

THEORETICAL REVIEW BASED ON THE TECHNOLOGIES DEVELOPED IN SOLAR DESALINATION.

REVISIÓN TEÓRICA BASADA EN LAS TECNOLOGÍAS DESARROLLADAS EN DESALINIZACIÓN SOLAR.

M. Sc. Javier Ascanio Villabona, M. Sc. Brayan Tarazona Romero, M. Sc. Camilo Leonardo Sandoval, M. Sc. Oscar Acosta Cardenas, Tnlgo. Tatiana Jaimes Quintero.

Unidades Tecnológicas de Santander

Ingeniería Electromecánica

Grupo de Investigación en Sistemas de Energía, Automatización y Control. GISEAC
Ciudadela Real de Minas. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-6917700 ext. 1103, Fax: 57-7- 6917691

E-mail: Jascanio@correo.uts.edu.co; Btarazona@correo.uts.edu.co;
csandoval@correo.uts.edu.co; ocosta@correo.uts.edu.co; Ktjaimes@uts.edu.co;

Abstract: Increasing global demand for water and energy have led to renewable energies that offer an environmentally friendly alternative (Maia, Silva, Oliveira, & Kazmerski, 2019). Solar desalination systems have become a very attractive topic, due to the fact that the areas that lack fresh water are rich in solar energy, allowing to present a convenient, promising and viable solution, also obtaining potable water for consumption in remote areas. from water with high salinity, where it is considered to be a process free of CO2 emissions as it is fed with solar radiation, being sustainable and respectful with the environment. The main objective of this study is to provide an extensive review of the different solar desalination systems, evaluating the indicators, factors and technologies involved in their process, through scientific sources such as: articles, academic publications, international conferences, indexed journals, among others.

Keywords: Desalination, renewable energy, solar energy, integrated systems, technologies.

Resumen: El aumento de la demanda mundial de agua y energía han dado lugar a las energías renovables que ofrecen una alternativa amigable con el medio ambiente (Maia, Silva, Oliveira, & Kazmerski, 2019). Los sistemas de desalinización solar se han convertido en un tema muy atractivo, debido a que las zonas que carecen de agua dulce poseen riqueza en energía solar, permitiendo presentar una solución conveniente, prometedora y viable, asimismo obteniendo agua potable para el consumo en áreas remotas a partir de agua con alta salinidad, donde se considera que es un proceso libre de emisiones de CO2 al ser alimentado con radiación solar, siendo sostenible y respetuoso con el medio ambiente. El objetivo principal del presente estudio es proporcionar una revisión extensa de los diferentes sistemas de desalinización solar, evaluando los indicadores, factores y las tecnologías inmersas en su proceso, a través de fuentes científicas como: artículos, publicaciones académicas, congresos internacionales, revistas indexadas, entre otros.

Palabras clave: Desalinización, energías renovables, energía solar, sistemas integrados, tecnologías.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la escasez de agua potable y la creciente demanda de energía es el mayor desafío que se enfrenta, debido al aumento continuo de la población, las actividades industriales y que una cuarta parte de la humanidad sobrelleva un inadecuado uso de agua dulce (G & Vk, 2008). La situación de emergencia de agua es muy alarmante (Ascanio, Sandoval, Rincón, Tarazona, & Paez, 2019), principalmente en las zonas áridas y remotas, a pesar de que el planeta está cubierto por el 97% de agua, sin embargo, el agua dulce solo abarca el 2,5% de la cantidad total, el resto son mares, glaciares, casquetes de hielo y aguas subterráneas (KV & C, 2015)

El agua salobre tiene la salinidad en el intervalo de 10.000 ppm, donde el límite posible para que el agua sea potable es de (500 a 1.000 ppm), por lo que, para obtener estos intervalos aceptables se logra por medio de la desalinización de agua, sin embargo, la desalinización es un proceso extenso de energía en el que, para producir 1000 metros cúbicos de agua por día, se requiere 10.000 toneladas de combustibles fósiles en el año. (Ahmed, Mossad, & Barforoush, 2016)

Es por esto que, la integración de las energías renovables con los sistemas de desalinización es la solución más prometedora para superar esta deficiencia de agua y a su vez, adquirir el compromiso sin precedentes a escala mundial para innovar las tecnologías de agua y sistemas de gestión, preservando la calidad de los recursos actuales, de tal forma que se reduzca la demanda de agua por medio del aumento de la eficiencia y aumentar generalmente la disponibilidad de cantidad de agua dulce. (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009)

Evolución de la Desalinización

La desalinización es una estrategia para suministrar agua potable de manera no convencional, la cual consiste en la conversión de agua salubre de los océanos y mares en agua dulce (Siddiqi & Anadon, 2011). En los tiempos clásicos la desalinización fue mencionada por Aristóteles, quien escribió sobre la desalación de agua de mar y creó el primer evaporador cerca de los años 300-400 Ac. A mitad del siglo XIX se empezaron a utilizar destiladores utilizados en barcos para potabilizar el agua marina (E & MR, 1976). El primer avance técnico importante fue en la década de 1940, durante la segunda guerra mundial, donde la desalinización fue desarrollada en zonas áridas que necesitaban abastecer de agua potable a sus tropas militares, donde la eficiencia

energética era más importante que el costo de agua producida (Bennett, 2013). Las plantas de desalinización empezaron a parecer en la década de 1960, utilizando procesos térmicos, entre estos la destilación flash de múltiples etapas (MSF), las membranas entraron en el mercado en la década de 1950 y la electrodiálisis fue la primera tecnología en ser comercializada para el tratamiento de agua salinas, así mismo investigadores de varias universidades en Estados Unidos desarrollaron y experimentaron con éxito, la desalinización de membranas (RO), sin embargo este sistema era costoso y su capacidad era limitada (Corrado, 2004). A fines de 1960, se instalaron plantas desaladoras que producían hasta 8000m/día, un tamaño muy modesto en comparación de las plantas actuales. Hoy en día el agua desalinizada es usada para el consumo humano, procesos industriales o de riego, aunque este último es utilizado de forma limitada ya que los costos para desalinizar el agua son relativamente costosos.

Medina (2000), refiere que la desalinización es un proceso que se basa en la separación de sales disueltas de agua de mar para convertirla en agua dulce apta para el consumo, uso industrial o riego. En la actualidad existen diversas tecnologías o sistemas de desalinización que, aunque tengan características diferentes, como el tipo de energía, diseño y productividad, todas cumplen con el mismo objetivo el cual es, desalar el agua (Lattemann & Hoepner, 2007). Por otra parte, la contaminación natural y del hombre con el agua, ni implica que la disponibilidad total de agua sea de calidad y apta para el consumo. Es por eso que la calidad de agua es diferente para cada región y dependiendo del tipo de subsuelo de los contaminantes. (Tabla 1)

TABLA I
RANGO DE SALINIDAD EN EL AGUA

TIPO DE AGUA	SDT (mg/L)
Ultra pura	0.03
Pura	0.3
Desionizada	3.00
Potable	<1000.00
Salobre	1 000.00-10 000.00
Salina	10 000.00-30 000.00
Marina	30 000.00-50 000.00

Nota: Rangos de los diferentes tipos de agua en SDT que significa solidos totales disueltos. (Valero, 2001)

Un sistema de desalinización alimenta con agua salobre una planta de desalinización con el fin de acondicionar y eliminar los residuos de sales obteniendo un producto y un rechazo (AL-SAHALI, 2007). Las tecnologías de desalinización se

clasifican principalmente en dos categorías principales: Térmicas y basadas en membranas. Las térmicas son procesos que utilizan el calor para destilar la alimentación cruda en agua de muy baja salinidad (en forma de vapor) repitiendo el ciclo de evaporación y condensación, donde el calor externo se utiliza en cámaras posteriores de baja presión donde una fracción de la alimentación se evapora y se recoge como destilado (productividad del producto final), por otro lado las tecnologías basadas en membranas retienen la mayoría de los iones de sal no deseado en el lado de la alimentación y permiten que las moléculas de agua penetren. (Liyanaarachchi, L. Shu, Jegatheesan, & Baskaran, 2014).

Países con plantas de desalinización.

Los países que cuentan con mayor cantidad de plantas de desalinización son: Estados Unidos con 2174 plantas abarcando el 34% en todo el mundo, donde el 72% es de ósmosis inversa (OI), Arabia Saudita con el 32% y 2086 plantas de las cuales el 65% pertenece a destilación flash multietapa (MSF), Japón abarca el 22% con 1457 plantas y el 90% de estas pertenecen a OI y por ultimo España con 12% y 760 plantas de las cuales el 90% corresponde a OI. (IDA, 2007) (Fig. 1)

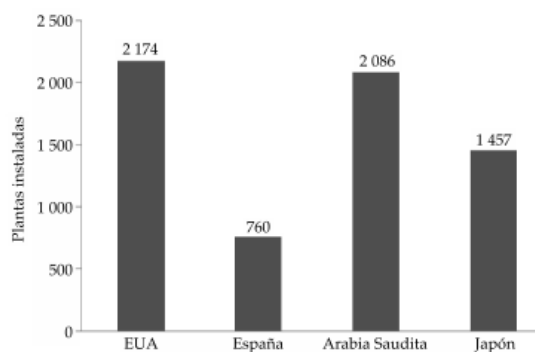


Fig. 1. Países con mayores plantas desaladoras instaladas. (IDA, 2007)

Este trabajo explora el potencial global de las tecnologías de desalinización integradas con las fuentes de energía renovables principalmente las relacionadas con la radiación solar, por medio del método de revisión narrativa, identificando, recopilando y seleccionando los sistemas con más impacto actualmente, teniendo en cuenta los avances tecnológicos, el aumento de la productividad, eficiencia y disminución en costos.

2. Revisión de la literatura

Para iniciar una eficiente estrategia de búsqueda bibliográfica, se hizo necesario utilizar un lenguaje libre y controlado, por lo que se consultó en las bases de datos como Mendeley, SCOPUS y principalmente ScienceDirect, utilizando palabras claves adecuadas como ‘sistemas de

desalinización solar’, ‘desalación solar’, ‘desalinización’. También se realizan búsquedas con la combinación de las palabras clave principales y. Posteriormente en la tabla 1, se clasifican según el tipo de sistemas encontrados en los documentos relevantes que cumplen los criterios de selección.

Tabla 2.
Revisión bibliográfica de estudios relacionados

TIPO DE SISTEMA	Nº DE ARTÍCULOS
Sistema de desalinización de humidificación-deshumidificación	9
Sistema multiefectos	1
Sistema de energía solar concentrada	2
Chimeneas solares	1
Aplicación de nanofluidos de nanotubos de carbono recuperables en el sistema de desalinización solar	1
Combinado con energía renovable	4
Colector solar	3
Sistema combinado de desalinización y CCHP (calefacción y energía de refrigeración combinadas)	1
Sistema híbrido de desalinización-enfriamiento por adsorción	2
Sistema híbrido de energía solar híbrido conectado a la red	1
Sistema de desalinización solar híbrido utilizando varias formas de receptor de cavidad	1
Sistema de desalinización de agua basado en membrana de contacto directo	1
Sistema de electrodiálisis	1
Desalinización de ósmosis inversa	2

Fuente: Autor.

Desalinización solar

En México según Devora (2007), existen 436 plantas desalinizadoras instaladas en 320 lugares, donde solo 5 utilizan la energía solar ya sea como fuente de alimentación, o aprovechando la radiación solar como fuente de calentamiento.

Sí la desalinización se logra mediante las tecnologías convencionales, será necesario la quema de grandes cantidades de combustibles fósiles. Favorablemente las regiones que tienen estos problemas de agua, se encuentran en áreas con un gran potencial en energía solar, la cual puede ser integrada con un sistema de desalinización con el fin de

convertir el agua salada en agua potable y siendo amigables con el medio ambiente (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009). La energía solar, recogida de la radiación solar, se puede utilizar tanto directamente como indirectamente, es decir, directamente calienta el agua salada con el fin de producir agua fresca que es de bajo costo y muy práctica, son especiales para productividad a baja escala y tienen una temperatura de operación y de presión de vapor que hacen su salida menos que sus contrapartes indirectas (Rincón, y otros, 2019).

Puesto que la desalinización solar se ha convertido en la mejor alternativa en solucionar el problema de escasez de agua y al mismo tiempo reducir las emisiones de carbono evitando efectos peligrosos e irreversibles no controlables sobre el clima y la economía del mundo, es por esto que los sistemas de energía sostenible principalmente la radiación solar cumplen un papel muy importante en la integración de fuentes de energía renovable y tecnologías de desalinización eficientes (Rodríguez, 2003), existen varias estrategias que estudian este proceso, que se explican a continuación:

Sistema Térmico.

En el sistema térmico se necesita calor para realizar el cambio de líquido a vapor, donde no influye el nivel de salinidad que contenga el agua, es decir, el agua de mar se calienta hasta ser evaporada, seguido a esto el vapor se condensa produciendo así el agua dulce quedando residuos como lo es el agua con alta concentración de salinidad (Porta, Rubio, & Fernandez, 2002). El sistema térmico solar se clasifica en 2 procesos, el proceso directo donde están los sistemas de humidificación-deshumidificación (HDH) y el sistema por alambiques solares, por otra parte, el proceso indirecto es compuesto por los sistemas destilación múltiple efecto (MED), destilación flash multietapa (MSF)

Sistema de humidificación-deshumidificación (HDH)

Un claro ejemplo del sistema HDH es la producción de lluvia, ya que, el sol como fuente de calor se utiliza para evaporar cerca de 16 millones de toneladas de agua de la tierra a la atmosfera cada segundo (Narayan, y otros, 2010). El vapor es llevado por el viento a donde se trata a través de una zona y se condensa a baja temperatura para formar la lluvia, nieve, entre otros. El método HDH funciona de manera similar al ciclo natura (ciclo de lluvia), con lo cual, el aire se calienta mediante un calentador solar (SAH) con el fin de aumentar la capacidad de retención de vapor donde 1kg de aire puede llevar 100g de vapor de agua a 60° C y se eleva hasta 500g en 80°C (Elminshawy, Siddiqui, & Addas, 2015), por lo que el aire absorbe la humedad del agua salina en el humidificador y la rechaza como agua dulce en el deshumidificador. Este sistema HDH se compone de dos componentes principales, humidificador y deshumidificador, los cuales pueden ser impulsados por una variedad de fuentes de calor (Fig. 2).

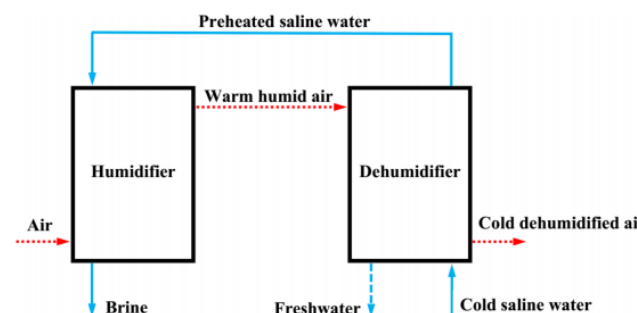


Fig. 2 Esquema del sistema de desalinización HDH sencillo (Faegh, Behnam, & Shafii, 2019)

Generalmente, hay diferentes tipos de configuraciones de HDH con el fin de mejorar el rendimiento de cada componente del sistema (Faegh, Behnam, & Shafii, 2019). Hammadi (Hammadi, 2018) presenta un estudio teórico del proceso de humidificación - deshumidificación (HDH) en modo transitorio dentro de un destilador solar abierto como, donde, consta de una piscina de agua longitudinal, cubierta por un panel de vidrio transparente con una entrada para el aire seco y una salida para el aire húmedo. Los resultados obtenidos, presentan que, la productividad del agua dulce es altamente afectada por el agua salada, las corrientes de aire y la temperatura del vidrio. Por otro lado, el incremento de la velocidad del aire en el interior del destilador aumenta la tasa de evaporación por lo que influye en la productividad haciendo que disminuya, esto se debe a los calores latentes y sensibles que transfieren a la cubierta del cristal. El sistema de humidificación-deshumidificación ha sido utilizado para producir agua dulce a partir de agua de mar, siendo uno de los procesos más simples pero efectivos en cuestión de pequeña capacidad de producción. (ORFI, y otros, 2004)

Por esta razón, la integración de humidificación-deshumidificación, con la configuración experimental que realizaron Yamali & Solmus (2008), promete ser un proceso efectivo, el cual consiste en un calentador de aire solar de placa plana de doble paso con dos cubiertas de vidrio, humidificador de almohadilla, intercambiador de deshumidificación y tanque de almacenamiento de agua como se muestra en la Figura 7; donde se basan en la idea de ciclos cerrados de agua y aire libre. Los resultados obtenidos con esta investigación demostraron ciertas condiciones de funcionamiento, especialmente la productividad de agua dulce, que se ve afectada ya que disminuye en un 15% si no se hace uso de un calentador de aire solar de doble paso, por lo que, haciendo uso de este calentador, la temperatura inicial aumenta dentro del almacenamiento del tanque y se logra una mejora en la productividad. Por otra parte, el caudal másico del agua de alimentación y la cantidad de agua dentro del tanque, hace la productividad del sistema aumente, sin embargo, al aumentar el caudal másico de aire, mantiene esta productividad constante. (Fig. 3).

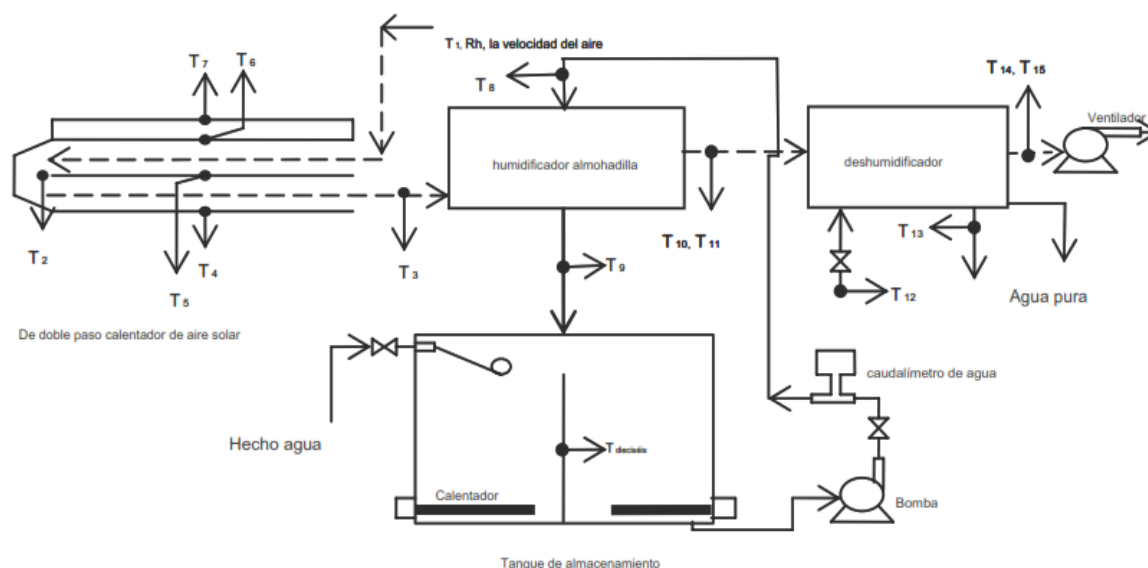


Fig. 3 Diagrama esquemático de la puesta a punto experimental y los lugares de termopar (Yamali & Solmus, 2008)

Entre las diversas tecnologías de desalinización solar, la de humidificación-deshumidificación es la más comprometida con la energía solar, es por eso que, para aumentar su eficiencia, Zhao *et.al.* (2019), presentaron un método que utiliza, deshidratación y humidificación de flujo cruzado de cuatro etapas (HDH) con deshumidificadores de contacto directo como se muestra en la Figura 8, donde se obtiene como resultado, mayor rendimiento total de agua del sistema, ya que, aumenta con el volumen del aire en velocidad de flujo; la absorción de agua dulce tiene el rendimiento más alto de agua por unidad de volumen y un menor costo de agua pura. (Fig. 4)

El agua producida por la destilación solar directa, es naturalmente purificado por los rayos ultravioletas del sol, es por eso que, los autores, Amir, *et.al.* (2018), aplican un nuevo sistema de desalinización por medio de energía solar

la cual emplea un sistema híbrido de desalinización de humidificación-deshumidificación integrado con alambique solar, dos efectos compuestos por un concentrador solar y dos paneles fotovoltaicos enfriados térmicamente. Donde muestra que, la productividad del agua dulce disminuye con el aumento de la altura de la cuenca y con el caudal másico del aire circulante. Así mismo, la combinación de paneles fotovoltaicos con el concentrador solar, produce un alto aumento en el rendimiento de la productividad de agua a una alta relación de concentración, debido a que en los paneles se presenta una temperatura máxima, la potencia de salida eléctrica y la eficiencia de ambos paneles, esto quiere decir que, para obtener unas condiciones óptimas de funcionamiento, está directamente relacionado con la temperatura máxima permitida del agua del depósito y de los paneles fotovoltaicos.

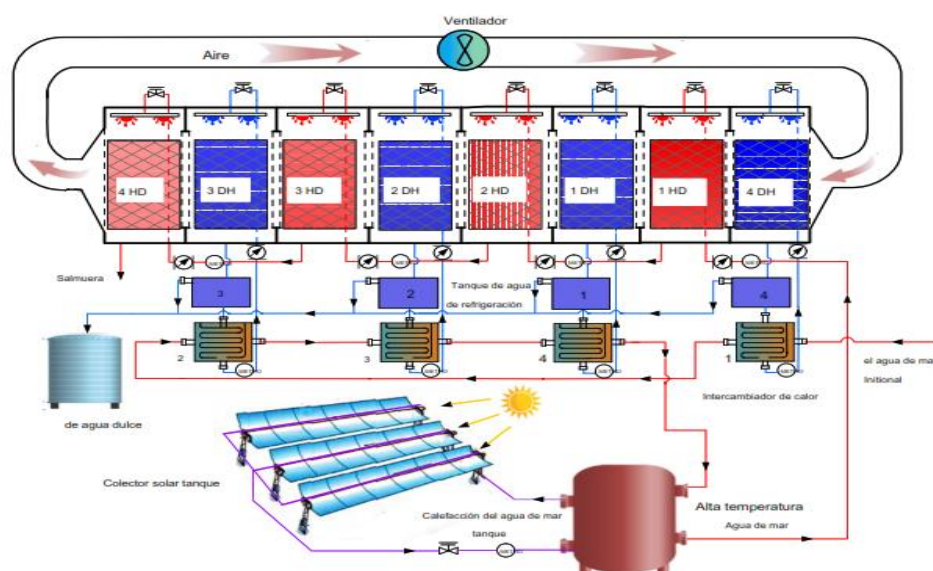


Fig. 4 Esquema del sistema de desalinización HDH de cuatro etapas con deshumidificadores de contacto directo. (Yunsheng Zhao, Hongfei Zheng, Shen Liang, Nan Zhang, & Ma, 2019)

A través de los años, se han realizado estudios para mejorar la eficiencia de los diversos sistemas de desalinización, sin embargo, los problemas de escala y costo no han logrado un gran resultado, debido a que, los componentes tradicionales se construyen por separado, lo cual hace que su costo de fabricación aumente (Ascanio, Rincón, Cardenas, & Sandoval, 2019). Debido a lo anterior, Gang Wu *et.al.* (2017), les surge la selección de combinar la desalinización humidificación-deshumidificación de etapas múltiples, calentado con concentrador de lente Fresnel cilíndrico, en el que la luz del sol se envía directamente a la unidad de desalinización. Logrando como resultados, el rendimiento máximo de la unidad, el cual es aproximadamente de 3,4 kg/h, la relación de producción máxima obtenida (GOR) es de aproximadamente 2.1, cuando la intensidad promedio de la radiación solar es de aproximadamente 867 W / m². Lo cual indica, que el sistema tiene características de estructura compacta y GOR alto. (Fig. 5).

Igualmente, H. Xu & Y. J.Dai, (2019), realizaron investigaciones que están direccionadas hacia la recuperación de la eficiencia del calor, para promover el desarrollo eficaz del sistema de desalinización humidificación-deshumidificación, en el que el calor latente y el calor sensible parcial en el agua de mar remanente se vuelva a utilizar para mejorar el rendimiento de la productividad del agua dulce, es por esto que, se adapta una bomba de calor asistida por energía solar de dos etapas, al proceso HDH con humidificadores conectados en paralelo, con el fin de presentar una opción adecuada para obtener agua dulce a pequeña escala. Obteniendo como resultados, que el caudal de aire no varía con el caudal de agua de mar caliente, sin embargo, se incrementa si el caudal de agua de mar se enfría, lo que quiere decir que el rendimiento de agua

dulce, el rendimiento máximo de agua dulce es de 17,94 kg / h. La correspondiente relación ganancia-salida (GOR) es 2.02. Sin embargo, este rendimiento está limitado por un cuello de botella, el aumento de la capacidad de deshumidificación puede resultar en una reducción en el rendimiento del humidificador de baja temperatura (LT). (Fig. 6).

Sistema Multiefectos (MED)

Los sistemas de desalinización son un proceso fundamental para combatir la escasez de agua dulce, sin embargo, estas tecnologías requieren de una gran cantidad de energía, por lo que el uso de fuentes tradicionales aumenta la preocupación, no solo por el alto costo económico sino por los problemas de contaminación derivados de la quema de combustibles fósiles (Khan, Rehman, & Al-Sulaiman, 2018). Las plantas MED constan de tubos verticales u horizontales, donde el vapor se condensa en un lado del tubo mientras por el otro lado sale el agua salada ocasionado por la evaporación, esta agua salada al ser evaporada se distribuye por encima de los tubos exteriores. En cada efecto del proceso MED se, humedecen tubos de intercambio térmico con agua de mar, de manera que el vapor fluya por medio de los tubos y se condense, produciendo así el agua dulce. (WHO, 2007)

Por lo que, los autores Li, *et.al.* (2018), desarrollaron un diseño novedoso, de un sistema de desalinización solar a pequeña escala, con proceso de recuperación de calor multiefectos, el cual se basa en un absorbedor de tubos evacuados de vidrio como colector de calor, en el que el vapor y el flujo de agua dulce son impulsados por la caída de presión, por lo que, todo

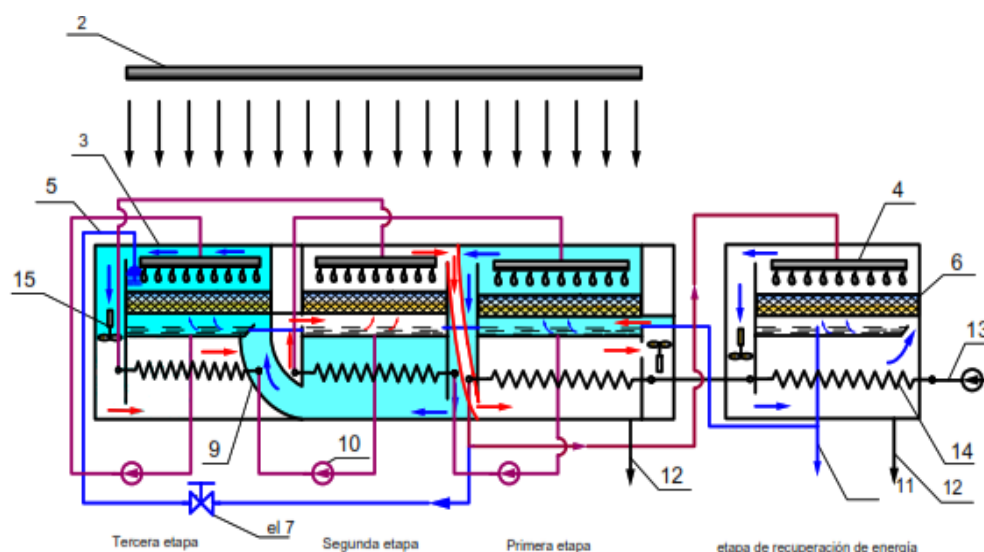


Fig. 5 Dibujo esquemático del sistema de desalinización solar de recuperación de calor de cuatro etapas basado en humidificación-deshumidificación con concentrador de lente Fresnel. (Gang Wu, Hongfei Zheng, Xinglong Ma, Cagri Kutlu, & Yuehong Su, 2017)

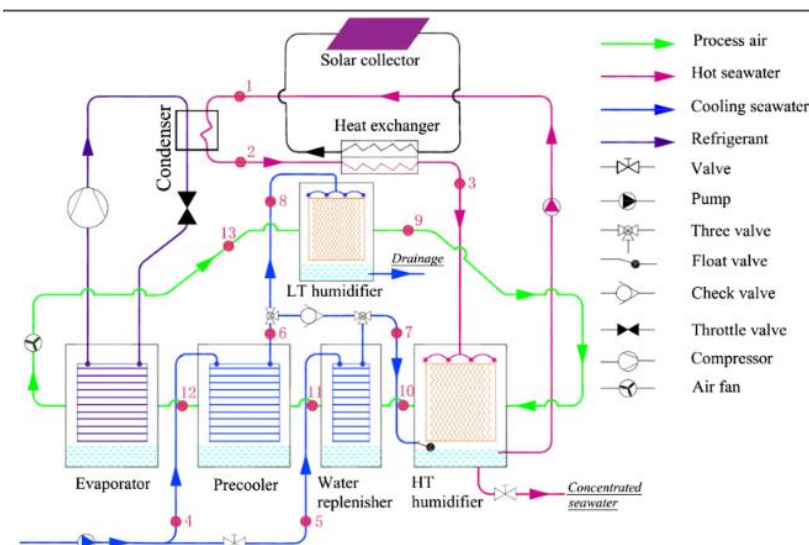


Fig. 6 Diagrama esquemático del sistema de desalinización SAPH de dos etapas basado en el proceso HDH (H. Xu & Y.J.Dai, 2019)

el sistema consta de 7 unidades de integración de recuperación, las cuales se dividieron en 7 estados de temperatura/presión, debido a esto, se adoptó un sistema de recuperación de calor por etapas, es decir para reciclar el calor sensible y latente del vapor generado, donde el sistema trabaja bajo presión barotrópica o atmosférica sin consumo de energía, de modo que se pudo concluir, que el rendimiento de productividad del agua dulce durante el día puede llegar a 4,23 kg/m² en día soleado y 3,03 kg/m² en un día nublado. Lo cual confirman que el sistema diseñado tiene un rendimiento superior en la desalinización de agua de mar sin consumo de energía. (Fig. 7)

Sistema de energía solar concentrada (CSP)

La energía solar concentrada (CSP) en el desarrollo de la desalinización se ha convertido en la alternativa más viable y sostenible como los sostiene Zhang (2013), ya que las CSP generan calor a altas temperaturas, por lo que puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica por medio de los ciclos de potencia o para satisfacer necesidades de calor para diferentes aplicaciones tales como los sistemas de desalinización, tanto a pequeña como a gran escala para la producción de agua dulce en todo el año, principalmente en

las regiones de alta radiación solar y disponibilidad de agua salina. (Kasra Mohammadi, Mohammad Saghafifar, Kevin Ellingwood, & Kody Powell, 2019)

En la actualidad, las investigaciones se centran en la búsqueda de fuentes renovables de energía alternativas (Mohammadi & Ahmadi, 2018). La energía solar centrada (CSP) es una de las tecnologías más prometedoras para el calor y la electricidad, debido a su aprovechamiento solar, los autores Mehrpooya, *et.al.* (2018), desarrollaron una planta de energía solar concentrada con los procesos de desalinización y con ciclo de refrigeración por absorción designado a suministrar energía, agua dulce y refrigeración, destinados a reducir el carbono y emisiones de dióxido. Este sistema consiste en una planta termosolar concentrada con colectores de platos parabólicos y turbina de vapor, mediante un proceso de desalinización multiefectos con alimentación paralela de agua de mar y un sistema de refrigeración de absorción de agua y amoníaco en una sola etapa como se observa en la Figura 13, dando como resultados, la destrucción del 86% de la tasa de exergía total del sistema, con una eficiencia del 66,07%, mientras que la eficiencia térmica del sistema fue de 93,91%. Es decir, la

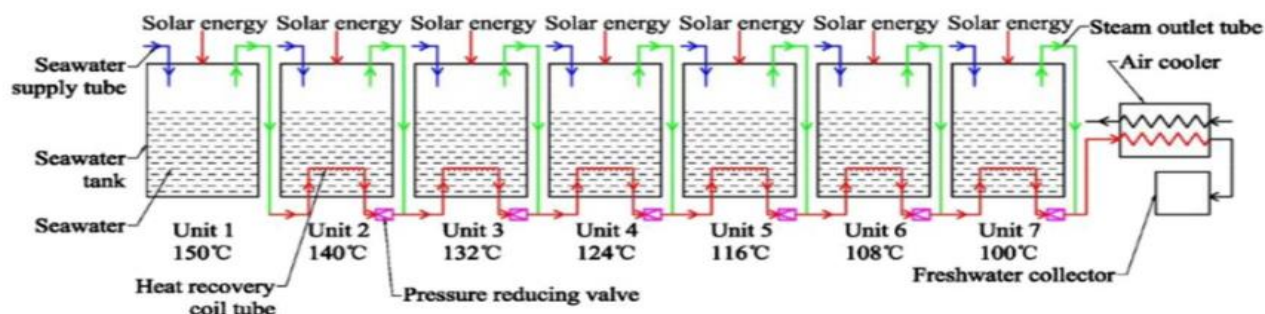


Fig. 7. Sistema diseñado para unidad y diagrama de conexión, de la línea azul: agua de mar; línea roja: agua saturada; línea verde: vapor. (Shuang-Fei Li, Zhen-Hua Liu, Zhi-Xiong Shao, Hong-shen Xiao, & Ning Xia, 2018)

debilidad del análisis energético para identificar la calidad de energía e irreversibilidades dentro del sistema. Los resultados económicos mostraron que la estructura integrada propuesta tenía un período de retorno de la inversión de 5,738 años y una ganancia anual neta de 6.828 millones de dólares por año. (Fig. 8)

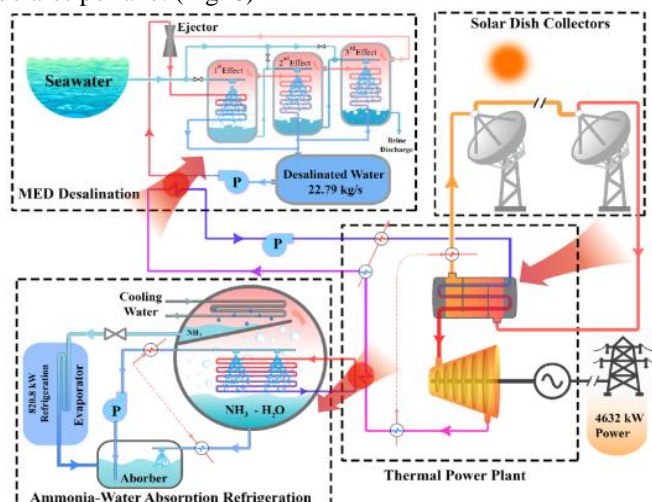


Fig. 8. Sistema esquemático de la integración planta termosolar, sistema de refrigeración absorción y ciclo MED.

Colector solar

Los colectores solares se basan en principios ópticos de reflexión con el fin de concentrar la radiación solar en un área en específico llamado foco, por lo que se puede trasladar al agua debido al diferencial térmico la energía recogida de la radiación del sol, haciendo que cambie de fase para limpiarlo (DIEZ, 2007), (Restrepo, Sánchez, & Gavis, 2007). En estos procesos la idea es obtener mejores resultados en la transferencia de calor.

Los autores, Garg, *et.al.* (2016) desarrollaron un modelo matemático para el sistema de desalinización de etapas múltiples (MSF), con recirculación salmuera (BR), el cual consiste en el uso de nanofluidos basados en un colector solar de absorción directa (DASC), con el fin de conocer el rendimiento térmico del sistema, por medio de ecuaciones que se resuelven con un código en el programa Matlab. Ambos sistemas, BR-MSF y DASC están acoplados por medio del intercambiador de calor de contraflujo. El rendimiento del sistema se cuantifica en la relación de salida obtenida (GOR). Sin embargo, este rendimiento es variado, debido a parámetros del colector. Los autores lograron deducir que, DASC puede ser utilizado como fuente de calor para el sistema BR-MSF el cual genera un alto GOR y realizaron una comparación entre el sistema BR-MSF basado en un con colector cilíndrico parabólico (PTC), mostrando que el sistema desarrollado por los autores proporciona un 11% de GOR más alto. (Fig. 9)

Por otra parte, Mosleh, *et.al.* (2018), propusieron un novedoso sistema de desalinización pasiva el cual emplea colectores de tubos evacuados de vidrio doble (TETC) el

cual se utiliza como cuenca. El TETC recibe la radiación solar convirtiéndola en calor en la superficie y lo transfiere directamente al agua en el interior por medio de convección natural haciendo que se evapore, por lo que, no existe resistencia térmica entre el colector y el depósito, con el fin de mejorar la conductividad térmica y la productividad. Los resultados muestran un aumento en la productividad de agua, por lo que esta máxima productividad se logra cuando el tubo tiene un ángulo de inclinación de 35°, lo que quiere decir que este ángulo es el óptimo y se llena el 80% con agua (Romero, Rodríguez, Ascanio, & Rincón, 2019). Sin embargo, los autores observaron que al llenar el tubo con lana de acero inoxidable se mejoró la productividad. (Fig. 10)

Los sistemas de desalinización solar se han catalogado por su baja eficiencia debido a la pérdida de calor en la superficie del colector, sin embargo, los colectores cilíndrico-parabólicos, ya que concentran la luz en una sola zona lo que hace que la pérdida de calor sea menor en comparación de los colectores ordinarios (García, 2010).

A partir, de esto, CA & PC (2018), exponen un estudio de la combinación de desalinización con colectores solares de cilindro parabólico con rastreo y seguimiento de la posición correspondiente del sol, donde, concentra la irradiación solar por medio de la línea focal que contiene el tubo receptor del colector cilindro-parabólico, por lo que el agua salubre dentro del tubo se calienta y produce vapor. Por otro lado, en el condensador, el vapor se condensa y en la salida del condensador se almacena el agua potable, de los resultados obtenidos se muestra que la eficiencia del sistema depende principalmente del rastreo de la posición de los rayos de sol y del receptor focal. Este sistema obtuvo un rendimiento de 2 L/m² y una eficiencia de 12,74%. Finalmente, se enviaron muestras del agua dulce producida a laboratorios, donde confirmaron que el agua era totalmente libre de sales y apta para consumir.

Sistema de desalinización solar híbrido utilizando varias formas de receptor de cavidad

El autor, Alireza Rafiei, *et.al.* (2019), desarrollaron un estudio de un sistema híbrido de desalinización solar, el cual consiste en la aplicación de un concentrador de platos con receptor de cavidad para la desalinización, donde los receptores se insertan como receptores fijos para lograr un mejor rendimiento, por lo que los receptores se aplicaron como fuente de calor. Este sistema está constituido por módulos térmicos fotovoltaicos, colectores de platos y unidades de desalinización de humidificación-deshumidificación, donde esta unidad comprende una configuración de flujo de agua abierta y los concentradores se utilizan para calentar el agua, con el fin de mejorar el rendimiento, para esto se utilizaron tres formas de receptores de cavidad, cilíndricos, cúbicos y hemisféricos.

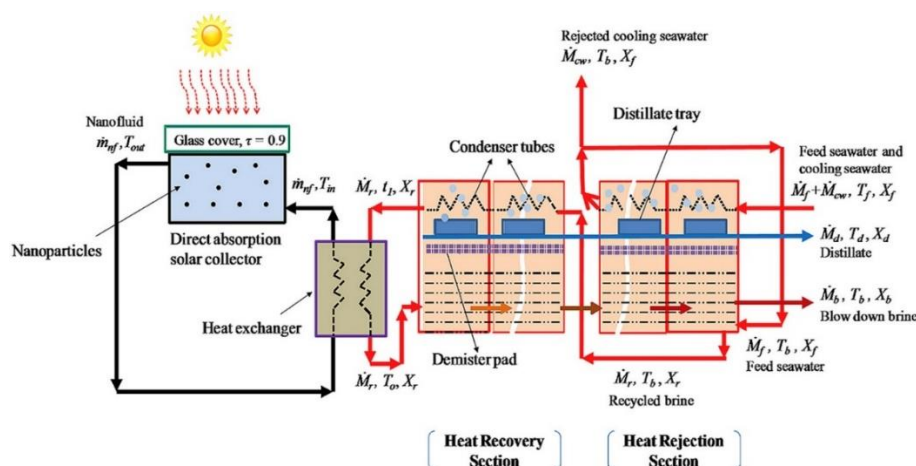


Fig. 9. Esquema del sistema de recirculación de salmuera-desalinización instantánea por etapas acoplado con un colector solar de absorción directa sin base de fluido. (Kapil Garg, Vikrant Khullar, K. Das, & Himanshu Tyagi, 2016)

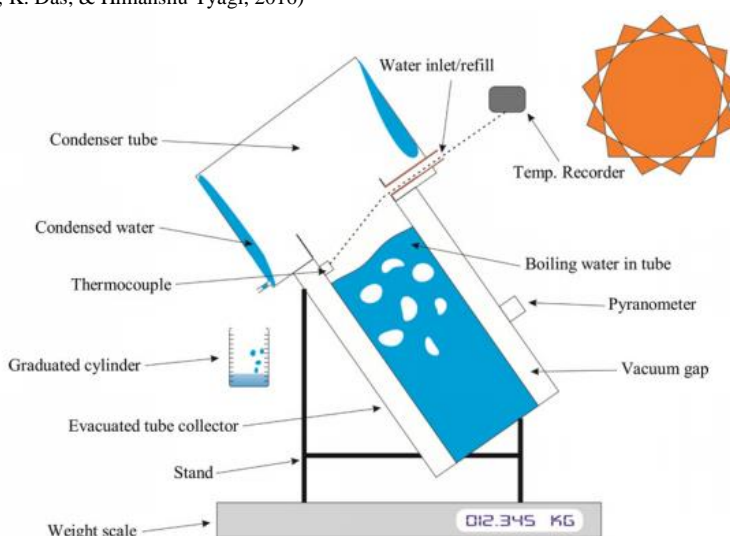


Fig. 10. Esquema de la configuración experimental con los instrumentos de medición. (Mosleh, Mamouri, & Jafari, 2018)

De los resultados se obtuvieron, el aumento de la productividad de agua dulce al aumentar el caudal de agua, de aire y disminuir la temperatura de entrada del fluido. Igualmente, aumentó la relación de ganancia de salida proporcional al caudal de agua, de aire y la temperatura. Por último, se concluyó, que el receptor con menor eficiencia fue el receptor de cavidad hemisférica.

Sistema combinado de desalinización y CCHP (calefacción y energía de refrigeración combinadas)

La integración de las energías renovables con los sistemas de desalinización y calefacción, refrigeración y energía (CCHP) combinado, es una de las alternativas posibles, por medio de una metodología de dos niveles con el fin de optimizar dicho sistema. Los autores Luo, *et.al.* (2018), suponen un diseño en una isla remota del Mar del Sur de China, el cual consiste en el método de desplazamiento, el método de ramificación y unión

los cuales se usan para solucionar el problema de optimización por medio de programación lineal de enteros mixtos, en las etapas de diseño y operación. Donde se obtiene como resultado, que la capacidad del sistema de almacenamiento eléctrico es menor a la capacidad térmica debido a la elevada relación entre costo y rendimiento del almacenamiento eléctrico, sin embargo, puede suplir las demandas energéticas, los autores, observan que al integrar un tanque de agua mejora el rendimiento de productividad.

Chimeneas solares

Las chimeneas solares son dispositivos fiables con tiempo de vida de funcionamiento de larga espera, por lo general se componen de una torre y un colector abierto en los bordes, por lo que, la radiación incidente calienta el suelo bajo un colector, el cual a su vez, calienta el aire dentro de la chimenea solar, para generar un flujo de aire caliente que puede conducir turbinas eólicas y producir energía eléctrica, sus costos de

mantenimiento son relativamente bajos, debido a su estructura robusta y sencilla, la eficiencia de estas chimeneas es muy baja, van desde el 0,5-10% de la entrega de energía solar. Sin embargo, no hay suficientes estudios del uso de las chimeneas solares para la desalinización, solo hay unos pocos estudios disponibles, según los autores Maia, *et.al.* (2019), ya que, se centran en simulaciones matemáticas y modelado, aunque el sistema chimenea-desalinización solar híbrido tiene un gran potencial y puede maximizar el rendimiento, sigue siendo una fase de investigación.

Las plantas de chimenea solar no han tenido mayores manifestaciones y han sido producidas de forma intermitente sin mejoras en el rendimiento, existen diversos proyectos a nivel internacional como, por ejemplo, el sistema de chimenea con 1500m de alto planeado para África del Sur, una planta de 200 MW en China, tres proyectos más en EE. UU de 200 MW (Al-Kayiem & Aja, 2016), estos solo han sido planeados y no se han construido, aunque hacen la promesa de cumplir con las escalas necesarias y un mejor rendimiento, teniendo en cuenta que las chimeneas tendrían que tener precios de entrega de inversión y capital relativamente bajos. (Guo, Li, Xu, Xu, & Li, 2019)

Aplicación de nanofluidos de nanotubos de carbono recuperables en el sistema de desalinización solar.

Desde el 2015, algunas investigaciones se han conducido tras el proceso de evaporación en nanotubos bajo radiación solar, donde los resultados no mostraron el mejor porcentaje en tasa de evaporación (Ni, Miljkovic, & Ghasemi, 2015), (Ascanio, Rincón, Cardenas, Sandoval, & Tarazona, 2019). Por lo tanto, los autores Chen, *et.al.* (2019) prepararon un nanofluido recuperable con agua de salobre en el sistema de desalinización, queriendo mejorar el rendimiento de los alambiques solares. Los nanofluidos de carbono de pared múltiple recuperable (MWCNT) que se fabricaron y modificaron con Fe en agua salina para evitar el alto costo y la contaminación secundarios. Estos nanofluidos MWCNT magnéticos podrían mejorar la tasa de utilización de la energía solar y la productividad de la energía térmica para la evaporación de agua salina. Donde, se concluyó que los nanofluidos recuperables aumentan el rendimiento y garantiza un gran potencial para la aplicación de los alambiques solares.

Sistema Combinado con energía renovable

Actualmente la situación de agua es alarmante, debido a la contaminación y la explotación en aguas superficiales ya que disminuye la cantidad/calidad

de los recursos hídricos, principalmente en las zonas áridas y remotas, este fatal aumento en el suministro de agua desalada, creara problemas, empezando con el consumo de energía. Un estudio confirma que para la producción de 13 millones m³ de agua potable por día requiere 130 millones de toneladas petróleo al año (Organización Mundial de la Salud, 1984), lo cual aumenta la contaminación por el CO₂ producido.

Debido a lo anterior, las energías renovables pretenden darles solución a estos problemas, por medio de la integración de los sistemas de desalinización con las fuentes de energía renovable las cuales se dividen en dos:

- Procesos de desalinización impulsados por calor producido por los sistemas de energía renovable.

- Procesos de membrana y destilación impulsado por electricidad o energía mecánica derivado de las energías renovables (Eltawil, Zhengming, & Yuan, 2009)

Por lo tanto, los sistemas de desalinización integrados o híbridos con las energías renovables, son el tema más relevante en la actualidad, permitiendo enfrentar la escasez de agua dulce. Es por eso que, los autores A.E. Kabeel & MS El-Said (2018), ofrecen un estudio sobre un sistema híbrido de desalinización impulsado por energía solar modificado (SS-HDH). El cual consiste en un alambique solar (SS) y el proceso de humidificación-deshumidificación (HDH), integrado con un calentador solar de agua y aire, donde estudiaron los indicadores del rendimiento y la productividad total del sistema. De modo que, este sistema ha tenido un resultado positivo en el rendimiento y la productividad, debido a que la productividad máxima fue de 18,25 l/m día con caudales máscos de aire y agua. La eficiencia de humidificación alcanzo el 79% y se afectó por el aumento del caudal máscico de agua más que un aumento máscico de aire, es decir, el rendimiento del sistema se ve afectado por el caudal máscico del aire.

Del mismo modo, los autores Morad, Maghawry, & Wasfy (2017), realizaron una búsqueda literaria de métodos o procesos que mejoren el bajo rendimiento de los sistemas de desalinización actuales, donde encontraron una técnica que utilizan condensadores externos, a partir de esta revisión, decidieron modificar y desarrollar un sistema impulsado por energía solar, el cual utiliza un condensador combinado con un colector solar de placa plana y una bomba de vacío, con el objetivo de comparar su rendimiento con un sistema de desalinización solar ordinario sin bomba de vacío y mejorar su rendimiento. Por lo que se lograron

resultados positivos, ya que se aumenta la productividad del agua, con solo integrar la bomba de vacío y el costo disminuye al aumentar la velocidad de flujo de agua, debido a la reducción de ebullición del agua. La productividad máxima de agua dulce fue de 10,94 L/día con un costo de 0,031 US \$/L la cual se relaciona con la temperatura ambiente máxima y la radiación de la energía solar. Por otra parte, al aumentar el nivel de salinidad del agua disminuye la productividad.

Sistema híbrido de desalinización-enfriamiento por adsorción

Este sistema híbrido consiste en colectores solares con tubos de vacío (CTCE), dos tanques de almacenamiento, desalinización de adsorción híbrido solar (ADCS) híbridos, tres bombas de entrega y un termostato, por medio del software TRNSYS que emplea datos meteorológicos de la ciudad a la que se va a realizar el estudio, en este caso Assiut- Egipto, con un sistema de enfriamiento y ADCS semicontinuo que utiliza gel de sílice-agua. Es así como el autor S. Ali, *et.al.* (2017) muestra los resultados del sistema, donde la productividad de agua, es aproximadamente 10 m³/kg, por otra parte, la productividad de agua dulce y el efecto de enfriamiento aumenta directamente con la radiación solar, lo que concluye que el ADCS híbrido, presenta una alternativa eficiente utilizando energía solar.

Por otra parte, Hegazy Rezk, *et.al.* (2019), estudio el rendimiento del sistema de enfriamiento de desalinización por adsorción alimentado con energía solar (SADC), el cual se compone por tres partes principales, un evaporador, dos camas de adsorción alternadas y un condensador, donde el vapor rechaza al condensador que se lleva a cabo del proceso de condensación produciendo el agua dulce, este proceso se estudia por medio de un algoritmo de optimización, por lo cual, ha propuesto un modelo matemático que emplea gel de sílice, por lo que posteriormente aplica el algoritmo llamado optimizador de movimiento radial, que mejora los parámetros operativos del sistema. Como resultados se mostraron que, esta técnica de optimización es válida debido a que mostraron las mejores condiciones del sistema SADC, teniendo como rendimiento 6,9 m al día/tonelada de agua desalinizada y con eficiencia del 70%.

Sistema híbrido de energía solar híbrido conectado a la red

Chaouki, *et.al.* (2018), estudian dos sistemas de energía híbridos renovables para alimentar una planta desaladora, con el fin de utilizar energía limpia para satisfacer la carga eléctrica demandada

por la planta, el primero es un conjunto fotovoltaico, rejilla y convertidor conectado a la red, el segundo consta de un generador fotovoltaico, generador diésel, banco de baterías y un convertidor el cual está fuera de la red, el uso de estos sistemas conectados a la red permitirá ahorrar en costos ya que se reducen los equipos y la instalación de nuevos sistemas de energía, se sabe que los paneles solares generan más electricidad que la demandada por la carga, es por eso que este exceso de energía se almacenara en un banco de baterías, para luego ser suministrada a la red. Donde los autores encontraron, que el sistema solar conectado a la red, produce un mejor rendimiento en comparación con el segundo sistema, en el momento de satisfacer la energía de la carga de la planta, lo que quiere decir que el sistema de energía híbrido propuesto es sostenible económicamente y viable.

Sistema de desalinización de agua basado en membrana

El proceso de desalinización a través de membranas, separa el agua salubre en dos vertientes, una con agua potable y baja concentración de SDT y otra con una corriente de agua con alta concentración de SDT, este sistema como su nombre lo indica se basa en membranas, donde se realiza el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos cotidianos. En otras palabras, las soluciones con menor concentración se mueven por la diferencia de energía de potencial, hacia las soluciones con mayor concentración por medio de una membrana semipermeable y sin aplicar ninguna fuerza del exterior (F, 2000), por lo que, los sistemas más usados son Osmosis Inversa y Electrodialisis.

Los autores Shafieian & Khiadani (2019), proponen un sistema de desalinización combinado a base de membrana solar, el cual se compone de tubos de vidrio al vacío para aumentar la energía absorbida y disminuir la pérdida de calor, tubos de calor para transferir la energía y un módulo de destilación de membrana de contacto directo, con el fin de mejorar la productividad de agua potable y su eficiencia, por lo que se agregó una unidad de enfriamiento a la unidad de desalinización. Para esto se experimentó el sistema en 3 casos diferentes, el caso 1 con la unidad de enfriamiento en el verano, el caso 2 sin unidad de enfriamiento en invierno y el caso 3 en condiciones normales. Los autores mostraron como resultado, que la eficiencia mejoro un 46% en el primer caso y un 61% en el segundo caso, esto quiere decir, que la técnica implementada de la unidad de enfriamiento aumenta la efectividad del sistema.

Desalinización de ósmosis inversa (RO).

El proceso de ósmosis inversa (RO), tiene varias aplicaciones en la industria, como desalinizar el agua de mar, en procesamiento de alimentos y tratamiento de aguas residuales (Al-Obaidi, Li, Kara-Zaitri, & Mujtaba, 2017). Este método de separación es el proceso con mayor eficacia y es respetuosa con el medio ambiente, manteniendo el mismo tiempo con un bajo consumo de energía (Ang, Nordin, Mohammad, Benamor, & Hilal, 2017). Este proceso RO se basa en la separación de dos medios con diferentes concentraciones de soluto a través de una membrana semipermeable impulsado a presión, donde el agua y algunas fracciones de iones se pueden trasladar por medio de la membrana desde el lado con menor concentración al de mayor concentración, mientras que la mayoría de sales son rechazados. (Hilal & Wright)

Los autores Wu, *et.al.* (2018), desarrollaron un sistema de energía híbrido, basados en desalinización por ósmosis inversa acoplados con un sistema fotovoltaico y combustible diésel, en una planta de energía con el fin de satisfacer la demanda de carga y aumentar la disponibilidad de agua en Irán. Donde proponen un diseño óptimo del sistema autónomo fotovoltaico híbrido con combustible diésel, batería y la ósmosis inversa, por lo que, se utiliza una técnica metaheurística basada en la búsqueda tabú, donde se obtienen como resultados, una alta eficiencia siendo económico y ambientalmente amigable, sin embargo, siendo un único sistema diésel o un único sistema fotovoltaico.

Con respecto a lo anterior; los autores Al-Obaidi, Manenti, & Mujtaba (2019), han trabajado el diseño y optimización una planta híbrida de destilación de efectos múltiples y de desalinización por ósmosis inversa (MED+RO), donde se basaron en la probabilidad de acoplar la planta desaladora con una granja solar fotovoltaica, con el fin de generar energía eléctrica a bajo costo y amigable con el medio ambiente. Por lo que dio como resultado, que la granja solar proporciona la energía necesaria para el sistema desalinización híbrido, sin embargo, el modelo curiosamente calcula el costo de electricidad generada con energía fotovoltaica, por lo que se probaron en cuatro ubicaciones para el evaluar dicho costo y los autores lograron deducir que el uso del PV permite reducir el costo de agua dulce en diferentes zonas.

Sistema de electrodiálisis.

El sistema de electrodiálisis (ED), es una tecnología de membrana accionada eléctricamente con muchas aplicaciones industriales, como la desalinización

solar, la producción de sal y tratamiento de agua. La ED es una alternativa particular para la desalinización debido a la alta recuperación de agua en un 85-90%, bajo mantenimiento, larga vida y fuerte estabilidad química y mecánica del sistema (Xu & Huang, 2008).

Por lo tanto, los autores Malek, Ortiz, & Schulte-Herbrüggen (2016), estudian un sistema de electrodiálisis impulsado por energía eólica, analizando el comportamiento de las turbinas sin almacenamiento de energía. El gran desafío, es el acoplamiento directo de la DE con la energía eólica, debido al impacto de los ciclos de energía durante los períodos de oscilación y largos tiempos sin presencia del viento, donde el sistema obtuvo un alto índice de productividad con calidad en el rango de los parámetros aprobados. La productividad de agua y energía aumentan proporcionalmente a la velocidad del viento, sin que las fluctuaciones (moderadas) afecten el rendimiento del sistema, sin embargo, cuando estas fluctuaciones se presentaron de manera intensa y con largos periodos de oscilación, la productividad disminuyó. Lo que da a entender que el sistema es altamente confiable para las zonas con escasas de agua.

3. CONCLUSIONES

En este proyecto se realizó una revisión teórica de los sistemas de desalinización solar, su estado actual tecnológicamente y los estudios que se centran en estos sistemas, la revisión ofrece una visión general de las tecnologías en la desalinización actuales y se centra en sistemas híbridos que aprovechan la radiación solar, ya sea para plantas que producen solo agua o para plantas de cogeneración de agua dulce, el estudio presento que:

El sistema CSP puede variar en función la temperatura y producir electricidad, el cual es adecuado para conducir una gran variedad de sistemas de desalinización clasificados, ya sea como procesos térmicos o los de membrana, los procesos de membrana se basan en gradientes de concentración guiados eléctricamente como los RO, y los sistemas térmicos necesitan de la evaporación del agua para separar la sal, tales como los MED o MSF, en estos sistemas accionados térmicamente para mejorar el rendimiento y reducir costos se hace viable el uso del TVC o una bomba de calor de absorción; Este sistema CSP- híbridos se clasifican según su aplicación ya sea para la cogeneración de energía y las de producción de solo agua. La revisión demostró que existen varias formas posibles para hibridar un CSP, considerando factores como la apropiada selección de las

tecnologías (los colectores solares), tal como el estudio de la planta desalinizadora integrada con un tubo receptor del colector cilindro-parabólico, así mismo, mostro resultados de alto rendimiento en productividad de agua dulce, la cual era totalmente libre de sales y apta para consumir, mejorando su eficiencia, debido a su sistema de rastreo de captación solar. De tal forma que las plantas de desalinización CSP- híbridos, son potencialmente rentables para la producción de agua dulce y de manera amigable con el medio ambiente, aunque todavía falta investigación significativa y que se avance para estas plantas para ser económicamente viable.

Los estudios presentaron varios parámetros de rendimiento para el alcance de una alta eficiencia, tales como la eficiencia térmica global, la capacidad de productividad de agua dulce, la capacidad de energía, así mismo, evaluaron el desempeño de varias configuraciones y métodos de operación para encontrar el esquema óptimo, considerando el efecto que tiene lugar en el rendimiento como la ubicación que determina el nivel de radiación solar disponible y las características del agua salubre o de mar que se vaya a utilizar, por consiguiente, estos sistemas de desalinización solar (plantas híbridas con energía solar), se comparan con las plantas de desalinización tradicionales impulsados por combustibles fósiles, y muestran su gran viabilidad actualmente, contribuyendo a reducir la contaminación de CO₂, y disminuyendo los problemas medioambientales por agotamiento de los recursos naturales. Por lo que, se destaca el sistema por Ósmosis inversa, en el caso de estudio (MED + RO), donde el costo de la energía eléctrica producida por el sistema es de 1,1 €/ Kwh relativamente bajo y el costo del agua producida es de 0.61 €/m³, este sistema es muy competitivo no solo en lo económico sino, para lugares aislados. Es evidente, que el consumo energético y el costo de producción de la Ósmosis Inversa presentan ventajas significativas sobre el resto de los procesos y siendo integrada con una granja solar fotovoltaica, se aumentan las ventajas.

En la mayoría de casos, la falta de agua potable se presenta en lugares con abundancia de radiación solar, lo que permite el uso de diversos métodos con la energía solar, debido a que las plantas de desalinización consumen un alto valor de energía eléctrica, aunque la desalación no es un proceso que contamine, la generación de electricidad para suplir la demanda hace necesario vincular la producción de agua con fuentes de energía renovable.

Finalmente, la ósmosis inversa presenta una ventaja por encima de los demás sistemas térmicos y es que este proceso hace uso tanto del agua salmuera como del agua de mar, presentando costos de inversión relativamente bajos dependiendo del agua que se pretende desalar, aunque para este proceso se sea indispensable el uso de tratamiento fisicoquímico se puede acoplar con otro tipo de sistema y con energías renovables que supla la demanda de energía que se necesita para operar las bombas de alta presión.

4. Referencias

- A.E. Kabeel, & MS El-Said, E. (2018). Estudio experimental sobre un sistema de desalinización híbrido impulsado por energía solar modificada. *Desalinización*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.017>
- Abdellah Shafieian, & Mehdi Khiadani. (2019). Un novedoso sistema de desalinización de agua basado en membrana de contacto directo accionado por energía solar. *Conversión y gestión de energía*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112055>
- Ahmed, Mossad, R., & Barforoush, A. S. (2016). Una revisión de los sistemas de desalinización de agua integrado con energía renovable. *Energía y potencia*.
- Alireza Rafiei, Alsagri, A. S., Mahadzir, S., Loni, R., Najafi, G., & Kasaeian, A. (2019). Análisis térmico de un sistema de desalinización solar híbrido utilizando varias formas de receptor de cavidad: cúbica, cilíndrica y hemisférica. *Energy Conversion and Management*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111861>
- Al-Kayiem, H., & Aja, O. C. (2016). Progreso histórico y reciente en tecnologías de mejora de plantas de energía de chimenea solar. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 58, 1269-1292. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.331>
- Al-Obaidi, M., Li, J.-P., Kara-Zaitri, C., & Mujtaba, I. (2017). Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales basado en ósmosis inversa para la eliminación de clorofenol mediante algoritmos genéticos. *Revista de Ingeniería Química*, 316, 91-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.096>
- AL-SAHALI, M. (2007). Developments in thermal desalination process, design, energy and costing aspects. *Journal of desalination*, 214, 227-240.
- Amir Mahmoud, Hassan Fath, & Mahmoud Ahmed . (2018). Mejora del rendimiento de un sistema híbrido de desalinización / deshumidificación de alambique solar híbrido impulsado por energía solar integrado con concentrador solar y paneles fotovoltaicos. *Desalinización*, 165-

179.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.052>
- Ang, W., Nordin, D., Mohammad, A., Benamor, A., & Hilal, N. (2017). Efecto del rendimiento de la membrana, incluido el ensuciamiento, en la optimización de costos en el proceso de desalinización de agua salobre. *Ingeniería Química Investigación y Diseño*, 117, 401-413. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.041>
- Ascanio, J. G., Rincón, A. D., Cardenas, C. G., & Sandoval, C. L. (2019). Incidence of corrosion in low voltage electrical conductor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012055>
- Ascanio, J. G., Rincón, A. D., Cardenas, C. G., Sandoval, C. L., & Tarazona, B. E. (2019). Characterization of the mechanical vibration signals associated with unbalance and misalignment in rotating machines, using the cepstrum transformation and the principal component analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012057>
- Ascanio, J. G., Sandoval, C. L., Rincón, A. D., Tarazona, B. E., & Paez, R. E. (2019). Building a prototype for functional analysis of the energy potential of the water flow in pipe ½ "using microturbines applied to Unidades Tecnológicas de Santander. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012056>
- Bennett, A. (2013). 50 ° Aniversario: Desalinización: 50 años de progreso. *Filtración + Separación*, 50(3), páginas 32-34, 36-39.
- CA, A., & PC, S. (2018). Modelado y evaluación del rendimiento del sistema de desalinización de colectores solares de cilindro parabólico. *Materialstoday*, 780-788. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.147>
- Chaouki Ghenai, Adel Merabet, Tareq Salameh, & Colon Pigem, E. (2018). Sistema híbrido de energía solar híbrido conectado a la red y autónomo para planta de desalinización. *Desalinización*, 172-180. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.044>
- Corrado, S. (2004). Approaches to desalination project budgeting. *Paper Presented at the International Conference on Desalination Costing*. Limasol.
- DÉVORA, G. (2007). Desalinización de agua de mar, una estrategia para detonar el desarrollo del noroeste de México. *Los acuíferos costeros: retos y soluciones*, 1, 1025-1034.
- DIEZ, G. (2007). *Diseño de un laboratorio de tratamientos de agua para sistemas de potabilización*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- E, C., & MR, L. (1976). Desalinización. En *Hidrología subterránea* (pág. 2350). Barcelona : Omega.
- Elminshawy, N. A., Siddiqui, F. R., & Addas, M. F. (2015). Estudio experimental y analítico sobre el aumento de la productividad de un nuevo sistema de humidificación-deshumidificación solar (HDH). *Desalinización*, 365, 36-45. doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001191641500106X>
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). Una revisión de las tecnologías de energía renovable integradas con los sistemas de desalinización. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 13(9), 2245-2262.
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). Una revisión de las tecnologías de energía renovable integradas con sistemas de desalinización. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 2245-2262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.011>
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). Una revisión de las tecnologías de energía renovable integrado con los sistemas de desalinización. *Energía renovable y sostenible*.
- F, A. (2000). Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, 15(1), 27-49.
- Faegh, M., Behnam, P., & Shafii, M. B. (2019). Una revisión sobre los avances recientes en los sistemas de desalinización de humidificación-deshumidificación (HDH) integrados con tecnologías de refrigeración, energía y desalinización. *Conversión y gestión de energía*, 1002-1036. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.063>
- Filippini, Al-Obaidi, M., Manenti, F., & Mujtaba, I. (2019). Diseño y evaluación económica del sistema híbrido de ósmosis inversa y multiefectos con energía solar para la desalinización de agua de mar. *Desalinización*, 114-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.016>
- G, F., & Vk, S. (2008). Evaluacion Techno-economico de una planta de desalacion de agua con energía. *Conversión de energía y gestión*.
- Gang Wu, Hongfei Zheng, Xinglong Ma, Cagri Kutlu, & Yuehong Su. (2017). Investigación experimental de un sistema de desalinización de humidificación-deshumidificación de etapas múltiples calentado directamente por un concentrador solar cilíndrico de lente Fresnel. *Conversión y gestión de energía*, 241-251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.011>
- García, F. (2010). Energía renovable. Renovar.

- Guo, P., Li, T., Xu, B., Xu, X., & Li, J. (2019). Preguntas y comprensión actual sobre la planta de energía de chimenea solar: una revisión. *Conversión y gestión de energía*, 182, 21-33. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.063
- H. Xu, & Y.J.Dai. (2019). Análisis de parámetros y optimización de un sistema de desalinización de bomba de calor asistida por energía solar de dos etapas basado en el proceso de humidificación-deshumidificación. *Energía solar*, 185-198. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.043
- Hammadi, S. H. (2018). Análisis teórico de la humidificación: proceso de deshumidificación en un sistema de desalinización solar de tipo abierto. *Estudios de caso en ingeniería térmica*, 843-851. doi:https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.09.009
- Hegazy Rezk, S. Alsaman, A., Mujahed Al-Dhaifallah, A. Askalany, A., Ali Abdelkareem, M., hAhme, & M. Nassef. (2019). Identificar las condiciones óptimas de funcionamiento del sistema de enfriamiento de desalinización por adsorción basado en gel de sílice a través de la optimización moderna. *Energía solar*, 475-489. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.024
- Hilial, N., & Wright, C. (s.f.). Explorando el estado actual del agua para el agua rentable.
- IDA. (2007). *Desalting plants inventory*. Madrid: international desalination association.
- Kapil Garg, Vikrant Khullar, K. Das, S., & Himanshu Tyagi. (2016). Un sistema de desalinización solar modificado que utiliza un colector de tubos evacuado. *Desalinización*, 30-38. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.030
- Kasra Mohammadi, Mohammad Saghafifar, Kevin Ellingwood, & Kody Powell. (2019). Sistemas de desalinización híbridos de energía solar concentrada (CSP): una revisión. *Desalinización*. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114083
- Khan, M. A., Rehman, S., & Al-Sulaiman, F. A. (2018). Un sistema híbrido de energía renovable como fuente potencial de energía para la desalinización del agua mediante ósmosis inversa: una revisión. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 97, 456-477. doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118306336
- KV, W., & C, P. (2015). Recomendaciones para el agua y la energía. *Diario de tecnologías de los recursos energéticos*.
- Lattemann, S., & Hoepner, T. (2007). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Science Direct Publications*, 220, 5-14.
- Liyanarachchi, S., L. Shu, S. M., Jegatheesan, V., & Baskaran, K. (2014). Problemas en los procesos de desalinización industrial de agua de mar y posibles soluciones sostenibles: una revisión. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 13, 203-214. doi:https://doi.org/10.1007/s11157-013-9326-y
- M.M. Morad, AM El-Maghawry, H., & I. Wasfy, K. (2017). Un sistema de desalinización desarrollado por energía solar para mejorar la productividad del agua dulce. *Energía solar*, 20-29. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002
- Maia, C. B., Silva, F. V., Oliveira, V. L., & Kazmerski, L. L. (2019). An overview of the use of solar chimneys for desalination. *Desalination*, 183, 83-95. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.007
- Maia, C. B., VM Silva, F., LC Oliveira, V., & L. Kazmerski, L. (2019). Una descripción general del uso de chimeneas solares para la desalinización. *Energía solar*, 83-95. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.007
- Malek, P., Ortiz, J., & Schulte-Herbrüggen, H. (2016). Desalinización descentralizada de agua salobre mediante un sistema de electrodialisis alimentado directamente por energía eólica. *Desalinización*, 54-64. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.023
- Medina, J. (2000). En *Desalinización de aguas salobres y de mar en ósmosis inversa* (págs. 117-138). Madrid: Mundi Prensas.
- Mehdi Mehrpooya, Bahram Ghorbani, & Sina Hosseini, S. (2018). Evaluación termodinámica y económica de un novedoso sistema de energía solar concentrada integrado con refrigeración por absorción y ciclos de desalinización. *Conversión y gestión de energía*, 337-356. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.109
- Mohammadi, M., & Ahmadi, E. (2018). Estudio tecnoeconómico-ambiental del sistema de suministro de energía híbrido: un estudio de caso en Irán. *Tecnologías y evaluaciones de energía sostenible*, 1-10.
- Mosleh, M., Mamouri, S. S., & Jafari, M. L. (2018). Un sistema de desalinización solar modificado que utiliza un colector de tubos evacuado. *Desalinización*, 30-38. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.030
- Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M., & Antar, M. (2010). El potencial de la desalinización por humidificación-deshumidificación impulsada por energía solar para la producción

- descentralizada de agua a pequeña escala. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 14(4), 1187-1201. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014
- Ni, G., Miljkovic, N., & Ghasemi, H. (2015). Calentamiento solar volumétrico de nanofluidos para la generación directa de vapor. *Nano energía*, 290-301. doi:https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.08.021
- ORFI, J., LAPLANTE, M., MARMOUCH, H., GALANIS, N., BENHAMOU, B., & NGUYEN, C. (2004). Estudio experimental y teórica de un sistema de humidificación-deshumidificación de desalinización de agua. *Desalinización*, 170, 151-159.
- Organización Mundial de la Salud. (1984). *37a Asamblea Mundial de la Salud*. Ginebra: Asamblea Mundial de la Salud, 37. (1984).
- Porta, M., Rubio, E., & Fernandez, E. (2002). Sistema de desalación solar de agua de mar para riego eficiente en un módulo de cultivo. *Ingeniería hidráulica en México*, 17(2), 55-64.
- Restrepo, I., Sánchez, L., & Gavis, A. R. (2007). *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*. Cali: Universidad del Valle.
- Rincón, A. D., Portillo, L. A., Meneses, A. J., Cárdenas, C. G., Sandoval, C. L., Ascanio, J. G., . . . Mantilla, R. A. (2019). Manufacture of hybrid pieces using recycled R-PET, polypropylene PP and cocoa pod husks ash CPHA, by pneumatic injection controlled with LabVIEW Software and Arduino Hardware. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844. Obtenido de https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012054
- Rodriguez, L. G. (2003). Aplicaciones de las energías Renovables en desalación: estado del arte. *Energía solar*, 75, 81-93.
- Romero, B. T., Rodriguez, C. S., Ascanio, J. V., & Rincón, A. D. (2019). Development of an artificial vision system that allows non-destructive testing on flat concrete slabs for surface crack detection by processing of digital images in MATLAB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 844. Obtenido de https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012058
- S. Ali, E., K. Harby bAhmed, A. Askalany, Refaat, M., Diab bAhmed, & S. Alsaman. (2017). Efecto del clima en un sistema híbrido de desalinización-enfriamiento por adsorción con energía solar: un estudio de caso del clima de Egipto. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 663-672.
- Shuang-Fei Li, Zhen-Hua Liu, Zhi-Xiong Shao, Hong-shen Xiao, & Ning Xia. (2018). Estudio de rendimiento en un sistema pasivo de desalinización solar de agua de mar con recuperación de calor multiefectos. *Energía aplicada*, 343-352. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.064
- Siddiqi, A., & Anadon, L. D. (2011). El nexo agua-energía en Medio Oriente y África del Norte. *La política energética*, 39(8), 4529-4540.
- Valero, A. (2001). *La desalinización como alternativa al plan hidrologico nacional*. (Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE)) Recuperado el 27 de 01 de 2020, de http://circe.cps.unizar.es/spanish/
- Wenjing Chen, Changjun Zou, Xiaoke Li, & Hao Liang. (2019). Aplicación de nanofluidos de nanotubos de carbono recuperables en el sistema de desalinización solar: una investigación experimental. *Desalinización*, 92-101. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.025
- WHO. (2007). *Desalinización para el suministro de agua potable segura*. Ginebra: Guía de los Aspectos Ambientales y de Salud Aplicables a las Desalinización. .
- Wu, B., Maleki, A., Pourfayaz, F., & Rosen, M. A. (2018). Diseño óptimo de desalinización de ósmosis inversa autónoma impulsada por un sistema híbrido de generador fotovoltaico y diesel. *Energía solar*, 91-103. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.016
- Xi Luo, Ying Zhu, Jiaping Liu, & Yanfeng Liu. (2018). Diseño y análisis de un sistema combinado de desalinización y CCHP (calefacción y energía de refrigeración combinadas) que integra la energía solar basada en un modelo de optimización de dos niveles. *Ciudades sostenibles y sociedad*, 166-175. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.023
- Xu, T., & Huang, C. (2008). Tecnologías de separación basadas en electrodialisis: una revisión crítica.
- Yamali, C., & Solmus, I. (2008). Un sistema de desalinización solar que utiliza el proceso de humidificación-deshumidificación: estudio experimental y comparación con los resultados teóricos. *Desalinización*, 538-551. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.054
- Yunsheng Zhao, Hongfei Zheng, Shen Liang, Nan Zhang, & Ma, X. L. (2019). Investigación experimental sobre el sistema de desalinización solar de deshumidificación de humidificación de flujo cruzado (HDH) en cuatro etapas con deshumidificadores de contacto directo. *Desalinización*, 147-157. doi:https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.06.003
- Zhang, H. (2013). Centrales solares concentradas: metodología de revisión y diseño. *Revisiones de energía renovable y sostenible*, 466-481.