Diseño y validación experimental de un dispositivo de desalinización de agua salobre con energía solar.

Design and experimental validation of a solar powered brackish water desalination device.

Juan Antonio Arízaga Silva (1).
Universidad Politécnica de Puebla Juan C. Bonilla Puebla.
juan.arizaga@uppuebla.edu.mx.

Carlos Muñiz Montero (2). Universidad Politécnica de Puebla Juan C. Bonilla Puebla,
carlos.muniz@uppuebla.edu.mx.

Luis Rey Luna Espinoza (3), Universidad Politécnica de Puebla Juan C. Bonilla Puebla, luis.luna@uppuebla.edu.mx.

Fernando O. González Manzanilla* (4), Universidad Politécnica de Puebla Juan C. Bonilla Puebla,
fernando.manzanilla@uppuebla.edu.mx.

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl (5), Universidad Politécnica de Puebla Juan C. Bonilla Puebla,
mario.espinosa@uppuebla.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 08, 2025; aceptado en octubre 18, 2025.

Resumen.

Se presentan el diseño y los resultados experimentales de un dispositivo de desalinización de agua utilizado en el tratamiento de agua salobre. Este dispositivo funciona con autonomía energética, ya que se alimenta de energía solar. Para dotar al prototipo de la autonomía deseada, se seleccionaron cuidadosamente todos los mecanismos internos y sensores. Se utilizó un estudio meteorológico realizado con información sobre la radiación solar obtenida de una estación meteorológica para aumentar la eficiencia del dispositivo y determinar los movimientos necesarios del dispositivo de desalinización. La validación experimental informa de un único proceso de desalinización realizado en 6 horas. Se recuperaron unos 3300 ml de los 5000 ml de agua originales, con niveles de pH y conductividad que descendieron a rangos normales.

Palabras claves: Energía renovable, energía solar, radiación, transferencia de calor.

Abstract.

The design and experimental results of a water desalination device used in brackish water treatment are presented. This device works with energy autonomy, being powered by solar energy. To provide the prototype the desired autonomy all the inner mechanisms and sensors were carefully chosen. A meteorological study performed with solar radiation information obtained from a weather station was used to increase the device's efficiency and to determine the required movements of the desalination device. The experimental validation reports a single desalination process performed in 6 hours. About 3300ml of the original 5000ml of water were recuperated with pH and conductivity levels falling to normal ranges.

Keywords: Heat transfer, radiation, renewable energy, solar energy.

1. Introducción.

Actualmente más de la mitad de la población mundial reside en grandes ciudades. Esta forma de vida influye en la agenda gubernamental, siendo de particular importancia el aprovechamiento de las denominadas fuentes de energía alterna y del agua potable. Se sabe que un porcentaje menor al 3% del agua del planeta es utilizado para el consumo humano (Asbik, M., Ansari, O., Bah, A., Zari, N., Mimet, A., & El-Ghetany, H. ,2016) y para actividades tales como la agricultura o la industria manufacturera, situación que está obligando a la humanidad a reducir el consumo y desperdicio del agua.

Desafortunadamente estas metas son difíciles de alcanzar por diversos factores, entre ellos problemas ambientales que destruyen las fuentes naturales de agua y que en muchas ocasiones son causados por la humanidad misma. Este problema es aún más considerable en regiones áridas y semiáridas del planeta, donde el acceso al líquido vital es limitado. En consecuencia, la búsqueda de fuentes sustentables de agua y agua apta para beber es un tema de prioridad mundial. Una alternativa que se ha convertido en la principal fuente de agua en ciertas regiones del planeta es el proceso de desalinización de agua. Por ejemplo, en países árabes como Qatar y Kuwait el agua de uso doméstico e industrial es obtenida en su totalidad por este proceso (Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. ,2020).

Se estima que la capacidad de desalinización a escala global es de 100 millones de m^3/día: siendo el 68% de la captación obtenida mediante procesos de membrana, 30% a través de procesos térmicos y el 2% restante con el uso de otras tecnologías. Desafortunadamente, el proceso de desalinización a través de procesos térmicos utiliza una gran cantidad de energía en forma de calor para separar las moléculas de agua de los elementos salobres. Inicialmente el agua salada (o salitrosa) es calentada en un colector para mejorar el proceso de evaporación. Ya en estado gaseoso (separado de las sales) el vapor de agua entra en contacto con otra superficie, llamada destilador, que al encontrarse a una temperatura menor produce el efecto de condensación deseado. Un dato revelador es que más del 97% de las plantas de desalinización de agua utilizan combustibles fósiles como fuente primaria de energía, por lo que el uso de energías renovables en estos procesos de desalinización es aún incipiente. Se identifica así un área de oportunidad para el desarrollo de nuevas tecnologías de desalinización.

En este sentido, diversos trabajos reportados en la literatura describen el desarrollo y estado del arte de procesos de desalinización térmicos con sustento en el uso de energías renovables. En (Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. ,2020) presentan una detallada revisión histórica, donde se identifican las ventajas del uso de la energía solar, tales como la ausencia de emisiones contaminantes y ruido, así como un bajo costo de mantenimiento. Se tienen dos principales alternativas para el aprovechamiento de la energía solar, como fuente de calor en procesos directos o indirectos utilizando colectores solares (Garcia-Bandell, J. J, 1978), o bien a través del uso de paneles fotovoltaicos (Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. A. ,2015). A pesar de estas ventajas, en México y otros países emergentes la energía solar no ha sido aun ampliamente explotada a pesar de que podría ser la solución a muchos problemas de índole ambiental, calentamiento global y carencia de agua.

Considerando los problemas mencionados anteriormente, este artículo estudia y propone una solución para un proceso de desalinización de agua salitrosa a través de energía solar. Utilizando el efecto invernadero, el dispositivo propuesto hace uso de información de radiación solar recabada por una estación meteorológica localizada en la Universidad Politécnica de Puebla, México. Este prototipo presenta además cierto nivel de autonomía energética.

La Figura 1 muestra el proceso térmico de desalinización utilizando el sol como fuente principal de energía. Como puede observarse, después de que el agua y las partículas son separadas existen dos diferentes usos para esta: para consumo humano o como agua para irrigación. Otro caso podría ser la destilación para uso médico.

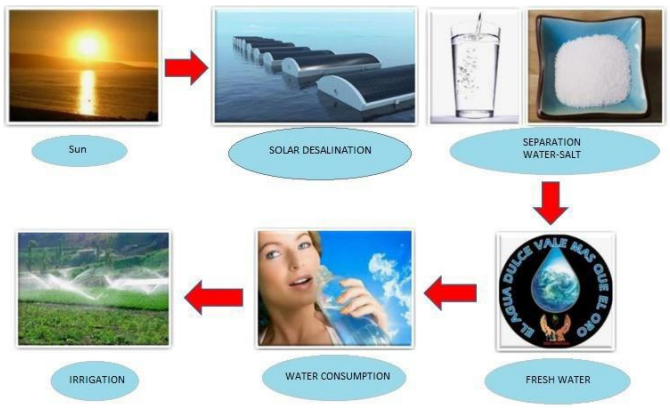

Figura 1. Proceso de desalinización

Por otro lado, los estudios sobre radiación global, que es la que mide la radiación directa y difusa que incide en un punto de la superficie terrestre al mismo tiempo, se llevaron a cabo en la Universidad Politécnica de Puebla (Sarmiento, C. V. ,2011; Soledad, A. G., & Barrera, O. M..2009), registrándose índices de radiación solar global de 912 W/m^2 en promedio en días soleados.

Los datos de la localización de la Universidad Politécnica de Puebla son los siguientes:

Locación:	Juan C. Bonilla, Puebla, Mexico.
Latitud:	19º05"42' North.
Longitud:	98º22"04' West.
Altitud:	2,211 meters above sea level

La Tabla I muestra los datos obtenidos de la radiación global promedio para el municipio de Juan C. Bonilla durante el año 2024. De los 365 días, 267 fueron soleados, mientras los restantes fueron nublados.

Tabla 1. Radiación promedio en 2024.

.

Mes	Radiación [W/m^2]	Mes	Radiación [W/m^2]
Enero	872	Jul	947
Feb	901	Agosto	968
Mar	967	Sept	887
Abril	969	Oct	845
May	977	Nov	839
Jun	959	Dec	812

Tabla 2. Número n de la ecuación de cooper.

Mes	*n*	Mes	*n*
Enero	i	Jul	181+i
Feb	31+i	Agosto	212+i
Mar	59+i	Sept	243+i
Abril	90+i	Oct	273+i
May	120+i	Nov	304+i
Jun	151+i	Dec	334+i

2. Diseño.

Para el diseño del desalinizador fueron considerados tres aspectos: el ángulo de incidencia de la radiación preveniente del sol, el diseño mecánico y el diseño eléctrico, los cuales son descritos a continuación.

Ángulo de incidencia de la radiación solar.

Para presentar de mejor forma la información acerca del diseño del dispositivo existen aspectos teóricos que deben ser presentados. Para encontrar la irradiancia incidente del sol en una superficie horizontal en un punto de la superficie terrestre es necesario describir las relaciones trigonométricas, entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas en la tierra.

Esta relación se describe utilizando distintos ángulos, tales como el ángulo de latitud ϕ (indica la posición al norte o sur del ecuador, tomando como positivo la dirección hacia el norte) y la declinación solar δ (es el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea entre el centro de la tierra y el centro del sol, con el norte como positivo).

La ecuación de Cooper describe el comportamiento del ángulo δ, resultando

$$\delta = 23.45 sin\left[\frac{360(284+n)}{365}\right] \quad (1)$$

Donde, n es el número del día basados en el Calendario Juliano. La información acerca de los diferentes valores para n se encuentra en la Tabla II. Estos valores son utilizados más adelante para realizar un programa en un Controlador Lógico Programable (PLC).

La relación de ángulos se presenta en la Figura 2. El ángulo α_s es la posición actual del sol. El ángulo β es el ángulo entre la superficie terrestre y el horizonte. El ángulo azimutal en la superficie, llamado γ, es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la superficie normal del meridiano local, con valor cero en el sur, valores negativos en el Este y positivos en Oeste.

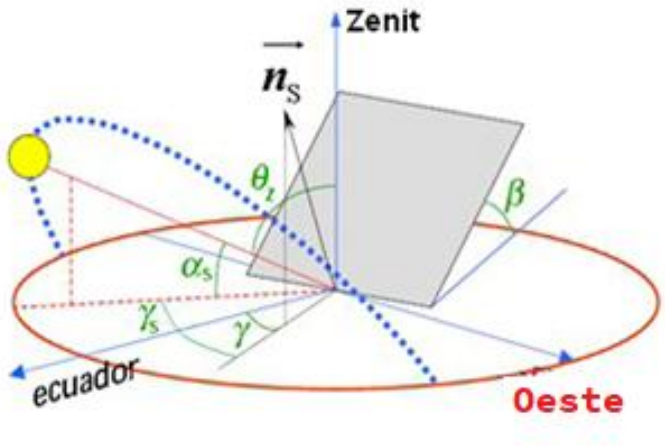

Figura 2. Relación de ángulos.

El ángulo horario ω, es el desplazamiento angular del sol de Este a Oeste del meridiano local. El ángulo γ_s es el ángulo azimutal del sol. Los movimientos Este-Sur son negativos y los movimientos Oeste-Sur son positivos (Romero Taus, M., 2009). El ángulo de incidencia θ_i es el ángulo entre el haz de radiación y la superficie normal, este es el dato más importante en la Figura 2; el ángulo de incidencia se relaciona con los diferentes ángulos descritos anteriormente, en las siguientes dos ecuaciones:

$$cos\ cos\ \theta_z = sin\ sin\ \delta\ \ sin\ sin\ \phi\ \ cos\ cos\ \beta\ \delta\ \ cos\ cos\ \phi\ \ cossin\ sin\ \beta\ cos\ \gamma\ \ \delta\ \ cos\ cos\ \phi\ \ cos\ cos\ \beta$$

$$cos\,cos\,\omega\;\;\delta\;\;sin\,sin\,\phi\;\;sin\,sin\,\beta\;\;cos\,cos\,\gamma\;\;cos\,cos\,\omega\;\;+cos\,cos\,\delta\;\;sin\,sin\,\beta\;\;sin\,sin\,\gamma\;\;sin\,sin\,\omega \quad (2)$$

$$cos\theta_i = cos\theta_z cos\beta + sin\theta_z sin\beta cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3)$$

Diseño Mecánico.

Tomando en consideración la información de la irradiancia incidente del sol presentada en la subsección anterior, se procedió a diseñar el desalinizador con miras a recibir la mayor cantidad de radiación solar durante el día. Para ello, el dispositivo fue diseñado para seguir el movimiento relativo del sol en el cielo (Garcia-Bandell, J. J.,1978), siendo montado en una base que permite dos tipos de movimiento, rotacional y azimutal.

La Figura 3 muestra el diagrama estructural del desalinizador térmico. Se utilizan dos motores para llevar a cabo los movimientos arriba mencionados.

Para determinar de forma cuantitativa la transmisión se llevaron a cabo múltiples simulaciones utilizando Autocad, obteniéndose los ajustes de tolerancia requeridos para el funcionamiento del mecanismo. De igual forma la selección de materiales se realizó analizando las necesidades del dispositivo, incluyendo la protección contra corrosión (García Prada, J.C., 2014).

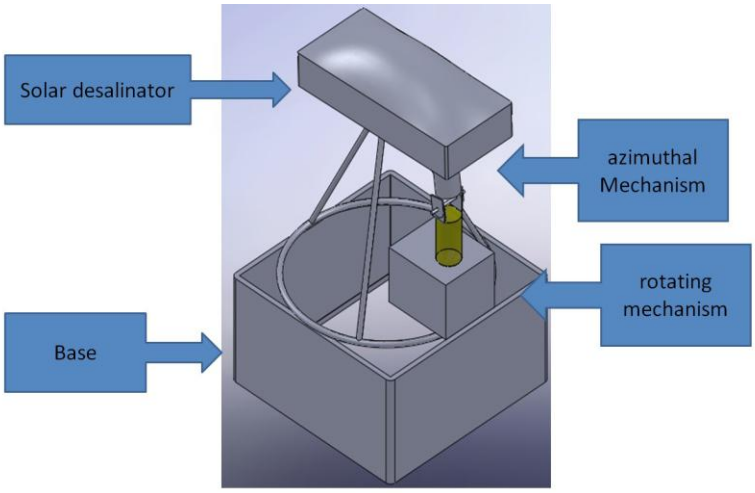

Figura 3. Diseño estructural del dispositivo.

El desalinizador fue dividido en dos partes. La primera es el elemento rotacional. Este fue construido siguiendo el diseño observado en la Figura 4. Este diagrama fue también diseñado en Autocad. El material utilizado en la estructura es acero de sección cuadrada, seleccionado para soportar un peso de hasta 30Kg. Como puede observarse uno de los motores está conectado a una estructura circular, la cual realiza el movimiento rotacional.

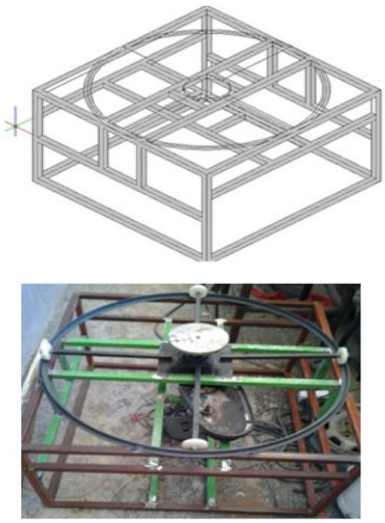

Figura 4. Diseño estructural del prototipo automatizado**.**

Este movimiento se restringió a 160°. EL movimiento azimutal está restringido a menos de 60° en razón del contenedor del contenedor de agua. Los movimientos son controlados utilizando un PLC. EL destilador, ilustrado en la Figura 5, es una estructura diseñada para concentrar la luz del sol para mejorar el proceso de evaporación (Asbik, M., Ansari, O., Bah, A., Zari, N., Mimet, A., & El-Ghetany, H. , 2016).

Figura 5. Destilador con techo curvo**.**

Las ecuaciones de transferencia de calor aplicadas en este caso al desalinizador solar contienen un coeficiente integral que considera la transferencia de calor entre las paredes del destilador, estas ecuaciones están basadas en el trabajo presentado en (Romero Taus, M. (2009)).

Las medidas de la base del dispositivo son 120cm x 120cm y 60cm de profundidad. Las medidas del contenedor son 25cm de largo, 50cm de ancho y 23cm de profundidad en el punto más alto. La información sobre las dimensiones se muestra en la Figura 6.

Diseño Eléctrico.

EL sistema electrónico está basado en un dispositivo PLC como se observa en la Figura 7. El desarrollo del programa en el PLC fue pensado para optimizar la función del calentador de una manera automatizada. El sistema electrónico contiene dos controladores de motor para controlar las posiciones de los motores y las velocidades para evitar que el agua obtenida se caiga debido al movimiento. Una parte del programa de escalera se incluye en la Figura 8.

La lógica del programa utilizada en el PLC se fija para seguir el curso del sol. En este caso el programa se basa en temporizadores, obteniendo una relación de tiempo con el progreso del sol para que el concentrador solar esté situado en la posición correcta para que reciba la mayor cantidad de luz solar posible. Esto se hace usando las ecuaciones (2) y (3). Después del amanecer, el desalinizador vuelve a su posición original.

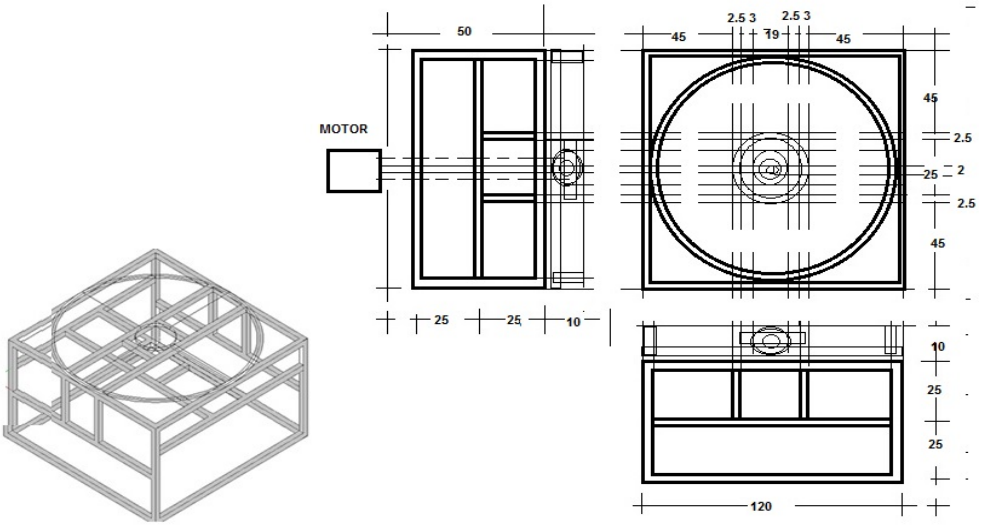

Figura 6. Plano de la base mecánica (en centímetros).

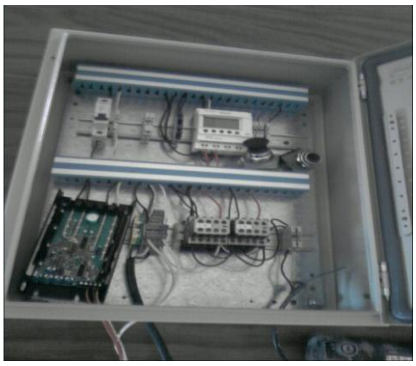

Figura 7. Panel de control eléctrico**.**

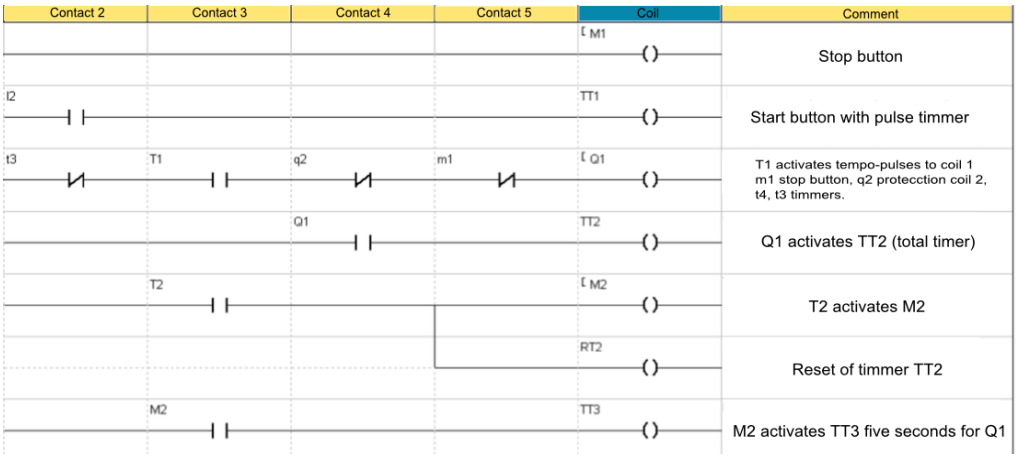

Figura 8. Programa de escalera del Sistema Electrónico en PLC**.**

Eficiencia del proceso de desalinización.

El sistema de desalinización es un sistema complejo que requiere ser analizado desde distintos puntos de vista, desde el punto de vista eléctrico contiene un sistema de seguimiento solar con dos motores y sus respectivos controladores. La eficiencia de este comportamiento, no es una parte relevante de este trabajo. Pero, si la eficiencia del proceso de desalinización en función del agua recuperada con respecto al agua utilizada. Esto a través de la siguiente ecuación 4.

$$Eficiencia\ de\ recuperación(\%) = \frac{Agua\ Recuperada}{Agua\ total\ usada} \quad (4)$$

Donde, la eficiencia de recuperación de agua, después del proceso de desalinización. En el caso de la eficiencia energética, la relación debería considerar la energía útil para el proceso de evaporación y la energía solar incidente, la cual fue obtenida en tablas por periodo de interés, pero la energía útil requiere desafortunadamente requiere condiciones controladas de volumen y presión, para determinar la energía útil a través de la cantidad de masa y el calor especifico del agua.

3. Pruebas y discusión.

Se realizaron varias pruebas con el fin de obtener información sobre el agua tratada en el proceso de desalinización. El agua utilizada en la prueba se seleccionó de una laguna cercana situada en Alchichica, Puebla. El agua de la laguna de Alchichica es salada; la cantidad de minerales disueltos en ella es de aproximadamente 1600 ppm (partes por millón). El agua salobre, no salada, tiene entre 400 ppm y 600 ppm.

La Agencia de Protección Ambiental del gobierno de Estados Unidos (EPA) considera 1000 ppm como nocivo para la salud humana y no debe ser consumido (U.S. Environmental Protection Agency, 2023).. Alternativamente, la conductividad es otra manera de medir la salinidad en el agua. En este caso el equipo utilizado fue un medidor de conductividad Hach sensION 5 de Cole-Parmer Co. Utilizando muestras de 300ml, se encontró que el agua de Alchichica tiene aproximadamente 7.5%. Para cada proceso de desalación se utilizaron al principio 5000ml de agua. Un solo proceso de desalinización tarda 6 horas en promedio (fase de calentamiento y estado estacionario, no se midió el tiempo de enfriamiento), el agua total recuperada después del proceso de destilación fue de aproximadamente dos tercios del agua original (3300 ml). Lo cual representa una eficiencia de recuperación del 66%. La pérdida de esta cantidad de agua está mesurada y es similar a la reportada en otros estudios (Almeida, G. ,2025). En la tabla 3, se presenta una comparación de trabajos similares.

Tabla 3. Parámetros de diversos sistemas de desalinización.

Trabajo	*Eff recuperación*
De la Cruz, C. (2006).	30-45%
Moya, E. Z. (1997).	50%
Alchichica	66%

Por otra parte, el pH del agua pura es 7, el agua potable y el agua natural exhiben un rango de pH porque contiene minerales y gases disueltos. Las aguas superficiales varían típicamente entre 6.5 a 8.5 de pH, mientras que las aguas subterráneas oscilan entre 6 y 8.5. El agua potable debe tener un valor de pH de 6.5-8.5 para que caiga dentro de los estándares de la EPA(Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2023). El pH del agua de la laguna de Alchichica está en el rango de 8.0-8.5. Esta información se obtuvo de un conjunto de muestras recogidas para este propósito. Después del proceso de desalinización, se probó un nuevo conjunto de muestras para saber si había un cambio de pH. Los nuevos valores obtenidos indican un nuevo rango de 7.2 a 7.6. Este rango está dentro del estándar EPA.

Conclusiones.

Se diseñó un dispositivo de desalinización de agua, construido siguiendo pautas basadas en la información obtenida en las ecuaciones (1), (2) y (3) y validada experimentalmente. El desalinizador ya es funcional. Los primeros resultados con respecto al desalinizador muestran que el diseño térmico es correcto. El agua desalinizada obtenida de la laguna de Alchichica no puede utilizarse para el consumo humano después de la evidencia obtenida en el laboratorio, pero el pH cae de un rango de 8.0-8.5 a 7.2-7.6. Este rango está dentro del estándar EPA. De esta forma, el uso de energías renovables para la desalinización se significa como una opción razonable y madura hacia los problemas emergentes de energía y agua. Con respecto a los elementos mecánicos utilizados para cambiar la posición del sistema, no contamos con datos suficientes para concluir que hay un aumento considerable en la cantidad de agua que se obtiene comparando con otros dispositivos similares que están fijados.

Trabajo a futuro.

Para mejorar la eficiencia del sistema de desalinización de agua, es requerido trabajo de investigación en diversas áreas, uno de ellas es la parte mecánica, donde el contendor de agua debe considerar un proceso de trasferencia de calor con doble función, mayor transferencia incorporando materiales con mayores constantes térmicas y una capa aislante térmico que mejora la retención de calor. Por otra parte, el sistema de posicionamiento al sol debe tener una respuesta más controlada para evitar pérdidas de calor en el proceso de conversión. Y realizarse un análisis térmico con simuladores que definan las condiciones geométricas que permitan la mejor distribución del calor y contención del agua para disminuir pedidas de agua en el proceso.

Créditos.

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo otorgado a este trabajo a través del proyecto 181201.

Referencias bibliográficas.

Almeida, G. (2025). Protótipo de pequena escala de dessalinização térmica de água salgada para o semiárido nordestino brasileiro. CadUniFOA, 20(55), 1–10.

Asbik, M., Ansari, O., Bah, A., Zari, N., Mimet, A., & El-Ghetany, H. (2016). Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM). *Desalination*, *381*, 26–37. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.031

Calvo, S. M. (2003). Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Editorial Mundi-Prensa.

Centro Avanzado de Innovación (CAIC). (s.f.). Plasma water sanitation system.

De la Cruz, C. (2006). *La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables*. Fundación Alternativas.

Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. Science of The Total Environment, 748, 141528. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528

Fitzgerald, R. W. (2002). Mecánica de materiales. Alfaomega.

Garcia-Bandell, J. J. (s.f.). Cálculo de la energía solar. Instituto de Tecnología Ciencia e Innovación. 1978

Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. A. (2015). Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. Desalination, 356, 94–114. https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024

Hess, D. (2010, abril). Desalination plant for Haiti.

International Organization for Migration (IOM). (2015). World migration report 2015.

Juan Carlos, G. P., Cristina, C. S., & Higinio, R. A. (s.f.). Problemas resueltos de teoría de máquinas y mecanismos. Thomson México.

Jutglar, L. (2006, agosto). Energía solar. Editorial CEAC.

Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. Desalination, 223(1-3), 448–456. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.071

Méndez, J., Cuervo, M., & García, R. (s.f.). Energía solar térmica. Editorial Fundación Confemetal.

Morales, D. (2009, marzo). Tecnología evaluación de los avances de los generadores de turbinas solares.

Moya, E. Z. (1997). Desalinización del agua del mar mediante energías renovables. In Actas del I y II seminario del agua (pp. 199-226). Instituto de Estudios Almerienses.

Nandwani, S. (2005, junio). Energía solar conceptos básicos y su utilización. Universidad Nacional.

Qiblawey, H. M., & Banat, F. (2008). Solar thermal desalination technologies. Desalination, 220(1-3), 633–644. https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.059

Rodrigues, A. P. (2011). Estudo experimental de um dessalinizador térmico com aquecimento controlado [Tesis de maestría, Universidade Federal do Ceará].

Romero Taus, M. (2009). Energía solar térmica. Editorial CEAC.

Sarmiento, C. V. (2011, diciembre). Energías renovables.

Soledad, A. G., & Barrera, O. M. (2009). Ajuste óptico de un horno solar en configuración de doble reflexión [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Puebla].

U.S. Environmental Protection Agency. (s.f.). Recuperado el 12 de enero de 2022 de https://www.epa.gov/

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). Drinking Water Regulations and Contaminants. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sdwa/drinking-water-regulations-and-contaminants

Información de los autores.

Juan Antonio Arízaga Silva Recibió la Maestría en ciencias en Ingeniería Electrónica por la Universidad de las Américas, Puebla, México en 2006. Actualmente es Profesor Asociado de la Universidad Politécnica de Puebla. Sus intereses de investigación incluyen sistemas integrados, sistemas telemétricos y sistemas electrónicos de potencia.

Carlos Muñiz Montero, Recibió su doctorado en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica en México en 2008. Actualmente es Profesor Asociado de la Universidad Politécnica de Puebla. Sus intereses de investigación incluyen IC de señales mixtas, acondicionamiento de señales, comunicaciones RF y sistemas de orden fraccionario.

Luis Rey Luna Espinoza Actualmente es Estudiante de posgrado en la Universidad Politécnica de Puebla. Sus intereses de investigación incluyen controladores PID de orden fraccionario.

Fernando O. González Manzanilla, Recibió su la Maestría en ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, en 2004. Actualmente es Profesor Asociado de la Universidad Politécnica de Puebla. Sus intereses de investigación incluyen sistemas de energía renovable.

Mario Espinosa Tlaxcaltecatl, Doctor por parte del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica en México en 20013. Actualmente, profesor de tiempo completo en la Universidad Politécnica de Puebla. Su perfil de investigación se enfoca en Optoelectrónica, Sistemas de energías renovables y motores eléctricos.