a parabolic dish concentrator coupled with a condenser, for water desalination using concentrated solar energy. The device is tested under real operating conditions on April 19 and 28, 2023, at a site located at coordinates 20.570549°N, 100.271558°W in Ciudad del Marqués, Querétaro. On a sunny April day, 0.60 L of fresh water was obtained during 1.30 hours of operation. On the other hand, using data from the characterization of the parabolic dish reflector, a model was implemented for a ray tracing simulation using Tonatiuh Ray Tracer 2.2.4 software. The simulation parameters correspond to a DNI of 1000 W/m², 1.00E+7 rays, a solar altitude of 83.68° (corresponding to solar noon on April 28), and a rectangular target at the base level of the receiver vessel. This allowed for the determination of the amount of energy transferred to the receiver. According to the energy analysis, a capacity of up to 3.47 kg of freshwater production during 4 hours of high solar irradiance with a thermal efficiency of 82.00 % was achieved.

Keywords: solar still, solar irradiance, drinking water

1. Introducción

En la tierra existe 1.386 billones de hm³, de los cuales 0.77% es agua dulce accesible al ser humano de acuerdo con la CONAGUA (2022). Por otro lado, Bolisetty et al. (2019) indica que el tratamiento de aguas residuales es típicamente un proceso de múltiples etapas, que envuelve numerosos pasos y varias tecnologías desde la fuente de agua a tratar hasta el agua final, por lo que existen tratamientos primarios como filtración química, coagulación y floculación, tratamientos

secundarios, en la cual naturalmente existen organismos capaces de convertir contaminantes en sustancias más seguras, estos tipos de tratamiento se dividen en dos categorías aeróbicas y anaeróbicas, por último, los tratamientos terciarios o procesos de desalinización, los cuales tiene la finalidad de remover iones de metales pesados, por lo que de acuerdo por el principio físico, así como proceso de cambio de fase y/o sistemas híbridos (IDA, 2011; Feria-Díaz, J.J. et al., 2021; Panagopoulos A., 2021).

*Autor para la correspondencia: jose.drury@ciateq.mx

Correo electrónico: jose.drury@ciateq.mx (José Galen Drury-Zamora), mario.alvarez@ciateq.mx (Mario Alejandro Alvarez-Perez) y jaime.ponce@ciateq.mx (Jaime David Ponce-Rocha).

Siguiendo lo expuesto por Estahbanati, M.K. et al. (2015), una de las energías renovables disponibles para la desalinización de agua salobre es la energía solar, por lo que los destiladores solares pueden clasificarse como pasivos y activos (cuando se integra alguna fuente externa energéticamente), los cuales reciben energía de la irradiación solar. Una de las principales características principales de los destiladores solares es la capacidad de producción de agua destilada, lo cual varía entre 3 a 5 L/m² de área de captación con valores de irradiación solar global entre 850 W/m² a 1,200 W/m². Por otro lado, para la operación de destiladores se identifican **parámetros de diseño** tales como: geometría del destilador solar, inclinación del vidrio, profundidad de la etapa, reflectores y espejos, así como tasa de absorción del basín (Kabeel, A. E et al., 2010; Eze, J. I. & Ojike, O., 2012; Ahmed, H. M. et al., 2014; Kabeel, A. E. et al., 2020; Hammoodi, K. A. et al., 2022; Hussien, H. M., et al. 2023), **parámetros de operación** tales como: adición de surfactantes, coloración de la fuente, flujo de agua, salinidad y contaminantes del agua (IDA, 2011; Feria-Díaz, J. J., et al., 2021; Hammoodi, K. A. et al., 2022; Saavedra, A., et al., 2022; CONAGUA, 2023) y finalmente **parámetros meteorológicos** tales como humedad, nubosidad, polvo, irradiación solar, temperatura y velocidad del viento (Kabeel, A. E et al., 2010; Kabeel, A.E. et al., 2015; Hammoodi, K. A. et al., 2022).

En este trabajo se evalúa el desempeño de un destilador solar (DS), compuesto por un disco concentrador parabólico acoplado a un condensador. El estudio se realiza mediante análisis energético y evaluación experimental del proceso de desalinización de agua mediante la concentración de energía solar.

2. Materiales y Métodos

Se implementó una adecuación de un destilador solar (DS) que incorpora un reflector de plato parabólico fabricado en lámina metálica de bajo calibre y alta reflectividad, complementado con un panel reflector de magnesia. Las dimensiones generales del DS se muestran en la Figura 1a. El DS concentra la energía solar sobre un recipiente hermético de acero que contiene el agua a destilar. El vapor generado se conduce mediante una manguera flexible de alta temperatura hacia un condensador tipo serpentín, donde se recupera el destilado producido durante la ebullición del agua, ver Figura 1b y 1c. Finalmente, el sistema completo se encuentra montado sobre una estructura metálica móvil que permite su orientación manual para el seguimiento del sol, ver Figura 1d.

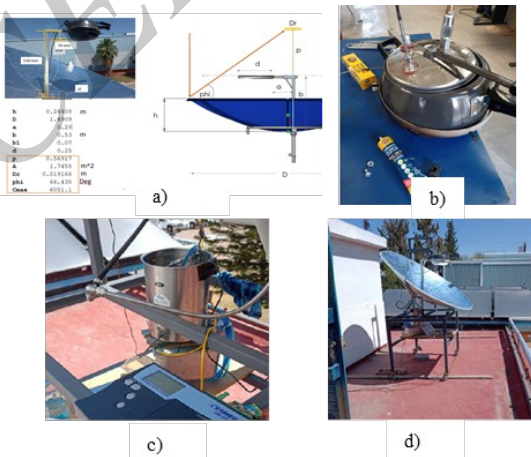


Figura 1: Sistema de desalinización solar: (a) diseño CAD de reflector parabólico, (b) recipiente receptor, (c) condensador y (d) integración completa del sistema de desalinización

El DS es provisto de sensores de temperatura, piranómetros para monitoreo de la irradiación solar, termómetro ambiental y una balanza para el registro del peso del destilado. La instrumentación se integra en un *datalogger* marca Omega® para el registro y monitoreo del proceso de desalinización. Adicionalmente, una cámara termográfica marca Thermocom® que mide la temperatura exterior del recipiente y la calidad del agua durante el proceso de desalinización es medida mediante equipo multiparamétrico. El esquema de instrumentación del DS es mostrado en la Figura 2, mientras que en la Tabla 1, se muestra las dimensiones generales del DS.

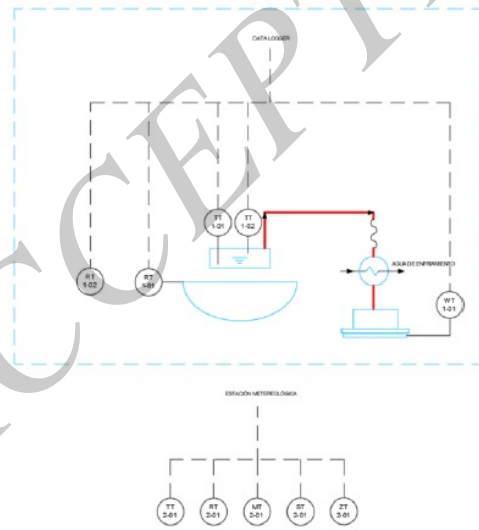


Figura 2: Diagrama de instrumentación del DS

Tabla 1: Dimensiones del reflector parabólico

Parámetro	Valor
Altura de la parábola (<i>h</i>)	0.2441 m
Diámetro de apertura (<i>D</i>)	1.4909 m
Brazo soporte horizontal (<i>a</i>)	0.2800 m
Brazo soporte vertical (<i>b</i>)	0.5300 m

2.1. Caracterización geométrica y metodología de análisis energético

Se realiza la caracterización geométrica de la superficie reflectora del DS para conocer sus atributos ópticos y capacidades en la captación de energía solar. Con base en las dimensiones básicas del reflector parabólico mostrados en la Tabla 1, se puede obtener los siguientes parámetros geométricos:

Distancia focal (*p*), que es la longitud de la región de concentración medida desde el vértice del paraboloide, ecuación (1).

$$p = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{4h}$$

(1)

Diámetro del spot de concentración (D_r), que es la región circular donde incide la radiación solar después de ser reflejada por el paraboloide, ecuación (2).

$$D_r = \frac{D \sin(\theta_s)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \theta_s)} \quad (2)$$

Donde $\theta_s = 0.247^\circ$ es el semi-ángulo que subtende el sol.

Ángulo de borde (ϕ), que es la apertura angular de un rayo reflejado en el canto del reflector y que incide en el centro del spot de concentración, ecuación (3).

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{8 \left(\frac{p}{D} \right)}{16 \left(\frac{p}{D} \right)^2 - 1} \right) \quad (3)$$

Concentración máxima (C_{max}), que es aumento promedio en la intensidad de la radiación solar a causa del reflector, ecuación (4).

$$C_{max} = \left(\frac{D}{D_r} \right) \quad (4)$$

Los parámetros arriba descritos son identificados de manera rápida en el dibujo de la Figura 1a.

Los parámetros de la caracterización serán los datos de entrada para un modelo de trazado de rayos con la finalidad de obtener la fracción de energía solar que es atajada por el receptor, a saber, el *factor de intercepción*, ecuación (5).

$$\gamma = \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

donde E_1 es la energía solar reflejada por el paraboloide y E_2 es la energía concentrada que es interceptada por la base del recipiente receptor.

Para el análisis energético, se determinan los flujos de calor captados y emitidos al entorno por el DS en condición estacionaria para conocer su capacidad de calentamiento y poder de desalinización. En la Figura 3, se identifican estos flujos de calor para determinar el balance energético, se determina la *energía solar* captada por el recipiente receptor, ecuación (6).

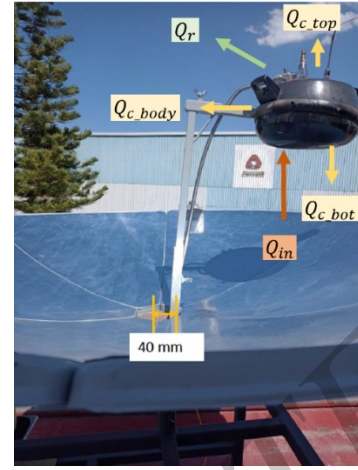


Figura 3: Balance energético

$$Q_{in} = \alpha \rho_r \gamma A_\alpha S \quad (6)$$

Donde α , ρ_r , S son la absorbancia del receptor, la reflectancia del paraboloide y la radiación solar directa que incide sobre el área de apertura del paraboloide A_α , respectivamente. El calor perdido al entorno es dado por contribuciones convectivas y por radiación, ecuación (7), es decir,

$$Q_{loss} = Q_c + Q_r \quad (7)$$

donde el calor perdido por convección en las tapas y cuerpo del recipiente receptor está dado por, ecuación (8).

$$Q_c = Q_{c_{top}} + Q_{c_{body}} + Q_{c_{bot}} = \left(A_{body} h_{c_{body}} + A_{top} (h_{c_{top}} + h_{c_{bot}}) \right) (T_s - T_a) \quad (8)$$

Donde A_{body} y A_{top} son las áreas externas del cuerpo y tapa. Por otro lado, $h_{c_{body}}$, $h_{c_{top}}$, $h_{c_{bot}}$ son los coeficientes convectivos en cuerpo, tapa superior y base del recipiente, respectivamente, que son las cantidades por determinar. En este modelo el recipiente receptor se asume perfectamente cilíndrico con características resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones del recipiente receptor

Parámetro	Valor
Capacidad nominal (V)	5.00 L
Diámetro de la base del recipiente receptor (d_1)	0.1462 m
Espesor (e)	0.0032 m
Volumen exterior (V_{ext})	7.01 L

Por otro lado, el calor perdido por radiación está determinado por ecuación (9).

$$Q_r = h_r (A_{body} + 2 A_{top}) (T_s - T_{sky}) \quad (9)$$

Donde h_r es el coeficiente radiativo y las cantidades T_s y T_{sky} corresponden a las temperaturas en la pared exterior del recipiente y a la temperatura del cielo, respectivamente. Finalmente, el calor neto aprovechado por el DS para la producción de agua dulce, denominado calor útil, se obtiene por ecuación (10).

$$Q_u = Q_{in} - Q_{loss} \quad (10)$$

Para la implementación de las ecuaciones (8) y (9), los coeficientes de transferencia de calor deben calcularse. Para la parte convectiva, se implementa un modelo basado en correlaciones del número de Nusselt (Nu_m) para las paredes exteriores del recipiente. El modelo mostrado en la Figura 4, inicia con valores de entrada para la temperaturas y cálculo de propiedades termofísicas a temperatura de película (T_{film}) y estimaciones de los números de Grashof (Gr_L) y Rayleigh (Ra_L) que se emplearán para el cálculo de los coeficientes convectivos (h_c). Por su parte, para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r), solo los datos de temperatura de superficie del recipiente (T_s) y temperatura del cielo (T_{sky}) son requeridos (ver Figura 4), en ella se muestra los pasos y secuencia de los datos necesarios.

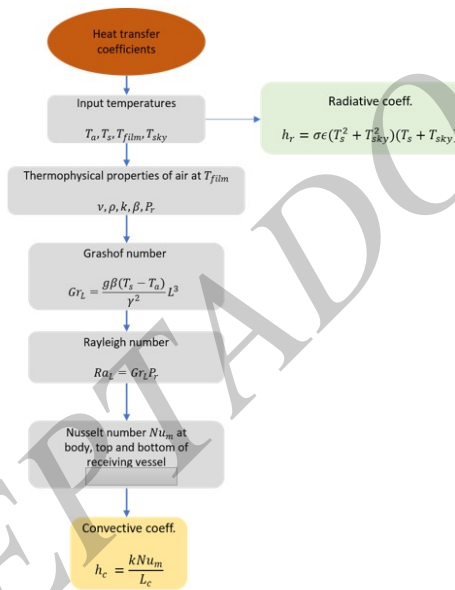


Figura 4: Cálculo de coeficientes de transferencia de calor

Se consideraron dos correlaciones para número de Nu_m en el cuerpo del recipiente, una que aplica para ambos regímenes de flujo laminar y turbulento, siempre que $L / D Gr_L^{1/4} < 0.025$ ecuación (11a) y otro para únicamente para flujo laminar, válida para cualquier valor del número de Prandtl ecuación (11b).

$$Nu_m = 0.0825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{16}]^{1/4}} \quad (11a)$$

Para $10^{-1} < Ra_L < 10^{12}$

$$Nu_m = 0.6800 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{16}]^{1/4}} \quad (11b)$$

Para $10^{-1} < Ra_L < 10^9$

En la sección de resultados las ecuaciones (11a) y (11b) serán referidas simplemente como A y B, respectivamente. Complementariamente, las correlaciones para el número de Nu_m en la tapa ecuación (12a) y la base del recipiente ecuación (12b).

$$Nu_m = 0.54 (Gr_L Pr)^{1/4} \quad (12a)$$

$$Nu_m = 0.27 (Ra_L)^{1/4} \quad (12b)$$

Por otro lado, las capacidades del DS está determinado por los rendimientos ópticos y térmicos. La *eficiencia óptica*, definida por el producto del factor de intercepción, absorptancia de la base del recipiente y la reflectancia del concentrador ecuación (13).

$$\eta_{op} = \gamma \alpha \rho_r \quad (13)$$

La *eficiencia térmica*, la proporción de la energía captada respecto de la energía total disponible ecuación (14), mientras que la *eficiencia global*, el producto de las eficiencias óptica y térmica ecuación (15).

$$\eta_{ter} = \frac{Q_u}{Q_{in}} \quad (14)$$

$$\eta_{total} = \eta_{op} \eta_{ter} \quad (15)$$

Con la determinación del calor útil se estima el tiempo en el que el DS comenzará a producir agua dulce, es decir, el *tiempo de ebullición* a partir del inicio del proceso ecuación (16).

$$t_{boil} = \frac{C_{esol} m_{sol} (T_{boil} - T_a)}{60 Q_u} \quad (16)$$

Donde $C_{e_{sol}}$ es el calor específico del agua, m_{sol} masa inicial de solución a desalinizar contenida en el recipiente receptor y T_{boil} temperatura de ebullición de la solución, estos valores son calculados a temperatura promedio de proceso y la cantidad de destilado logrado, es decir, la producción de agua dulce, ecuación (17).

$$m_{water} = \frac{t_{destila} Q_u}{\Delta h_{va p_{sol}}} \quad (17)$$

Donde $t_{destila}$ es el tiempo de destilación a partir de la ebullición de la solución $\Delta h_{va p_{sol}}$ es la entalpía de ebullición de la solución medida a temperatura T_{boil} .

Para el modelo de cálculo de coeficientes de transferencia de calor los valores de entrada mostrados en la Tabla 3, corresponden a los materiales del reflector y recipiente, así como a valores climáticos representativos durante las pruebas de evaluación realizadas al DS. Se hace notar que las pérdidas de calor estimadas para este modelo son para temperaturas máximas de operación del sistema de desalinización, es decir, los valores de las pérdidas de calor obtenidos serían las máximas posibles.

Tabla 3: Valores de entrada del modelo

Parámetro	Valor
Reflectante del reflector parabólico (ρ_r)	0.90 (-)
Absorción en la base del recipiente (α)	0.90 (-)
Emisividad en la superficie exterior del recipiente (ϵ)	0.77 (-)
Temperatura de película (T_{film})	55.0 °C
Temperatura del cielo (T_{sky})	10.0 °C
Temperatura del ambiente (T_a)	30.0 °C
Temperatura de superficie del recipiente (T_s)	80.0 °C
Temperatura de ebullición de la solución (T_{boil})	95.6 °C
Calor específico de la solución ($C_{e_{sol}}$)	4182.0 ($\frac{J}{kg K}$)
Tiempo de destilación ($t_{destila}$)	4.0 h
Entalpía de vaporización de la solución ($\Delta h_{va p_{sol}}$)	2.26E+6 ($\frac{J}{kg}$)

2.2. Procedimiento de evaluación de pruebas

Durante el 19 y 28 de abril de 2023 se realizaron pruebas de evaluación de DS en la parte superior de un edificio del

CIATEQ en la ciudad de El Marqués, Querétaro con coordenadas 20.570549°N100.271558°W. Para las pruebas se realizó la previsión de irradiancia solar media y alta para el día de evaluación. La solución salina se preparó diluyendo sal para acuario en un volumen de agua, para obtener una solución con salinidad equiparable al agua de mar. Previo a la evaluación del DS, se realizaron pruebas de hermeticidad en recipiente y ductos, así como se verificó la recuperación de destilado en el condensador. La verificación de señales de piranómetros, sensores de temperatura y balanza en *datalogger*, Posteriormente, se colocó y se fijó el recipiente receptor en el soporte del reflector parabólico conteniendo el fluido a destilar.

El procedimiento de evaluación del DS se efectuó atendiendo los siguientes pasos:

- Preparación de una solución salina mezclando 34 g por cada litro de agua, para obtener una solución al 0.34 % de salinidad.
- Medición de SDT, conductividad y pH de la solución a destilar.
- Colocación y fijación de recipiente, así como enfoque manual de reflector parabólico.
- Inicio de proceso de calentamiento y desalinización de la solución con registro de datos en *datalogger*.
- Ajuste periódico del enfoque del reflector <5 min.
- Medición de la temperatura exterior del recipiente con la cámara termográfica.
- Medición de SDT, conductividad y pH del agua dulce producida.
- Recopilación y análisis de los datos

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de caracterización geométrica del reflector de plato parabólico

Los resultados de la caracterización geométrica del reflector de plato parabólico son mostrados en la Tabla 4, determinando una distancia focal de una tercera parte del diámetro de apertura aproximadamente, un spot de concentración menor a 2 cm.

Tabla 4: Parámetros geométricos obtenidos de la caracterización del plato parabólico

Parámetro	Valor
Distancia focal (ρ)	0.5692 m
Área de apertura (A_a)	1.7458 m ²
Diámetro de spot de concentración (D_r)	0.0192 m
Ángulo de borde (ϕ)	66.44°
Concentración máxima (C_{max})	6051.10 (-)

Con los datos de la caracterización del reflector parabólico, se implementa un modelo para una simulación de trazado de rayos empleando el *software Tonatiuh Ray Tracer 2.2.4*. Los parámetros de simulación son DNI de 1,000 W/m², 1.00E+7 rayos, altura solar 83.68° correspondiente al medio día solar del 28 de abril y *target* rectangular a nivel de la base del

recipiente receptor. Los resultados del trazado de rayos son mostrados por la Tabla 5 y Figura 5.

Tabla 5: Resultados del trazado de rayos

Parámetro	Valor
Energía incidente en reflector (E_1)	1756.50 W
Energía incidente en recipiente (E_2)	830.18 W
Factor de intercepción (γ)	0.47 (-)
Flujo de energía máximo (F_{max})	28.49E+3 W/m ²

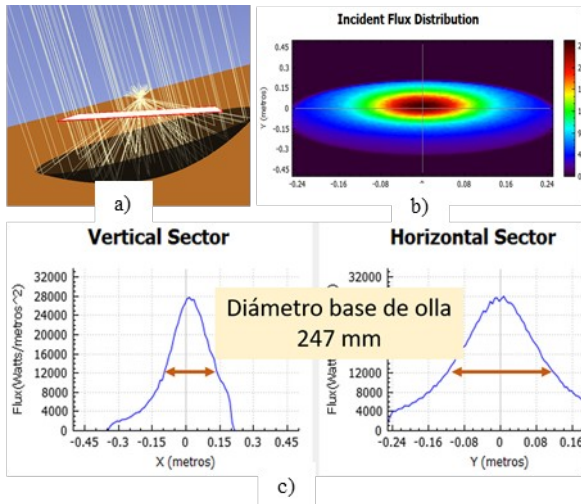


Figura 5: Trazado de rayos en *Tonatiuh Ray Tracer 2.2.4*: (a) modelo de reflector parabólico y receptor inclinado plano, (b) mapa de concentración y (c) distribución de flux de calor comparado con diámetro de la base del recipiente receptor

3.2. Resultados de análisis energético

Por su parte, los resultados de análisis energético son mostrados en la Tabla 6, donde A y B representan parámetros diferentes de medición en la cual existe una variación de la incidencia solar hacia el *target* en foco, se considera una energía disipada por convección y radiación entre 17.80 % – 21.20 %, la eficiencia térmica alta respecto a la ecuación (14), 79.00 % - 82.00% y eficiencia global de la ecuación (15) cae por la eficiencia óptica reducida, por lo que la producción de agua es mayor a 3.00 kg en 4 h.

Tabla 6: Resultados del análisis energético

Parámetro	A	B
Energía solar captada Q_{in} (W)	664.6	664.61
Calor perdido por convección Q_c (W)	35.25	57.94
Calor perdido por radiación Q_r (W)	83.39	83.39
Calor total perdido Q_{loss} (W)	118.6	141.36
Calor útil Q_u (W)	545.9	523.25
Tiempo de ebullición t_{boil} (min)	25.16	26.26
Producción de agua dulce m_{water} (kg)	3.47	3.33
Eficiencia óptica η_{op} (-)	0.38	0.38
Eficiencia térmica η_{ter} (-)	0.82	0.79
Eficiencia total η_{total} (-)	0.31	0.30

3.3. Resultados de evaluación

La Tabla 7, considera pruebas de destilación de agua corriente, como se observa se inició pruebas de aproximadamente de 3 h, en las cuales se obtuvieron 300 ml de agua destilada.

Tabla 7: Resultados de prueba de destilación de agua efectuado el 28 de marzo de 2023

Parámetro	Agua de la llave	Destilado
Hora	11:40	14:36
Volumen (ml)	3000.00	300.00
SDT (ppm)	183.00	34.00
Salinidad (%)	0.18	0.03
pH (UpH)	6.91	4.30
Conductividad ($\frac{\mu S}{cm}$)	363.0	70.0
Temperatura (°C)	25.8	27.5

La Tabla 8, muestra los resultados que se obtuvieron del 19 de abril del 2023, en el cual se tomaron datos de entrada y valores intermedios, así como los valores finales, en un tiempo estimado de 5 h se obtuvo un volumen de 460 ml, los valores en SDT, siguen manteniendo valores similares a los encontrados en la Tabla 7, el porcentaje de salinidad se mantiene en 0.03 %, mientras que la conductividad mantiene un valor de 12, En la Figura 6 se indica la determinación del tiempo de ebullición en el experimento del 28 de abril de 2023.

Tabla 8: Resultados de prueba de destilación de agua efectuado el 19 de marzo de 2023

Parámetro	Agua de la llave	Destilado 1	Destilado 2
Hora	9:32	10:55	14:36
Volumen (ml)	2000.0	400.0	460.0
SDT (ppm)	177.00	34.00	34.00
Salinidad (%)	0.17	0.03	0.03
pH (UpH)	7.73	4.54	4.16
Conductividad ($\frac{\mu S}{cm}$)	357.00	60.00	12.00
Temperatura (°C)	23.80	27.50	27.40

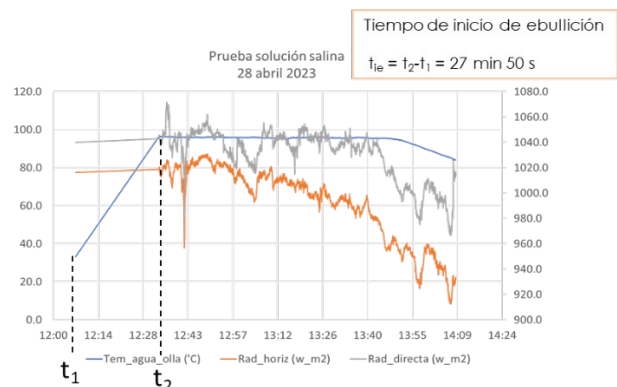


Figura 6: Determinación del punto de ebullición en el experimento del 28 de abril de 2023

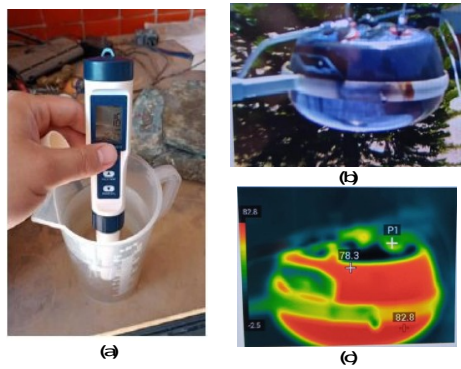


Figura 7: (a) medición de la calidad del agua, (b) imagen de recipiente receptor y (c) imagen termográfica de recipiente receptor

4. Conclusiones

El presente trabajo aborda el análisis energético y la evaluación de un equipo para tratamiento terciario de agua con el uso de energía solar concentrada. El dispositivo se probó en condiciones reales durante los días 19 y 28 de abril de 2023 en El Marqués, Querétaro, obteniendo 0.60 L de agua dulce en 1.30 h. Adicionalmente, se realizó una simulación de trazado de rayos empleando el software *Tonatiuh Ray Tracer 2.2.4*, lo cual permitió estimar una capacidad de producción de hasta 3.47 kg de agua dulce durante 4 h con eficiencia térmica del 82.00 %.

En cuanto a la evaluación general del DS, se identificaron ventajas relevantes como la obtención de agua con altos niveles de pureza (conductividad eléctrica $< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$) y una respuesta inmediata del sistema para generar agua dulce en periodos cortos, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de irradiancia solar, así mismo el dispositivo mostró una eficiencia térmica del 82.00 % pese a la ausencia de mecanismos de seguimiento solar. Sin embargo, también se reconocen ciertas desventajas, entre las que se destacan la naturaleza no continua del proceso, la necesidad del personal operativo especializado y la dependencia de la eficiencia del sistema respecto a las fluctuaciones en la irradiancia solar, así mismo las pruebas muestran que el agua destilada presenta una acidez fuera del rango establecido por la NOM-127-SSA1-2021.

5. Referencias

- Ahmed, H. M., Alshutal, F. S., & Ibrahim, G. (2014). Impact of different configurations on solar still productivity. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 3(2), 118-126.
- Bolisetty, S., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2019). Sustainable technologies for water purification from heavy metals: review and analysis. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 48, Issue 2, pp. 463–487). Royal Society of Chemistry.
DOI: [10.1039/c8cs00493e](https://doi.org/10.1039/c8cs00493e)
- Comisión Nacional del Agua (2022). Numeragua 2022. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Eshabnati, M. K., Feilizadeh, M., Jafarpur, K., Feilizadeh, M., & Rahimpour, M. R. (2015). Experimental investigation of a multi-effect active solar still: the effect of the number of stages. *Applied Energy*, 137, 46-55.
DOI: [10.1016/j.apenergy.2014.09.082](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.082)

- Eze, J. I., & Ojike, O. (2012). Comparative evaluation of rectangular and pyramid-shaped solar stills using saline water. *Int J Phys Sci*, 7(31), 5202-5208.
- Feria-Díaz, J. J., López-Méndez, M. C., Rodríguez-Miranda, J. P., Sandoval-Herazo, L. C., & Correa-Mahecha, F. (2021). Commercial thermal technologies for desalination of water from renewable energies: a state-of-the-art review. *Processes*, 9(2), 262.
DOI: [10.3390/pr9020262](https://doi.org/10.3390/pr9020262)
- Hammoodi, K. A., Dhahad, H. A., Alawee, W. H., & Omara, Z. M. (2022). A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. *Alexandria Engineering Journal*.
DOI: [10.1016/j.aej.2022.12.006](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.006)
- Hussen, H. M., Younes, M. M., Alawee, W. H., Abdullah, A. S., Mohammed, S. A., Atteya, T. E. M., ... & Omara, Z. M. (2023). An experimental comparison study between four different designs of solar stills. *Case Studies in Thermal Engineering*, 44, 102841.
DOI: [10.1016/j.csite.2023.102841](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102841)
- The International Desalination Association, IDA. (2011). *Desalination at a glance*.
- Kabeel, A. E., Hamed, A. M., & El-Agouz, S. A. (2010). Cost analysis of different solar still configurations. *Energy*, 35(7), 2901-2908.
DOI: [10.1016/j.energy.2010.03.021](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.021)
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Younes, M. M. (2015). Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 178-188.
DOI: [10.1016/j.rser.2015.02.053](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.053)
- Kabeel, A. E., El-Maghlany, W. M., Abdelgaied, M., & Abdel-Aziz, M. M. (2020). Performance enhancement of pyramid-shaped solar stills using hollow circular fins and phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 31, 101610.
DOI: [10.1016/j.est.2020.101610](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101610)
- Panagopoulos, A. (2021). Water-energy nexus: desalination technologies and renewable energy sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17), 21009-21022.
DOI: [10.1007/s11356-021-13332-8](https://doi.org/10.1007/s11356-021-13332-8).
- Saavedra, A., Valdés, H., Zúñiga, C. (2022). Manual técnico de desalación y purificación de aguas mediante osmosis inversa. Boletín INIA N° 462. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación La Cruz, La Cruz, Chile. p. 300.