

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Civil

“INFLUENCIA DEL TIPO DE DISPOSITIVO EN LA EFICIENCIA DE DESALINIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA POTABLE: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA ENTRE 2010-2020”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en **Ingeniería Civil**

Autora:

Luciana Arlette Hernandez Rodriguez

Asesor:

Ph.D. Heberth Diestra Cruz

Trujillo - Perú

2021

DEDICATORIA

A Dios por iluminar mi camino en cada uno de los días de mi vida y por darme la fortaleza
necesaria para terminar con éxito este trabajo.

A mis padres, por todo el apoyo incondicional, ánimo, valores y deseos de superación que
siempre me han inculcado.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme por el camino del bien a lo largo de mi vida universitaria y por brindarme
paz en los tiempos difíciles de mi vida.

A mis padres, por todo el esfuerzo y sacrificio que han realizado para convertirme en una profesional de bien. En especial a mi madre, que a pesar de las dificultades, siempre me ha
brindado mucha fortaleza para seguir adelante.

Al Ing. Heberth Diestra Cruz por sus enseñanzas y asesoramiento en el transcurso de la
elaboración de este trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO	2
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	12
CAPÍTULO III. RESULTADOS	16
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	31
REFERENCIAS.....	37
ANEXOS	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos de investigación incluidos en la revisión sistemática.....	14
Tabla 2. Tecnología de los procesos de desalinización con cambio de fase.....	20
Tabla 3. Resultados de los parámetros que miden la eficiencia del uso de energía renovable	23
Tabla 4. Tecnología de los procesos de desalinización sin cambio de fase	24
Tabla 5. Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de las membranas en la desalinización	25
Tabla 6. Parámetros característicos de la estructura de las membranas.....	26
Tabla 7. Tecnología de los procesos de desalinización con sistemas híbridos	28
Tabla 8. Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de sistemas híbridos en la desalinización.....	29
Tabla 9. Rendimiento de sistemas híbridos en función del flujo de permeado y requerimiento de energía.....	30
Tabla 10. Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de desalinización con cambio de fase	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de selección de artículos.	13
Figura 2. Número de investigaciones en cada base de datos.	16
Figura 3. Número de investigaciones por año de publicación.	17
Figura 4. Ubicación geográfica de los trabajos de investigación.	18
Figura 5. Distribución de trabajos de investigación según el tipo de desalinización.	19
Figura 6. Flujo de agua (columnas) y rechazo de sal (líneas) por investigación.	22

RESUMEN

En la actualidad millones de personas en el mundo no cuentan con agua potable en sus casas, y debido al aumento de la población mundial y la contaminación de los recursos de agua dulce, se espera que en los próximos años el estrés hídrico aumente notoriamente. Claramente, es fundamental realizar investigaciones enfocadas en el uso de fuentes de agua potable no convencionales, como la proporcionada por los océanos. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo es realizar una Revisión Sistemática que permita determinar la influencia del tipo de dispositivo en la eficiencia de desalinización para la obtención de agua potable.

La búsqueda de información científica se ha realizado a través de algunas de las bases de datos de amplio uso en ingeniería y está restringida a las investigaciones publicadas durante la última década (2010-2020). Los artículos científicos seleccionados para este trabajo fueron analizados usando una matriz de base de datos, lo cual permitió identificar los últimos descubrimientos realizados en esta área. Los estudios donde el tratamiento del agua de mar no se realiza con fines de potabilización han sido excluidos de este trabajo.

Las investigaciones realizadas en los últimos años demuestran que la eficiencia de desalinización para la obtención de agua potable depende significativamente de la cantidad y calidad del agua tratada, del consumo de energía, de los costos de inversión y mantenimiento y del impacto ambiental. Además, por su versatilidad y eficiencia, los dispositivos de membrana representan una de las opciones más prometedoras para este proceso.

Dada la relevancia y el impacto social de este tema, se espera que este trabajo motive el interés de los ingenieros de nuestro país para investigar en el área de desalinización del agua.

PALABRAS CLAVES: Desalinización, eficiencia de desalinización, agua potable.

ABSTRACT

Currently, millions of people in the world do not have safe drinking water in their homes, and due to the increase in world population and the contamination of freshwater resources, water stress is expected to increase significantly in the coming years. Clearly, it is essential to conduct research focused on the use of non-conventional sources of drinking water, such as that provided by the oceans. For this reason, the objective of the present work is to carry out a Systematic Review to determine the influence of the type of device on the desalination efficiency for obtaining drinking water.

The search for scientific information was conducted through some of the databases widely used in engineering and is restricted to research published during the last decade (2010-2020). The scientific articles selected for this work were analyzed using a database matrix, which made it possible to identify the latest discoveries made in this area. Studies where seawater treatment is not carried out for drinking purposes have been excluded from this work.

Research conducted in recent years has shown that the efficiency of desalination for drinking water production depends significantly on the quantity and quality of treated water, energy consumption, investment and maintenance costs, and environmental impact. Moreover, because of their versatility and efficiency, membrane devices represent one of the most promising options for this process.

Given the relevance and social impact of this topic, it is hoped that this work will motivate the interest of engineers in our country to research in the area of water desalination.

KEY WORDS: Desalination, desalination efficiency, drinking water.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la crisis mundial del agua (dentro de otros factores) es la responsable de una serie de hechos lamentables, tales como la desnutrición, anemia, enfermedades gastrointestinales, mortalidad infantil, entre otros (Organización Mundial de la Salud, 2015). Debido a que más del 97% de la superficie de la Tierra es agua de mar no apta para el consumo humano y que menos de la mitad del 3% restante es agua dulce que se encuentra en lugares de fácil acceso (ríos y lagos), la cantidad de agua disponible para el consumo es relativamente escasa; todo esto sumado al crecimiento de la población mundial, la industrialización, la contaminación de los recursos hídricos, las inundaciones y sequías causadas por los cambios climáticos, generan un aumento de la demanda de agua dulce y a su vez dificultan el abastecimiento de esta (Atab, Smallbone y Roskilly, 2018; Chen, Jiang, Ye, Yang y Hou, 2019; Dévora, González y Ruiz, 2013). Por ello, es necesario consolidar tecnologías que permitan el tratamiento de agua de mar para garantizar un suministro sostenible de agua potable en los próximos años, reduciendo la brecha entre la oferta y demanda existente.

El tratamiento del agua de mar se realiza mediante diversos procesos, agrupados principalmente en procesos térmicos y de membrana, donde sólo los primeros implican un cambio de fase (Chang, Zuo, Lu y Chung, 2019; Dalvi, Tang, Staudt y Chung, 2017; Shah et al., 2020). Los dispositivos utilizados en los procesos con cambio de fase utilizan energía térmica o calorífica para separar las sales del agua de mar mediante el mecanismo de evaporación-condensación. Por otro lado, los procesos sin cambio de fase se basan en el uso de membranas (las cuales bloquean el paso de los sólidos disueltos en el agua de alimentación). A pesar de que estos requieren el uso de bombas para el tratamiento de aguas con alta salinidad, han demostrado requerir menor cantidad de energía durante el proceso

(Chang et al., 2019; Jones, Qadir, van Vliet, Smakhtin y Kang, 2019). Parámetros tales como el flujo de agua pura, rechazo de sal, consumo de energía, impacto ambiental y costos son cruciales en la eficiencia de desalinización (Dévora et al., 2013). De manera general, los dispositivos empleados en la desalinización, deben buscar la obtención de agua potable que cumpla con ciertos criterios y/o estándares de calidad con respecto a propiedades como la turbidez, el pH y la inexistencia de presencia microbiana establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018).

Alrededor del mundo el dispositivo más utilizado para la desalinización es el de membrana, predominando en el proceso de ósmosis inversa, el cual cubre más del 50% del mercado mundial. Estas membranas semipermeables permiten el paso del agua sin un cambio de fase, obteniendo de esta manera una mayor producción con un menor consumo de energía (Atab et al., 2018; Jones et al., 2019; La Cerva et al., 2019; Topaloglu et al., 2018). Sin embargo, el rendimiento de esta tecnología se ve afectado por el ensuciamiento de la superficie de la membrana, debido al depósito de partículas coloidales, iones inorgánicos y material biológico propio del agua de mar, lo cual afecta considerablemente a su permeabilidad y selectividad, así como a su productividad; todo esto demanda un mayor requerimiento de energía y costos a largo plazo, lo que reduce el periodo de diseño de esta tecnología (Khairkar et al., 2020; Landsman et al., 2020; Shafi, Wang, Gleason y Khan, 2020). Ante esta deficiencia, surgen tres alternativas de solución como el pretratamiento del agua de mar (Guo, Deka, Kim y An, 2019; La Cerva et al., 2019), la limpieza periódica de las membranas (Guo et al., 2019; Gutiérrez, Hassani y Quiroga, 2016) y la modificación de la superficie de las membranas (Dalvi et al., 2017; Khairkar et al., 2020; Rashed, Esawi y Ramadan, 2020; Shafi et al., 2020; Shah et al., 2020). Cabe mencionar que es imprescindible hacer uso de la primera opción en cualquier proceso de desalinización, ya que el alto

contenido de sal del agua de alimentación promueve la corrosión de los equipos utilizados si estos no cuentan con un tratamiento superficial adecuado (Claudio, 2018; Cortes y Lesmes, 2014).

La desalinización surge como la salida de la crisis actual de escasez de agua, mediante el uso de diversos dispositivos que buscan reducir el contenido de sal en el agua de mar (que generalmente tiene una concentración de 70 veces por encima de la concentración de sal del agua potable) (Landsman et al., 2020). Debido a su eficiencia en la reducción del consumo de energía, en el aumento de la cantidad y calidad del agua potable obtenida, la destilación por membrana y la ósmosis directa están surgiendo como tecnologías prometedoras en los procesos con y sin cambio de fase. Sin embargo, aún faltan estudios a gran escala que garanticen el buen rendimiento de las futuras plantas desalinizadoras junto a la reducción de costos de operación y mantenimiento (Ahmad, Mohd y Mohamad, 2019; Guo et al., 2019; Rashed et al., 2020; Shafieian, Rizwan, Khiadani y Kanti, 2020; Shah et al., 2020; Zhao, Wang, Zhao, Chen y Lu, 2014; Zheng, Zhao, Xu y Lu, 2019). Por lo tanto, es necesario promover la investigación de dispositivos de desalinización que generen un aumento de la eficiencia en términos de productividad, energía y rentabilidad; con la finalidad de captar la atención de los gobiernos de cada país, particularmente, los de países con dominio marítimo.

Debido a la demanda elevada de energía en estos procesos, los costos aumentan y en consecuencia, dejan de ser viables; por lo que recientes investigaciones están explorando la posibilidad de reemplazar la energía convencional por energía limpia o renovable como la solar, eólica y geotérmica, logrando un desarrollo sostenible de los recursos esenciales en la vida del ser humano, como el agua y la energía (Al-Qadami et al., 2019; Chang et al., 2019; ElHelw, El-Maghlany y El-Ashmawy, 2020; Shafieian et al., 2020; K. Wang et al., 2020; Wilson, Rahman, Parab y Jha, 2019). Para reducir la brecha de acceso de agua potable, es

fundamental contar con un análisis crítico de los avances científicos/tecnológicos obtenidos en el uso de los dispositivos de desalinización actuales, buscando de esta manera aumentar la cobertura, la calidad y la sostenibilidad del proceso de obtención de agua potable.

Por estas razones, si deseamos avanzar en la consolidación y uso cotidiano de los procesos de desalinización en nuestras sociedades, es fundamental conocer la respuesta a la siguiente pregunta: ¿cuál es la influencia del tipo de dispositivo en la eficiencia de desalinización para la obtención de agua potable?

El presente trabajo tiene como uno de sus objetivos el dar respuesta a la pregunta planteada, lo cual permitirá proveer de información relevante a los futuros investigadores en esta área. La revisión sistemática de este tema permitirá hacer una adecuada identificación, selección, análisis y síntesis de los artículos de investigación relacionados con el proceso de desalinización, lo cual ofrece la oportunidad de superar aquellos puntos deficientes que todavía tiene este proceso usando nuevas tecnologías y/o nuevos materiales. Por lo tanto, conociendo el estado del arte de esta área de investigación, se identificarán aquellos dispositivos que poseen el mejor rendimiento de desalación y que garantizan la calidad del agua potable obtenida. La escasez de agua potable es un desafío global que debemos asumir y es la investigación de alto nivel la que nos ofrece las herramientas para reducir el número muertes y personas con enfermedades causadas por un mal tratamiento del agua. Resolver el problema de la crisis mundial del agua le permitirá a los gobiernos impulsar el desarrollo sostenible y el crecimiento económico de sus países, especialmente de los países en vías de desarrollo como el Perú.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación es una Revisión Sistemática (RS) que muestra los avances obtenidos (en los últimos años) sobre la eficiencia de desalinización en función del flujo de agua pura y rechazo de sal según el tipo de dispositivo utilizado. Todos los trabajos considerados en esta RS han sido publicados en inglés y se han realizado en el periodo que va desde el año 2010 hasta el año 2020, lo cual permite contar con información relevante y que da cuenta de los avances recientes obtenidos en esta área de investigación. Los artículos científicos fueron obtenidos de fuentes de información confiables y de amplio uso en ciencias e ingeniería. Las fuentes de información fueron: ResearchGate, ScienceDirect y EBSCOhost (ver la Figura 1).

La Figura 1 muestra la secuencia de pasos utilizada para la búsqueda de información relevante. La estrategia de búsqueda se basó en el uso de términos o palabras clave. Para la búsqueda en ResearchGate se utilizaron como palabras clave las siguientes: “sea water treatment”, “desalination”, “hybrid system” y “water flux”. Para este caso, se escogió la sección “Publications” y se colocó un filtro para el tipo de literatura “Article”, respetando el periodo de publicación entre los años 2010 al 2020. En el caso de la búsqueda en ScienceDirect, se utilizaron las palabras clave: “sea water treatment” y “desalination”, con la diferencia que se aplicó un filtro de años (2010 al 2020), tipo de literatura (research articles) y el título de la publicación (desalination). Cabe resaltar que no fue posible descargar todos los artículos de interés y por esta razón no se tomaron en cuenta en la presente RS. Para el caso de EBSCOhost se emplearon los términos “sea water treatment”, “desalination”, “seawater desalination”, “drinking water” y “membrane modification”, donde se trabajó con el modo de búsqueda “operadores booleanos”, se filtró el año de publicación (2010 al 2020) y el tipo de recurso (publicaciones académicas, revistas e informes) (ver Figura 1). Además, en

ninguno de los casos se usó restricción de idioma; pero se optó por el inglés, debido a que generalmente las publicaciones realizadas en este idioma se encuentran en revistas científicas de gran impacto y presentan un mejor nivel de calidad.

En la Figura 1 se indican los criterios de exclusión para los artículos científicos obtenidos en la búsqueda de información. Dentro de los criterios de exclusión tenemos: tipo de publicación, año de publicación, variables de estudio, objetivo de la investigación y disponibilidad del artículo científico.

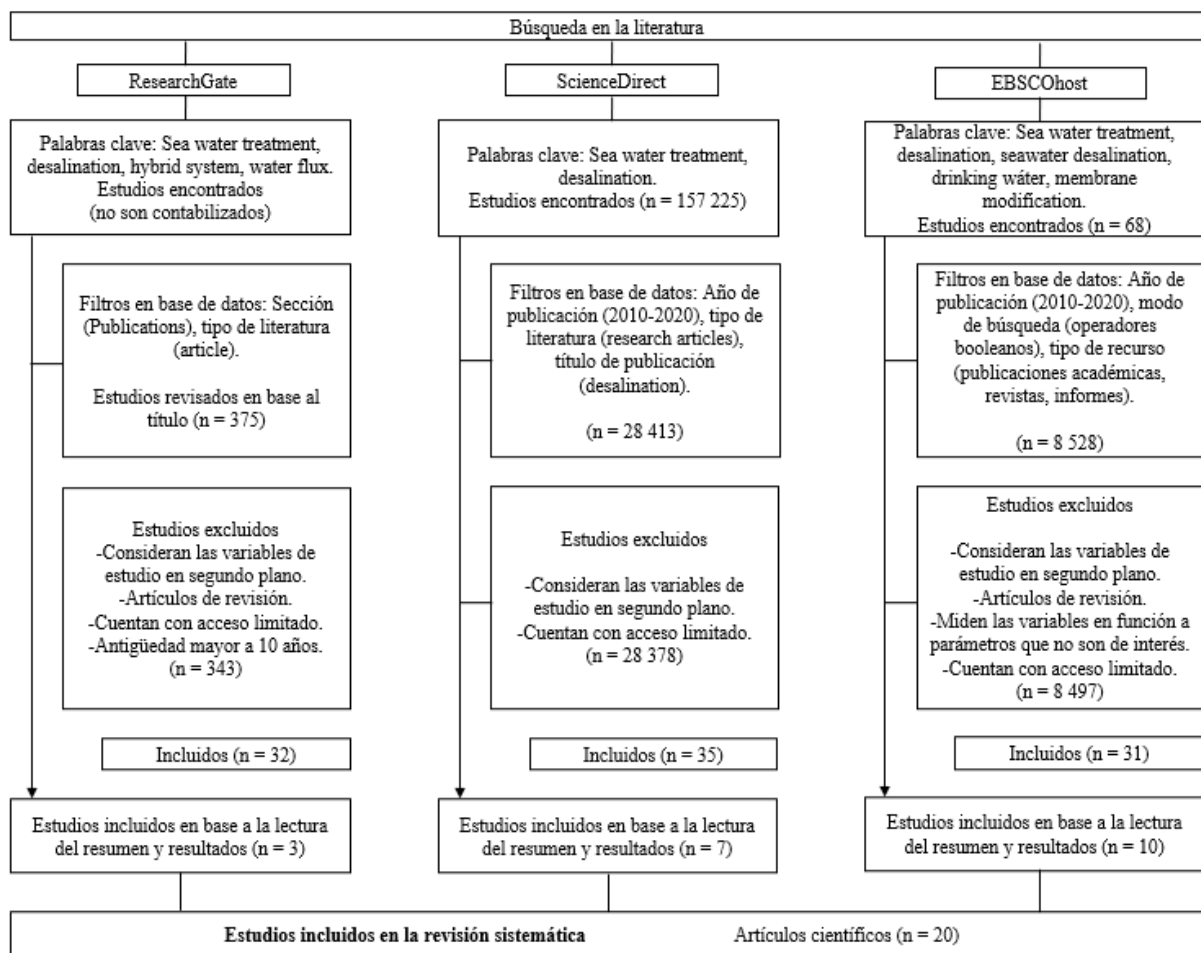


Figura 1. Diagrama de flujo de selección de artículos.

Para la extracción y organización de los datos de los artículos seleccionados, se elaboró una matriz con los siguientes campos: base de datos, título del trabajo de investigación, autor,

año de publicación, tipo de investigación, universidad y país de origen, variables relacionadas al tema de estudio. A partir de lo cual, se obtuvo la información mostrada en la Tabla 1, donde se toman 5 datos relevantes: la fuente de información, el año de publicación, el país que le corresponde a los autores y el diseño metodológico. Por otro lado, para el análisis de los aportes al conocimiento de ingeniería de cada estudio, se sintetizó la información en base a los objetivos, método utilizado, resultados obtenidos y conclusiones.

Tabla 1
Trabajos de investigación incluidos en la revisión sistemática

Nº	Base de datos	Título del trabajo de investigación	Año	País	Diseño Metodológico
1	ScienceDirect	Novel sea water desalination unit utilizing solar energy heating system	2020	Egipto	Experimental
2	ScienceDirect	Performance improvement of thermal-driven membrane-based solar desalination systems using nanofluid in the feed stream	2020	Australia	Experimental
3	ScienceDirect	Influential effects of nanoparticles, solvent and surfactant treatments on thin film nanocomposite (TFN) membranes for seawater desalination	2017	Singapur	Experimental
4	ScienceDirect	A hybrid reverse osmosis/adsorption desalination plant for irrigation and drinking water	2018	Reino Unido. Iraq.	Experimental
5	ResearchGate	Interlayer-free silica-pectin membrane for seawater desalination	2019	Indonesia	Experimental
6	EBSCOhost	Thermoresponsive copolymer-based draw solution for seawater desalination in a combined process of forward osmosis and membrane distillation	2014	Singapur	Experimental
7	EBSCOhost	Yield Efficiency Evaluation of Double Slope Solar Stills Connected with External Spiral Copper for Potable Water Production	2019	Malasia. Bangladesh. Australia. Nigeria.	Experimental
8	EBSCOhost	Novel technological solutions for eco-protective water supply by economical and sustainable seawater desalination	2018	Turquía	Experimental
9	EBSCOhost	Effect of Additives on Hydrophobicity of PVDF Membrane in Two-stage Coagulation Baths for Desalination	2019	Malasia.	Experimental
10	EBSCOhost	Ultrathin Support-Free Membrane with High Water Flux for Forward Osmosis Desalination	2019	China	Experimental
11	EBSCOhost	Synthesis of surface-anchored stable zwitterionic films for inhibition of biofouling	2020	Arabia Saudita. EE.UU.	Experimental

N°	Base de datos	Título del trabajo de investigación	Año	País	Diseño Metodológico
12	ScienceDirect	Regeneration of superhydrophobic TiO ₂ electrospun membranes in seawater desalination by water flushing in membrane distillation	2019	China	Experimental
13	ResearchGate	Novel polysulfone/carbon nanotube-polyamide thin film nanocomposite membranes with improved water flux for forward osmosis desalination	2020	Egipto	Experimental
14	ScienceDirect	In situ generation of carbonized polyaniline nanowires on thermally-treated and electrochemically-etched carbon fiber cloth for high efficient solar seawater desalination	2020	China	Experimental
15	EBSCOhost	Ultra-low cost cotton based solar evaporation device for seawater desalination and waste water purification to produce drinkable water	2019	India	Experimental
16	EBSCOhost	Hydrophobic interpenetrating polyamide-PDMS membranes for desalination, pesticides removal and enhanced chlorine tolerance	2020	Japón. Suiza. India. EE.UU.	Experimental
17	EBSCOhost	A fouling-resistant mixed-matrix nanofiltration membrane based on covalently cross-linked Ti ₃ C ₂ TX (MXene)/cellulose acetate	2020	Qatar	Experimental
18	EBSCOhost	High performance thin-film nanocomposite forward osmosis membrane based on PVDF/bentonite nanofiber support	2019	Corea del Sur.	Experimental
19	ResearchGate	Membrane development and energy analysis of freeze desalination-vacuum membrane distillation hybrid systems powered by LNG regasification and solar energy	2019	Singapur	Experimental
20	ScienceDirect	Modelling and cost analysis of hybrid systems for seawater desalination: Electromembrane pre-treatments for Reverse Osmosis	2019	Italia	Experimental

Nota. Lista de artículos de investigación seleccionados para la revisión sistemática y organizados según la base de datos correspondiente, año de publicación, país de origen y diseño metodológico utilizado.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Este capítulo será dividido en dos partes. En la primera parte se mostrarán los resultados vinculados a la búsqueda de información y en la segunda parte se presentará el estado del arte en el área de investigación tratada.

Respecto a la búsqueda de información, es importante mencionar que en el presente trabajo se han considerado 20 trabajos de investigación extraídos de bases de datos y fuentes de información ampliamente utilizados en ingeniería, tales como ResearchGate (3 trabajos) ScienceDirect (7 trabajos) y EBSCOhost (10 trabajos), ver la Figura 2. Notar que los criterios de selección están especificados en detalle en el capítulo de Metodología.

Dado que los últimos avances científicos en cualquier área de investigación son generalmente publicados en revistas internacionales, es común encontrar los trabajos científicos de mayor relevancia publicados en inglés. Como se puede observar en la Tabla 1 todos los artículos científicos utilizados en este trabajo han sido publicados en inglés.

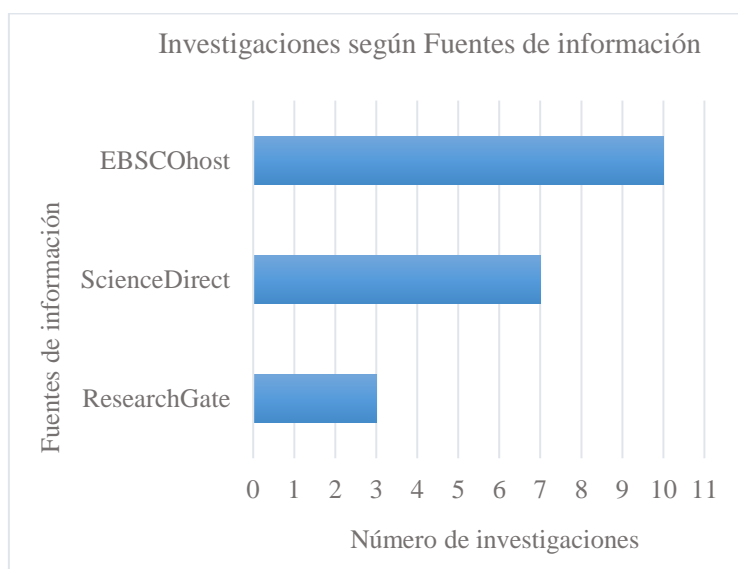


Figura 2. Número de investigaciones en cada base de datos.

Con respecto al año de publicación, las investigaciones consideradas en este trabajo fueron seleccionadas tomando en cuenta las variables de estudio a partir de cientos de

publicaciones (ver la Figura 1). En la Figura 3 se muestran los artículos (usados en el presente trabajo) publicados entre los años 2014 al 2020. Como se puede observar, durante los tres primeros años de análisis (2014-2016) sólo se publicó 1 trabajo que cumple con los criterios de selección, en los próximos 2 años (2017-2018) se encontraron 3 trabajos y en los últimos 2 años (2019-2020) se encontraron 16 trabajos. El aumento en el número de publicaciones (que guardan relación con las variables de estudio de este trabajo) muestra el interés creciente de los científicos e ingenieros en esta área de investigación. Con el paso de los años ha aumentando la escasez de agua dulce y sus efectos han sido percibidos por más personas alrededor del mundo, lo cual está motivando a muchos ingenieros a buscar nuevas alternativas para la obtención de agua potable. Esto ha conducido a realizar más investigaciones sobre la optimización de los dispositivos utilizados en la desalinización del agua. Es importante resaltar que no todas las publicaciones realizadas en el año 2020 han sido consideradas en esta revisión sistemática, ya que al momento de su redacción todavía no había concluido el año.



Figura 3. Número de investigaciones por año de publicación.

En la Figura 4 se indica el lugar geográfico al que pertenecen los estudios seleccionados, como puede observarse la desalinización es un tema de interés mundial, estudiado prácticamente en todos los continentes. Asimismo, se observa que existe mayor investigación en aquellos países que pertenecen a las regiones geográficas de Medio Oriente,

África del Norte, Asia Oriente y el Pacífico, debido a que cuentan con un gran número de plantas desaladoras, lo cual les permite estar a la vanguardia en este tema (Jones et al., 2019).

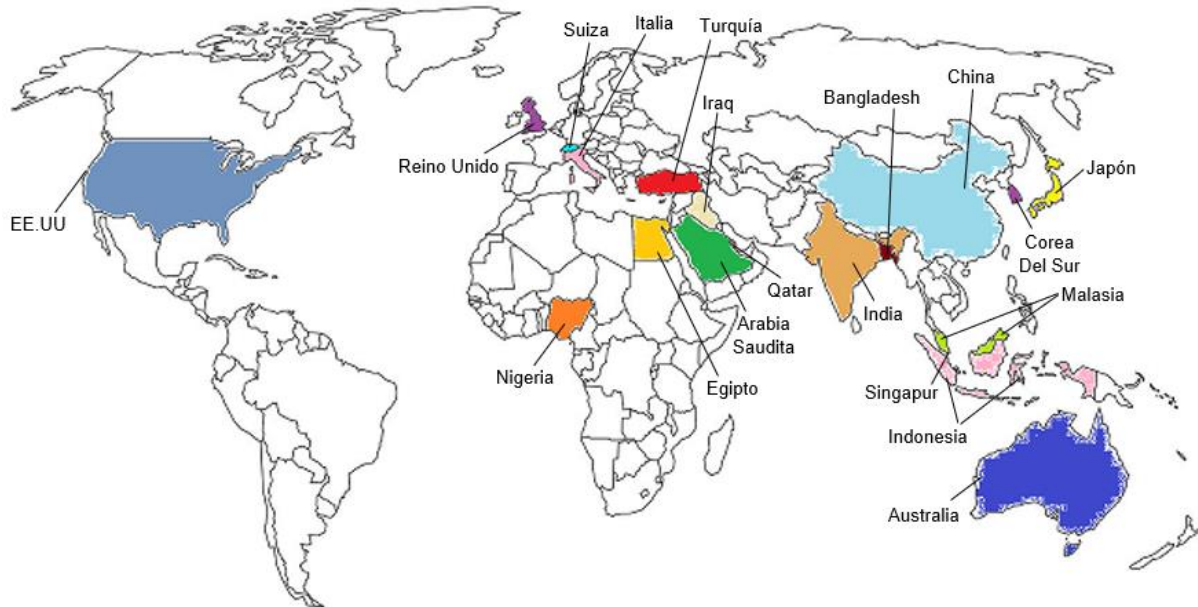


Figura 4. Ubicación geográfica de los trabajos de investigación.

Nota. Adaptado de mapa del mundo colorear [Figura], por ColorearTV, 2020,

<https://coloreartv.com/tag/mapamundi-para-colorear-en-paint>.

Con respecto a los avances obtenidos en esta área de investigación, es importante mencionar que, según el diseño metodológico de los trabajos estudiados en esta RS, todos los trabajos fueron experimentales (ver la Tabla 1). Los resultados cuantitativos de estos trabajos han facilitado el análisis posterior acerca de la eficiencia del tipo de dispositivo utilizado. Para facilitar el análisis de los resultados obtenidos en esta área se han considerado los siguientes tópicos: 1) desalinización con cambio de fase, 2) desalinización sin cambio de fase y 3) desalinización con sistemas híbridos. En la Figura 5 se muestra el predominio de los procesos con cambio de fase y sin cambio de fase, con un 35% cada uno (14 trabajos en total), frente a un 30% del desarrollo novedoso de los sistemas híbridos (6 trabajos).

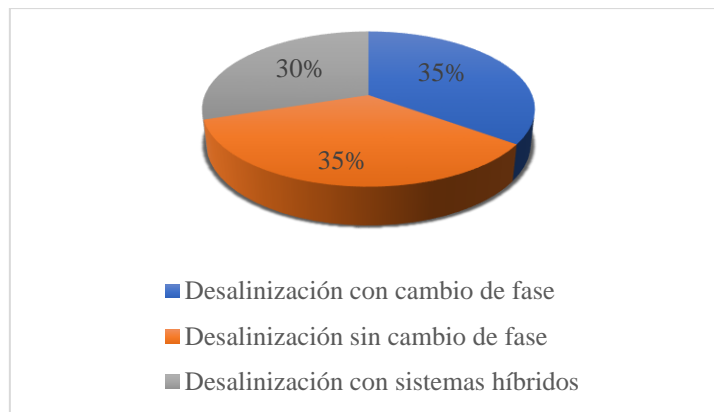


Figura 5. Distribución de trabajos de investigación según el tipo de desalinización.

Los resultados de los artículos seleccionados serán analizados a continuación de acuerdo a la clasificación realizada, lo que permitirá determinar la influencia del tipo de dispositivo en la eficiencia de desalinización para la obtención de agua potable y permitirá también resaltar los últimos avances obtenidos en este tema.

Desalinización con cambio de fase

Este tipo de desalinización utiliza la energía termal para la evaporación y condensación del agua de mar, lo cual permite obtener un producto apto para el consumo humano. La Tabla 2 muestra la implementación de sistemas y/o dispositivos innovadores en diferentes procesos de desalinización, realizados en los dos últimos años. Se observa mayor interés en investigar el proceso de destilación mediante la elaboración y uso de membranas hidrófobas con aditivos y partículas de TiO_2 (MD) para optimizar el rendimiento general del proceso. La Tabla 2 también evidencia el ámbito de investigación de la mayoría de autores dirigido a la integración de energía solar en el proceso de destilación para reducir el alto consumo de energía térmica requerida (SD), utilizando diferentes colectores solares o a través del uso de materiales de bajo costo para la elaboración de evaporadores solares de eficiencia mejorada. Diferentes procesos, materiales y fuentes de energía se han utilizado para obtener la

desalinización del agua empleando los cambios de fase (ver la Tabla 2). Shafieian et al. (2020) adicionaron nanofluidos al agua de alimentación de un sistema de destilación solar basado en membranas de accionamiento térmico, debido a su mejorada conductividad térmica. Rampun, Elma, Rahma y Pratiwi (2019) investigaron el comportamiento de membranas de sílice-pectina sin capa intermedia, que usa pectina como fuente de carbono, a través del proceso PV. Al-Qadami et al. (2019) evaluaron la eficiencia de un alambique solar pasivo y activo en la SD, de los cuales, el último contó con un calentador solar externo. Ahmad et al. (2019) adicionaron aditivos en la elaboración de membranas PVDF mediante un baño de coagulación de dos etapas para mejorar la morfología y porosidad de las membranas hidrófobas. Guo et al. (2019) utilizaron un pretratamiento de oxidación-coagulación y probaron la regeneración de membranas electrohiladas de TiO₂ superhidrofóbicas mediante lavado con agua en la MD. K. Wang et al. (2020) fabricaron un evaporador solar compuesto de ECFC/CPANW por su alta absorbancia de luz e hidrofilia, y espuma de poliuretano en la capa de fondo por ser un buen aislante térmico. Por su parte, Wilson et al. (2019) buscaron mejorar el rendimiento de un evaporador solar con espuma de poliestireno por su baja densidad y propiedades excelentes como aislante térmico, la cual estuvo recubierta de tela de algodón hidrófilo con hollín de velas en la parte superior.

Tabla 2
Procesos de desalinización con cambio de fase

Referencia	Proceso	Sistema / Dispositivo	Energía
Shafieian et al. (2020)	Destilación por membrana solar (SMD)	Sistema de colector solar de tubos de vacío y módulo de membrana de polipropileno.	Solar térmica
Rampun et al. (2019)	Pervaporación (PV)	Membranas de sílice-pectina sin capa intermedia	Térmica
Al-Qadami et al. (2019)	Destilación solar (SD)	Alambiques solares de doble pendiente conectados con una tubería de cobre en espiral externo.	Solar térmica
Ahmad et al. (2019)	Destilación por membrana (MD)	Membrana de fluoruro de polivinilideno (PVDF) con aditivos (ftalato de dibutilo y glicerol).	Térmica
Guo et al. (2019)	Destilación por membrana	Membranas de PVDF electrohilado de TiO ₂	Térmica

Referencia	Proceso	Sistema / Dispositivo	Energía
K. Wang et al. (2020)	Destilación solar	Evaporador solar a base de tela de fibra de carbono grabada recubierta con nanocables de polianilina carbonizada (ECFC/CPANW) con espuma de poliuretano.	Solar térmica
Wilson et al. (2019)	Destilación solar	Evaporador solar a base de algodón recubierto de hollín de vela sobre espuma de poliestireno como un absorbente flotante	Solar térmica

En la Figura 6 (y Anexo 1) se muestran los máximos flujos de agua y rechazos de sal obtenidos en cada estudio. La membrana PVDF electrohilado de dióxido de titanio (TiO₂) presentó la mayor productividad de agua dulce con un flujo de 32,26 L/m²h acompañado de un 99,9% de rechazo salino. Esto está relacionado a la aplicación de un pretratamiento al agua y a la regeneración de las membranas, ya que reducen el ensuciamiento de este material y mantienen su superhidrofobicidad (Guo et al., 2019). La membrana de PVDF con aditivo ftalato de dibutilo sometida a un baño de coagulación de doble etapa con metanol y agua destilada, obtuvo 13,85 L/m²h de flujo de permeado y un 99,0% de rechazo salino, lo cual está vinculado a la hidrofobicidad y porosidad de la membrana (Ahmad et al., 2019). En general, los valores del flujo de agua para los trabajos evaluados en este estudio se encuentran entre 0,41 kg/m²h y 13,85 kg/m²h y su rechazo de sal está por encima de 95% (ver la Figura 6). En base a estos porcentajes de rechazo de sal elevados, estas tecnologías ofrecen la posibilidad de tener dispositivos eficientes para convertir el agua de mar en agua potable.

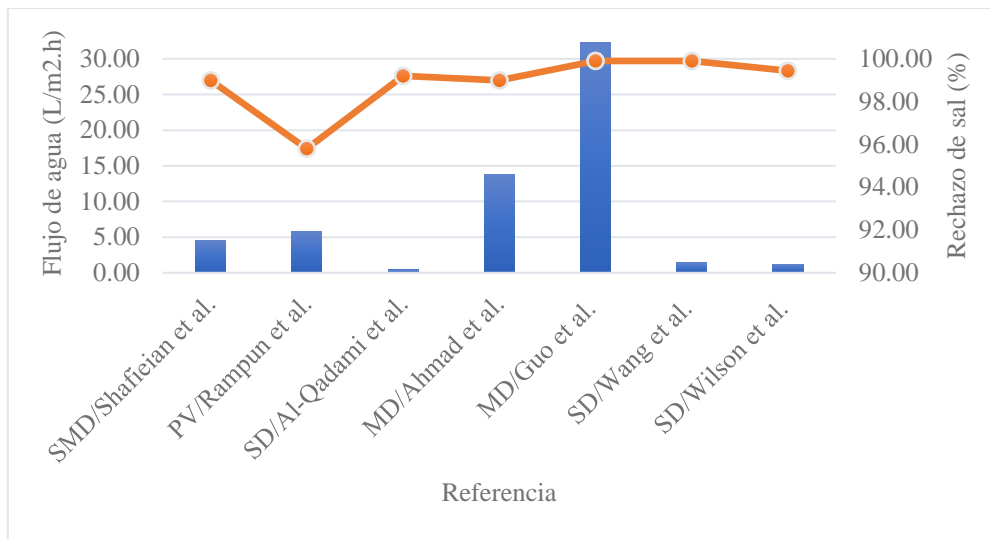


Figura 6. Flujo de agua (columnas) y rechazo de sal (líneas) por investigación.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la radiación solar con la que se obtuvo el mejor rendimiento de destilación para cada estudio que integró el uso de energía solar. Partiendo del hecho de que existe una relación entre la intensidad de la iluminación solar con la productividad de agua destilada, se deduce que el uso de evaporadores solares mejoran la eficiencia de desalinización (Shafieian et al., 2020; K. Wang et al., 2020). Sin embargo, no es el único factor a evaluar, también es posible mejorar la eficiencia usando nanofluidos, lo cual permite aumentar la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia de calor entre el líquido caloportador y el agua salina. Con este procedimiento se puede maximizar el flujo de agua (ver Figura 6) (Shafieian et al., 2020). Como se puede observar en la Tabla 3, el evaporador solar ECFC/CPANW funcionando bajo una radiación solar de 1000 W/m² obtuvo una eficiencia de 93,7% (K. Wang et al., 2020), superando al evaporador en base de algodón recubierto de hollín de vela que posee una eficiencia de 80,1% (Wilson et al., 2019).

Tabla 3

Resultados de los parámetros que miden la eficiencia del uso de energía renovable

Referencia	Radiación solar (W/m ²)	Eficiencia solar térmica (%)
Shafieian et al. (2020)	815	-
Al-Qadami et al. (2019)	747,88	-
K. Wang et al. (2020)	1000	93,7
Wilson et al. (2019)	1000	80,1

Nota. Valores de la radiación solar y eficiencia solar térmica obtenidos en los trabajos de investigación con procesos de desalinización solar.

Desalinización sin cambio de fase

Conocida también como desalinización por membranas. En este caso la purificación del agua se logra a través de una barrera semipermeable que restringe el paso de sal y otros agentes contaminantes. Como se observa en la Tabla 4, los procesos comúnmente usados en este campo de investigación son la ósmosis directa (FO) y la ósmosis inversa (RO). En la FO el fluido pasa a través de una membrana semipermeable sin la aplicación de una presión externa. Por el contrario, en la RO se utilizan bombas (que convierten la energía mecánica en energía cinética) para impulsar el movimiento del fluido a través de las membranas (Rashed et al., 2020). A lo largo de los últimos años, se han evaluado los desafíos y oportunidades de las membranas usadas en esta tecnología y se han mejorado algunas de sus propiedades mediante la modificación de la membrana tradicional con diferentes compuestos (ver la Tabla 4). Estos estudios son de vital importancia puesto que existen deficiencias que reducen su óptimo funcionamiento, particularmente, el ensuciamiento de este dispositivo.

Como indica la Tabla 4, diferentes tipos de membrana han sido utilizadas con los procesos de FO y RO. Con la finalidad de elevar la eficiencia de los procesos de desalinización se han utilizados nanopartículas (Dalvi et al., 2017), nanotubos de carbono (Rashed et al., 2020), copolímeros (Shafi et al., 2020) y nanofibras (Shah et al., 2019). Por ejemplo, el uso de las películas de copolímero en las membranas permite contrarrestar la bio-

incrustación (Shafi et al., 2020), y la adición de una red hidrófoba e hidrófila permite aumentar su rendimiento de desalinización y resistencia al cloro (Khairkar et al., 2020).

Tabla 4

Tecnología de los procesos de desalinización sin cambio de fase

Referencia	Proceso	Sistema / Dispositivo	Energía
Dalvi et al. (2017)	Ósmosis Inversa (RO)	Membranas de nanocompuestos de película delgada (TFN), con nanopartículas de TiO_2-SiO_2	Mecánica
Zheng et al. (2019)	Ósmosis Directa (FO)	Membrana ultrafina de poliamida (PA), membrana compuesta de película delgada de poliamida (polisulfona PSF - PA) y membranas PSF + PA combinadas físicamente	No requiere
Shafi et al. (2020)	Ósmosis Inversa	Membranas de RO (TFC) modificadas con películas de copolímero de ion híbrido anti-incrustante a base de piridina que contienen polisulfobetaína (pSB)	Mecánica
Rashed et al. (2020)	Ósmosis Directa	Membrana TFN hecha con nanotubos de carbono carboxilados de paredes múltiples (MWCNT) en una capa de poliamida (PA) formada sobre un soporte poroso de polisulfona (PSF)	No requiere
Khairkar et al. (2020)	Ósmosis Inversa	Membranas hidrófobas con una red interpenetrante de poliamida aromática y química de PMDS (polidimetilsiloxano)	Mecánica
Pandey, Rasheed, Gomez, Azam y Mahmoud (2020)	Nanofiltración (NF)	Membranas nanoporosas basada en un compuesto de $Ti_3C_2T_x$ (MXene)/acetato de celulosa (MXene@CA) químicamente reticuladas	No precisa*
Shah et al. (2019)	Ósmosis Directa	Membrana de fibra óptica TFN utilizando un soporte de nanofibras electrohiladas de PVDF basadas en nanoarcillas de bentonita	No requiere

Nota. *Artículos de investigación que no detallan el tipo de energía consumida en el proceso de desalinización.

En la Tabla 5 se señalan las membranas que mostraron un buen comportamiento en términos del flujo de agua y rechazo de sal. La membrana de PA de FO obtuvo el más alto flujo de agua de 80,54 L/m²h, debido a que su grosor ultrafino condujo a una menor resistencia a la transferencia de masa obteniéndose un flujo de agua mejorado junto a un alto flujo salino inverso (Zheng et al., 2019).

Rashed et al. (2020) compararon el rendimiento de membranas TFN con diferentes cantidades de MWCNT (0,01; 0,05; 0,1 y 0,2%). Encontraron que un mayor porcentaje de MWCNT conlleva a un aumento del flujo de agua, y con ello, un mayor flujo de sales. Shah

et al. (2020) evaluaron el comportamiento de membranas TFN con adiciones de nanoarcillas de bentonita de 0,25; 0,50; 1,0 y 2,0%. Descubrieron que, a mayor porcentaje de dicho componente, el flujo de agua mejora notoriamente, sin embargo, el rechazo salino se ve afectado. Con 2,0% de contenido de nanoarcillas, se obtuvo un flujo de agua de 40,64 L/m²h con un rechazo del 77,20%. Khairkar et al. (2020) desarrollaron membranas de poliamida con varias adiciones de PDMS (1, 3, 5, 10, 15 y 20%); encontraron que a mayor cantidad de PDMS, el rechazo salino cambió ligeramente y el flujo de agua disminuyó. Con una adición del 10% de PDMS, obtuvieron un flujo de agua de 37,00 L/m²h y un rechazo del 97,10%. Dalvi et al. (2017) desarrollaron membranas TFN con nanopartículas de TiO₂-SiO₂ en porcentajes de 0,125; 0,25 y 0,5%. Encontraron que la membrana TFN con un 0,125% en peso de nanopartículas con etanol y tratamiento posterior con tensioactivos, mostró una mejor eficiencia, obteniendo un flujo de agua de 23,00 L/m²h con un rechazo de sal del 93,0%.

Tabla 5

Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de las membranas en la desalinización

Referencia	Membrana	Flujo de agua (L/m ² h)	Rechazo de sal (%)
Dalvi et al. (2017)	TFN-T-0,125wt% TiO ₂ -SiO ₂	23,00*	93,00
Zheng et al. (2019)	PA	80,54	-
Shafi et al. (2020)	Koch modificada	36,40	97,60
Rashed et al. (2020)	TFN-0,01 en peso/vol% MWCNT carboxilados	50,23	90,05
Khairkar et al. (2020)	SAM10	37,00	97,10
Pandey et al. (2020)	10% MXene @ CA	256,85**	28,14
Shah et al. (2019)	PVDF18_2.0	40,64	77,20

Nota. Valores del flujo de agua pura y rechazo salino obtenidos en los artículos de investigación. *Flujo de agua medido en kg/m²h. **Flujo de agua medido en L/m²h.bar.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos a partir de la caracterización de las membranas, tales como, espesor, rugosidad, tamaño de poro y ángulo de contacto; cuyos parámetros influyen directamente en la eficiencia de desalinización. Se encontró que a medida que aumenta la rugosidad y el tamaño de poro, el ángulo de contacto disminuye, por

lo que existe un aumento en la hidrofiliidad de la membrana y por consiguiente, en el flujo de agua (Palacio, 1999).

Como muestra la Tabla 5, las membranas con 0,01% de MWCNT y con nanoarcilla de bentonita PVDF18_2.0 mostraron uno de los valores más elevados del flujo de agua. Sin embargo, en el caso de la membrana PVDF18_2.0, el rechazo salino es más bajo, posiblemente debido a un mayor espesor de la membrana y a un mayor tamaño de poro (ver Tabla 6) (Rashed et al., 2020; Shah et al., 2020). No obstante, la membrana sin capa de soporte (PA) presentó uno de los espesores más bajos, por lo que mostró una mínima resistencia a la transferencia de masa, y el flujo de agua fue significativamente más alto (Zheng et al., 2019).

La membrana SAM10 mostró un ángulo de contacto ligeramente mayor en comparación con el resto de investigaciones, puesto que se buscó desarrollar una membrana hidrófoba para resistir los ataques de cloro, sacrificando la productividad del agua purificada (Khairkar et al., 2020). La membrana Koch modificada alcanzó el ángulo de contacto más bajo; sin embargo, la capa adicional de películas de copolímero disminuyó levemente su flujo, pero mantuvo un excelente rechazo de sal (Shafi et al., 2020). La etapa de reticulación química de la membrana 10% MXene @ CA produjo un tamaño de poro más pequeño, lo que condujo a un mayor ángulo de contacto y, por lo tanto, a la disminución del flujo de agua (Pandey et al., 2020).

Tabla 6

Parámetros característicos de la estructura de las membranas

Referencia	Membrana	Espesor (nm)	Rugosidad (nm)	Tamaño de poro (nm)	Ángulo de contacto (°)
Dalvi et al. (2017)	TFN-T-0,125wt% TiO ₂ -SiO ₂	-	-	-	-
Zheng et al. (2019)	PA	250	95,00	-	-
Shafi et al. (2020)	Koch modificada	-	7,20	-	29,12

Referencia	Membrana	Espesor (nm)	Rugosidad (nm)	Tamaño de poro (nm)	Ángulo de contacto (°)
Rashed et al. (2020)	TFN-0,01 en peso/ vol% MWCNT carboxilados	200	41,87	250,00	55,75
Khairkar et al. (2020)	SAM10	125000	-	-	60,00
Pandey et al. (2020)	10% MXene @ CA	123000	-	1,89	60,80
Shah et al. (2019)	PVDF18_2.0	82700	417,00	1173,30	43,58

Nota. Valores obtenidos a partir de la caracterización de las membranas, que influyen directamente en la eficiencia de desalinización.

Desalinización con sistemas híbridos

Algunos investigadores se enfocaron en el desarrollo de sistemas híbridos para aumentar la calidad del agua purificada. Un sistema híbrido consiste en una etapa de pretratamiento del agua de mar mediante un proceso que implica o no un cambio de fase, lo cual facilita la reducción de contaminantes, y su posterior tratamiento con otro proceso similar. La Tabla 7 aporta información sobre el dispositivo innovador empleado en cada estudio; así como el mayor interés por potenciar el rendimiento de procesos que implican el uso de membranas como, ósmosis inversa, ósmosis directa y destilación por membrana. En el último proceso, las membranas utilizadas han sido modificadas en su composición y morfología para aumentar su hidrofobicidad. También se muestran los diferentes tipos de energía utilizada, dentro de las cuales, la energía solar solo fue integrada al proceso MED-TVC y al sistema FD-MD, con el propósito de reducir el requerimiento de energía del sistema en conjunto (Chang et al., 2019; ElHelw et al., 2020).

Tabla 7

Tecnología de los procesos de desalinización con sistemas híbridos

Referencia	Proceso	Sistema / Dispositivo	Energía
EiHelw et al. (2020)	Destilación multiefectos (MED) con compresor termo-vapor (TVC)	Sistema cerrado de colectores cilindroparabólicos + generador de vapor + etapas de evaporación en MED	Solar térmica
Atab et al. (2018)	Ósmosis inversa (RO) y ciclo de adsorción (AD)	Dispositivo de recuperación de energía (PX) + evaporador AD	Mecánica y térmica
Zhao et al. (2014)	Ósmosis directa (FO) y destilación por membrana (MD)	Membrana comercial de compuesto de película delgada (TFC) y membrana de fibra hueca de PVDF de orificios múltiples para FO y MD, respectivamente.	Mecánica y térmica
Topaloglu et al. (2018)	Ósmosis directa (FO) y destilación por membrana (MD)	Membranas de hoja plana hechas de triacetato de celulosa y politetrafluoroetileno hidrófobo para FO y MD, respectivamente.	Mecánica y térmica
Chang et al. (2019)	Congelación (FD) y destilación por membrana (MD)	Membranas de fibra hueca de tres orificios fabricadas mediante el uso de fosfato de trietilo (TEP). Proceso de regasificación de GNL y paneles solares como fuentes de energía.	Fría y solar térmica
La Cerva et al. (2019)	Electrodialisis (ED)/electrodialisis inversa (RED) + ósmosis inversa (RO)	Membranas de intercambio iónico	Mecánica y eléctrica

Nota. Descripción del sistema/dispositivo y energía utilizados en los procesos de desalinización de los artículos de investigación.

En la Tabla 8 se muestran los valores del flujo de agua pura y rechazo de sal obtenidos en cada investigación. Chang et al. (2019) utilizaron el proceso FD para el tratamiento inicial del agua de alimentación, cuya salmuera concentrada pasaría posteriormente a MD. Encontraron que la membrana M5 (12% PVDF y 2% EG) mostró el máximo flujo de agua de 51,70 L/m²h acompañado de un rechazo salino del 99,96%. Topaloglu et al. (2018) desarrollaron un sistema híbrido amigable con el medio marino, en el cual se utilizó la ósmosis directa (I.FO) como primer proceso de desalinización, donde el agua de mar diluida fue procesada por MD para la obtención de agua potable. Además, se aplicó un segundo procesamiento por II.FO, con la finalidad de diluir el agua de mar concentrada en MD.

Lograron obtener un flujo de agua de 4,20 y 19,50 L/m²h para FO y MD, respectivamente; y un rechazo salino de más del 99%.

Zhao et al. (2014) utilizaron un copolímero termo-sensible 15SN como soluto de extracción en el proceso de FO. Después de tres ciclos de FO y MD, los flujos de agua obtenidos fueron de 3,50 y 2,50 L/m²h para FO y MD, respectivamente. Si bien el copolímero estudiado mostró un buen comportamiento, no se ha determinado el rechazo de sales y parámetros relacionados para garantizar la calidad del agua producto.

Tabla 8

Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de sistemas híbridos en la desalinización

Referencia	Flujo de agua (L/m ² h)	Rechazo de sal (%)
Zhao et al. (2014)	3,50 y 2,50 para FO y MD, respectivamente.	-
Topaloglu et al. (2018)	4,20 y 19,50 para FO y MD, respectivamente.	99,00
Chang et al. (2019)	51,70	99,96

Nota. Valores del flujo de agua pura y rechazo salino obtenidos en los artículos de investigación.

En la Tabla 9 se muestran los indicadores de tasa de flujo de permeado y energía consumida, los cuales están relacionados a la eficiencia de los sistemas híbridos. ElHelw et al. (2020) evaluaron el rendimiento de una planta desalinizadora con el sistema MED-TVC mediante el uso de energía solar. Encontraron que a mayor radiación solar se produce el máximo caudal de permeado (2500 m³/día), para las condiciones en las que se realizó la investigación. También encontraron que el agua obtenida cumplió con los parámetros permisibles para su consumo como agua potable. Atab et al. (2018) combinaron un dispositivo de recuperación de energía (PX) y un ciclo de adsorción (AD) para reutilizar el agua de rechazo del proceso de RO. Encontraron que una planta con el sistema RO-PX-AD (capacidad de 24 000 m³/día para agua de riego y agua purificada) produjo 6,3 m³/día de agua potable con una ligera disminución del consumo de energía a 0,8 kWh/m³ cuando se elevó el grado de temperatura.

La Cerva et al. (2019) desarrollaron simulaciones de dos sistemas para desalación, RED-RO y ED-RO, donde el pretratamiento con RED mostró el mejor comportamiento. Señalaron que el sistema RED-RO obtuvo una tasa de flujo de permeado de 140 m³/día, cuya concentración de sal fue alrededor de 0,2 g/L de NaCl. Asimismo, en el pretratamiento con RED, se produjo una ligera reducción del consumo de energía en RO, donde el sistema acoplado requirió aproximadamente de 1,80 kWh/m³.

Tabla 9

Rendimiento de sistemas híbridos en función del flujo de permeado y requerimiento de energía

Referencia	Tasa de flujo de permeado (m ³ /día)	Energía consumida (kWh/m ³)
ElHelw et al. (2020)	2500*	-
Atab et al. (2018)	6.3*	0,80
La Cerva et al. (2019)	140**	1,80

Nota. *Valor de la tasa de flujo de permeado a escala de una planta desalinizadora. **Valor de la tasa de flujo de permeado a través de un software de simulación.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática se enfocó en los estudios realizados entre los años 2010 al 2020, extraídos de diversas bases de datos y fuentes de información científica. Se seleccionaron 20 estudios que muestran el avance obtenido en esta área de investigación en los últimos años, para ello se utilizaron diferentes estrategias de búsqueda, criterios de inclusión y exclusión. Los resultados muestran un aumento progresivo en los trabajos de investigación publicados en esta área, por ejemplo, el 80% de las publicaciones utilizadas en este trabajo corresponden a los años 2019-2020. Esto sugiere que el tema de investigación tratado en este trabajo es muy activo y se presenta como un asunto de gran interés para muchos países que desean contar con procesos sostenibles para la desalación del agua de mar. Los resultados de la búsqueda de información también demuestran que este tema es abordado en casi todo el mundo, ya que por lo menos 1 trabajo utilizado en esta Revisión Sistemática perteneció a uno de los cinco continentes.

Los procesos de desalinización típicamente utilizados son RO, destilación flash múltiple etapa (MSF), MED, NF, ED/RED, y electrodesionización (EDI). Además, también se tienen los procesos de FO, MD, compresión de vapor (VP) y sistemas híbridos, los que en conjunto producen menos del 1% de agua desalada (Jones et al., 2019). En la actualidad existen más de 15 000 plantas desalinizadoras en funcionamiento a nivel mundial, de las cuales la gran mayoría se encuentran en la región de Medio Oriente y África del Norte. Debido a que el proceso de desalinización es costoso, ya que implica un gran consumo de energía, no todos los países invierten en esta tecnología y por lo tanto la mayor capacidad de desalación pertenece a países de altos ingresos (Jones et al., 2019). Como la escasez de agua potable es un problema que afecta esencialmente a los países de bajos ingresos, es

fundamental hacer investigación en esta área para reducir los costos y para lograr que esta tecnología sea accesible para todos.

A pesar de que las primeras plantas desalinizadoras utilizaban procesos térmicos como MSF y MED, con el paso de los años la tecnología de las membranas ha logrado imponerse ya que el consumo de energía se reduce considerablemente (Jones et al., 2019). En la revisión de la literatura se encontró que las membranas hidrófobas utilizadas en el proceso MD permiten maximizar el rendimiento de desalinización con cambio de fase. Sin embargo, el ensuciamiento de los dispositivos ha significado el mayor desafío para su uso a largo plazo (Khairkar et al., 2020). Asimismo, los estudios muestran que las nanofibras fabricadas mediante el proceso de electrohilado han desarrollado excelentes propiedades de hidrofobicidad, lo cual mejora las propiedades antihumectantes y permite obtener un excelente rechazo salino, manteniendo la buena calidad del flujo (Cabrera, Felix, Pérez y Romero, 2019). Debido al elevado costo de la energía y al uso de combustibles fósiles (que se agotan y contaminan), se está investigando cada vez más el uso de energías renovables en algunos procesos de desalinización. En particular el uso de la energía solar, como fuente sustentable y amigable con el medio ambiente, para la desalinización de agua de mar se presenta como una excelente opción (Cosín, 2017). Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de obtención de energía es su dependencia de las condiciones climáticas y de los periodos de radiación solar, por lo que estudios acerca de la destilación solar mostraron flujos de agua más bajos a comparación de otros procesos (Al-Qadami et al., 2019; Shafieian et al., 2020; K. Wang et al., 2020; Wilson et al., 2019). Por esta razón, grandes esfuerzos se están realizando para obtener sistemas de almacenamiento de energía solar que puedan garantizar el funcionamiento continuo de las plantas desalinizadoras (Cosín, 2017).

La mejora de las propiedades y la reducción de costos de fabricación de las membranas ha permitido alargar su vida útil y su uso potencial en distintos procesos sin cambio de fase (Cosín, 2017; Fountain, 2019). La adición de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) a la capa de poliamida de una membrana de FO, permite alcanzar grandes flujos de agua purificada. Este compuesto es conocido por sus propiedades hidrófobas (Rivas, Román y Cosme, 2007; Xie, Mai y Zhou, 2005), sin embargo, se ha demostrado que el agua fluye en el interior de los nanotubos, lo cual ha permitido su aplicabilidad en los procesos de desalinización (Z. Wang et al., 2007).

Gracias al uso de los sistemas híbridos se han logrado combinar varios procesos para mejorar la calidad de agua potable. La energía requerida en estos sistemas sigue siendo un factor de preocupación por los costos que involucra, conllevando a ciertas investigaciones a enfocarse en el uso de energía solar y/o dispositivos de recuperación de energía (Atab et al., 2018; Chang et al., 2019; ElHelw et al., 2020). En este tipo de tecnología se encontró que el acoplamiento FD-MD consiguió la más alta productividad de agua dulce (P. Wang, Luo y Chung, 2014). La adición óptima de PVDF en la membrana fue del 12%, con lo que se mantuvo una estructura uniforme y simétrica, acompañado de buenas propiedades mecánicas. Aunque un 2% de aditivo EG aumentó la porosidad y el flujo de permeado, mantuvo una excelente resistencia mecánica de la membrana (Chang et al., 2019).

Todas estas investigaciones demuestran que la tecnología de desalinización de agua es viable y prometedora. En los últimos años se han obtenido avances importantes en esta área, tanto en la selección de materiales y fuentes de energía como en el diseño de los dispositivos y procesos. El interés de diversos países en el desarrollo sostenible de esta tecnología es entendible, puesto que la crisis hídrica y el crecimiento poblacional están aumentando la demanda de agua potable. No es posible lograr que esta tecnología sea accesible y de bajo

costo sin invertir en investigación científica de alto nivel, por esta razón, países como Perú deben impulsar (a través de diversas fuentes de financiamiento) el desarrollo y puesta en marcha de iniciativas orientadas al estudio y uso de esta tecnología.

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática muestra los avances obtenidos en el área de desalinización de agua de mar. En este trabajo, se han analizado de manera detallada y crítica los estudios más recientes en esta área de investigación mediante el uso de una metodología basada en criterios de búsqueda, inclusión y exclusión. De toda la información disponible, 20 artículos científicos fueron seleccionados. Los resultados señalaron la relevancia que tiene el tema de desalinización en el mundo, observándose una tendencia creciente en el número de investigaciones realizadas entre los años 2014 y 2020, relacionadas con el mejoramiento del rendimiento de los dispositivos de desalinización.

Se determinó que el tipo de dispositivo influye significativamente en la eficiencia de desalinización para la obtención de agua potable, la cual se encuentra en función de la cantidad y calidad del agua tratada, consumo de energía, costos de inversión y mantenimiento e impacto ambiental. El sistema híbrido FD-MD mostró un buen desempeño frente a las otras categorías, debido a la alta porosidad de la membrana de fibra hueca de tres orificios. En la desalinización con cambio de fase, el pretratamiento aplicado al proceso MD junto a la regeneración de la membrana PVDF electrohilada de TiO_2 , lograron el mejor rendimiento dentro de esta categoría. Sin embargo, a comparación del resto de estudios, los resultados demuestran su baja eficiencia en la productividad de agua con un flujo de $32,26 \text{ L/m}^2\text{h}$; caso contrario sucede en el rechazo salino, el cual se ve significativamente mejorado, alcanzando un valor de 99,90%.

La integración de la energía solar en varios procesos de desalinización con cambio de fase, permitió reducir el alto consumo de energía que requiere de combustibles fósiles; mas no favoreció la productividad del agua pura, puesto que el funcionamiento de los dispositivos en base a esta energía, dependía de las condiciones climáticas y esta no siempre fue la máxima o no se mantuvo constante en el tiempo. Sin embargo, el uso de la energía solar junto con la energía residual del proceso de regasificación de GNL en el proceso híbrido FD-MD, disminuyó el consumo de energía y garantizó el buen rendimiento de los dispositivos.

De manera general, el dispositivo de membrana es más competitivo y beneficioso en cualquier proceso de desalinización. Aunque en la actualidad, la ósmosis inversa es la tecnología más utilizada en las plantas desalinizadoras a nivel mundial, esta revisión demuestra que FO y MD presentan ciertas ventajas que potencian su eficiencia de desalinización, como altos flujos de agua y rechazo de sal. No obstante, su rendimiento a largo plazo se puede ver afectado por el ensuciamiento de las membranas, el cual puede ser contrarrestado con la investigación adecuada para aumentar la selectividad y permeabilidad de este dispositivo, sin que el aumento de una variable involucre la disminución de la otra. Además, si a esto se le suma el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía solar, estos procesos pueden ser utilizados en las próximas plantas desaladoras y ser sostenibles durante su periodo de diseño.

Se recomienda investigar el uso de nuevos materiales para síntesis de las membranas, ya sea para toda su composición o, mediante el uso de aditivos o nanopartículas que mejoren algunas de sus propiedades. Además, es importante explorar el diseño de nuevos sistemas de almacenamiento para las energías renovables que pueden ser usadas en los procesos de desalinización. Por último, se recomienda incrementar el número de investigaciones acerca de dispositivos de desalinización, enfocados en el análisis económico, energético y de gestión

de la salmuera para mejorar la eficiencia y viabilidad del proceso. Es importante mencionar que una de las principales limitaciones en la realización de este trabajo se presentó en la etapa de búsqueda de información, debido a que muchos artículos científicos no se encontraban disponibles gratuitamente, lo cual demoró la culminación de la Revisión Sistemática.

Finalmente, se espera que este trabajo promueva el interés por el tema de desalinización, para que en los próximos años, los ingenieros tengan el conocimiento suficiente y sean capaces de brindar soluciones óptimas al problema de la brecha de acceso al agua potable en nuestro país.

REFERENCIAS

- Ahmad, A., Mohd, M., y Mohamad, M. (2019). Effect of Additives on Hydrophobicity of PVDF Membrane in Two-stage Coagulation Baths for Desalination. *Journal of Physical Science*, 30(3), 207–221. doi: 10.21315/jps2019.30.3.13
- Al-Qadami, E. H. H., Ahsan, A., Abdurrasheed, A. S., Mustafa, Z., Yusof, K. W., Takaijudin, H. B., y Malek, M. B. A. (2019). Yield Efficiency Evaluation of Double Slope Solar Stills Connected with External Spiral Copper for Potable Water Production. *Journal of Ecological Engineering*, 20(7), 176-186. doi: 10.12911/22998993/108654
- Atab, M., Smallbone, A. J., y Roskilly, A. P. (2018). A hybrid reverse osmosis/adsorption desalination plant for irrigation and drinking water. *Desalination*, 444, 44-52. doi: 10.1016/j.desal.2018.07.008
- Cabrera, L., Felix, M., Pérez, V., y Romero, A. (2019). Membrana de nanofibras procesadas mediante electrohilado con potencial uso en la encapsulación de enzimas. *Afinidad*, 76(587), 180-188.
- Chang, J., Zuo, J., Lu, K.-J., y Chung, T.-S. (2019). Membrane development and energy analysis of freeze desalination-vacuum membrane distillation hybrid systems powered by LNG regasification and solar energy. *Desalination*, 449, 16-25. doi: 10.1016/j.desal.2018.10.008
- Chen, C., Jiang, Y., Ye, Z., Yang, Y., y Hou, L. (2019). Sustainably integrating desalination with solar power to overcome future freshwater scarcity in China. *Global Energy Interconnection*, 2(2), 98-113. doi: 10.1016/j.gloi.2019.07.009

- Claudio, O. (2018). *Desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable* (tesis de maestría). Centro de Investigaciones en Óptica A.C., Aguascalientes, México.
- ColorearTv. (2020). Mapa del mundo para colorear. [Figura]. Recuperado de <https://coloreartv.com/tag/mapamundi-para-colorear-en-paint>
- Cortes, L., y Lesmes, L. (2014). *Simulación de una planta desalinizadora de agua de mar, por medio del Software IMS Desing como estrategia para fortalecer el desarrollo social del Norte Caribe Colombiano- Municipio de Uribía – La Guajira* (tesis de pregrado). Universidad Libre Bogotá, Colombia.
- Cosín, C. (2017). Desalación y energías renovables [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/carlos-cosin/desalacion-y-energias-renovables>
- Dalvi, V., Tang, Y. P., Staudt, C., y Chung, T. S. (2017). Influential effects of nanoparticles, solvent and surfactant treatments on thin film nanocomposite (TFN) membranes for seawater desalination. *Desalination*, 420, 216-225. doi: 10.1016/j.desal.2017.07.016
- Dévora, G. E., González, R., y Ruiz, S. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(3), 27-46.
- ElHelw, M., El-Maghlany, W. M., y El-Ashmawy, W. M. (2020). Novel sea water desalination unit utilizing solar energy heating system. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 915-924. doi: 10.1016/j.aej.2020.03.019
- Fountain, H. (23 de octubre de 2019). ¿Cuánto cuesta desalinizar el agua que necesita el mundo? *The New York Times*. Recuperado de <https://www.nytimes.com/es/2019/10/23/espanol/mundo/agua-desalinizada.html>

- Guo, J., Deka, B. J., Kim, K.-J., y An, A. K. (2019). Regeneration of superhydrophobic TiO₂ electrospun membranes in seawater desalination by water flushing in membrane distillation. *Desalination*, 468, 114054. doi: 10.1016/j.desal.2019.06.020
- Gutiérrez, S., Hassani, M., y Quiroga, J. (2016). Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en la desalación de aguas. *TecnoAqua*, 17, 104-117.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., y Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343-1356. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076
- Khairkar, S. R., Pansare, A. V., Shedge, A. A., Chhatre, S. Y., Suresh, A. K., Chakrabarti, S., ... Nagarkar, A. A. (2020). Hydrophobic interpenetrating polyamide-PDMS membranes for desalination, pesticides removal and enhanced chlorine tolerance. *Chemosphere*, 258, 127179. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127179
- La Cerva, M., Gurreri, L., Cipollina, A., Tamburini, A., Ciofalo, M., y Micale, G. (2019). Modelling and cost analysis of hybrid systems for seawater desalination: Electromembrane pre-treatments for Reverse Osmosis. *Desalination*, 467, 175-195. doi: 10.1016/j.desal.2019.06.010
- Landsman, M. R., Sujanani, R., Brodfuehrer, S. H., Cooper, C. M., Darr, A. G., Davis, R. J., ... Katz, L. E. (2020). Water Treatment: Are Membranes the Panacea? *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 11(1), 559-585. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-111919-091940
- Organización Mundial de la Salud. (2015). *Agua, saneamiento e higiene para acelerar y sostener el progreso respecto de las enfermedades tropicales desatendidas*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250587/WHO-FWC->

WSH-15.12-

spa.pdf;jsessionid=DBC7713F47BD339999D5171AEDFCE99?sequence=1

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo*

humano. Recuperado de

<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958->

spa.pdf?ua=1

Palacio, L. (1999). *Caracterización estructural y superficial de membranas microporosas*

(tesis doctoral). Universidad de Valladolid, España.

Pandey, R. P., Rasheed, P. A., Gomez, T., Azam, R. S., y Mahmoud, K. A. (2020). A fouling-

resistant mixed-matrix nanofiltration membrane based on covalently cross-linked

Ti3C2TX (MXene)/cellulose acetate. *Journal of Membrane Science*, 607, 118139.

doi: 10.1016/j.memsci.2020.118139

Rampun, E. L. A., Elma, M., Rahma, A., y Pratiwi, A. E. (2019). Interlayer-free silica-pectin

membrane for sea-water desalination. *Membrane Technology*, 2019(12), 5-9. doi:

10.1016/S0958-2118(19)30222-8

Rashed, A. O., Esawi, A. M. K., y Ramadan, A. R. (2020). Novel Polysulfone/Carbon

Nanotube-Polyamide Thin Film Nanocomposite Membranes with Improved Water

Flux for Forward Osmosis Desalination. *ACS Omega*, 5(24), 14427-14436. doi:

10.1021/acsomega.0c00973

Rivas, M., Román, J., y Cosme, M. (2007). *Informe de Vigilancia Tecnológica madrid*

“Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono”. España: Fundación

madrid para el Conocimiento. Recuperado de

https://www.madrimasd.org/uploads/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/V T11_nanotubos.pdf

Shafi, H. Z., Wang, M., Gleason, K. K., y Khan, Z. (2020). Synthesis of surface-anchored stable zwitterionic films for inhibition of biofouling. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 121971. doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.121971

Shafieian, A., Rizwan Azhar, M., Khiadani, M., y Kanti Sen, T. (2020). Performance improvement of thermal-driven membrane-based solar desalination systems using nanofluid in the feed stream. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100715. doi: 10.1016/j.seta.2020.100715

Shah, A. A., Cho, Y. H., Nam, S.-E., Park, A., Park, Y.-I., y Park, H. (2020). High performance thin-film nanocomposite forward osmosis membrane based on PVDF/bentonite nanofiber support. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 86, 90-99. doi: 10.1016/j.jiec.2020.02.016

Topaloglu, D., Tilki, Y. M., Aksu, S., Yilmaz, T. N., Celebi, E. E., Oncel, S., y Aydiner, C. (2018). Novel technological solutions for eco-protective water supply by economical and sustainable seawater desalination. *Chemical Engineering Research and Design*, 136, 177-198. doi: 10.1016/j.cherd.2018.04.022

Wang, K., Huo, B., Liu, F., Zheng, Y., Zhang, M., Cui, L., y Liu, J. (2020). In situ generation of carbonized polyaniline nanowires on thermally-treated and electrochemically-etched carbon fiber cloth for high efficient solar seawater desalination. *Desalination*, 481, 114303. doi: 10.1016/j.desal.2019.114303

- Wang, P., Luo, L., y Chung, T.-S. (2014). Tri-bore ultra-filtration hollow fiber membranes with a novel triangle-shape outer geometry. *Journal of Membrane Science*, 452, 212-218. doi: 10.1016/j.memsci.2013.10.033
- Wang, Z., Ci, L., Chen, L., Nayak, S., Ajayan, P. M., y Koratkar, N. (2007). Polarity-Dependent Electrochemically Controlled Transport of Water through Carbon Nanotube Membranes. *Nano Letters*, 7(3), 697-702. doi: 10.1021/nl062853g
- Wilson, H. M., Rahman A.R., S., Parab, A. E., y Jha, N. (2019). Ultra-low cost cotton based solar evaporation device for seawater desalination and waste water purification to produce drinkable water. *Desalination*, 456, 85-96. doi: 10.1016/j.desal.2019.01.017
- Xie, X.-L., Mai, Y.-W., y Zhou, X.-P. (2005). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(4), 89-112. doi: 10.1016/j.mser.2005.04.002
- Zhao, D., Wang, P., Zhao, Q., Chen, N., y Lu, X. (2014). Thermoresponsive copolymer-based draw solution for seawater desalination in a combined process of forward osmosis and membrane distillation. *Desalination*, 348, 26-32. doi: 10.1016/j.desal.2014.06.009
- Zheng, M., Zhao, X., Xu, S., y Lu, D. (2019). Ultrathin Support-Free Membrane with High Water Flux for Forward Osmosis Desalination. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(6), 138. doi: 10.1007/s11270-019-4192-z

ANEXOS

ANEXO N° 1. Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de desalinización en los procesos con cambio de fase

Tabla 10

Resultados de los parámetros que miden la eficiencia de desalinización con cambio de fase

Referencia	Flujo de agua (L/m ² h)	Rechazo de sal (%)
Shafieian et al. (2020)	4,48	99,00
Rampun et al. (2019)	5,73*	95,80
Al-Qadami et al. (2019)	0,41*	99,20
Ahmad et al. (2019)	13,85*	99,00
Guo et al. (2019)	32,26	99,90
Wang et al. (2020)	1,43*	99,90
Wilson et al. (2019)	1,19*	99,45

Nota. Valores del flujo de agua pura y rechazo salino obtenidos en los artículos de investigación. *Flujo de agua medido en kg/m²h.