

# Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce\*

María Grueso-Domínguez\*\*

Camilo Castro-Jiménez\*\*\*

Mauricio Correa-Ochoa\*\*\*\*

Julio Saldarriaga-Molina\*\*\*\*\*

Recibido: 19/06/2018 • Aceptado: 07/05/2019

<https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a5>

## Resumen

Teniendo en cuenta la poca disponibilidad de agua dulce, el acelerado crecimiento de la población y la contaminación del recurso hídrico, es necesario buscar alternativas para aprovechar los recursos salobres y el agua contenida en los océanos. Numerosas investigaciones en el campo de los procesos de desalinización –entre los cuales se resalta la separación por membranas– han permitido volver potable el agua de mar en condiciones económicamente viables, sin grandes dificultades. El objetivo de este artículo es recopilar los principales avances a nivel mundial sobre los procesos de desalinización. Como resultado del análisis de la evidencia científica encontrada, se resaltan algunos desafíos a futuro que incluyen: el uso de fuentes de energía renovable en los procesos, la reducción en el uso de productos químicos, el uso de materiales innovadores para las membranas, la búsqueda de soluciones de pretratamiento más efectivos y rentables, y la disminución del costo total del agua para el consumidor.

**Palabras clave:** agua salobre; desalinización; separación por membrana; osmosis inversa; recursos energéticos renovables.

\* Artículo de revisión derivado del proyecto de investigación: *Tratamiento de agua salobre mediante osmosis inversa: una alternativa frente a la escasez de agua dulce en Colombia* que se encuentra en fase de ejecución desde el semestre 2017-II, financiado por el Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

\*\* Ingeniera sanitaria, miembro del Grupo de Investigación GIGA, Universidad de Antioquia. Profesora auxiliar, Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: maria.grueso@udea.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-6332-4617>

\*\*\* Ingeniero sanitario, magíster en Ingeniería Ambiental, miembro del Grupo de Investigación GIGA, Universidad de Antioquia. Profesor, Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: camilo.castro@udea.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-8272-2258>

\*\*\*\* Ingeniero sanitario, magíster en Ingeniería Ambiental, miembro del Grupo de Investigación GIGA, Universidad de Antioquia. Profesor asistente, Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: mandres.correa@udea.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3666-0767>

\*\*\*\*\* Ingeniero sanitario, magíster en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería, miembro del Grupo de Investigación GIGA, Universidad de Antioquia. Profesor, Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: julio.saldarriaga@udea.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-9395-5417>

## State of the Art: Desalination Using Membrane Technologies as an Alternative for the Problem of Fresh Water Shortage

### **Abstract**

Considering the scarce availability of fresh water, the accelerated growth of population and the contamination of water resources, it is necessary to look for alternatives to take advantage of the brackish resources and water from the oceans. Numerous investigations in the field of desalination processes –emphasizing in the separation by membranes–, have allowed the potabilization of sea water in economically viable conditions and without major problems. The objective of this article is to compile the main advances worldwide regarding desalination processes. As a result of the analysis of the scientific evidence found, some future challenges are highlighted, which include: use of renewable energy sources in the processes, reduction in the use of chemical products; use of innovative materials for membranes, the search for more effective and profitable pretreatment solutions, and reduction of the total cost of water for the consumer.

**Keywords:** brackish water; desalination; membrane separation; reverse osmosis; renewable energy resources.

## Estado da arte: dessalinização por meio de tecnologias de membrana como alternativa ao problema de escassez de água doce

### **Resumo**

Ao considerar a pouca disponibilidade de água doce, o acelerado crescimento da população e a contaminação do recurso hídrico, é preciso buscar alternativas para aproveitar os recursos salubres e a água contida nos oceanos. Numerosas pesquisas no campo dos processos de dessalinização —entre os quais se destaca a separação por membranas— permitiram tornar a água do mar potável em condições economicamente viáveis, sem grandes dificuldades. O objetivo deste artigo é reunir os principais avanços mundiais sobre os processos de dessalinização. Como resultado da análise da evidência científica encontrada, destacam-se alguns dos desafios futuros, que incluem: o uso de fontes de energia renovável nos processos, a redução no uso de produtos químicos, o uso de materiais inovadores para as membranas, a busca por soluções de pré-tratamento mais efetivas e rentáveis e a diminuição do custo total da água para o consumidor.

**Palavras-chave:** água salubre; dessalinização; separação por membrana; osmose inversa; recursos energéticos renováveis.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un bien esencial para la vida y el desarrollo económico de las poblaciones. Entre otras, las actividades industriales, agrícolas y ganaderas giran en torno a la disponibilidad y calidad del recurso hídrico [1]. Alrededor del 71 % del área superficial del planeta está conformada por agua, el 97,5 % del volumen total está presente en los mares, con condiciones de salinidad que hacen casi inviable su consumo y solo el 2,5 % restante es agua dulce, de la cual se puede aprovechar aproximadamente el 0,8 % que está descongelada [2]. Teniendo en cuenta la pequeña porción de agua dulce disponible, el crecimiento acelerado de la población y el deterioro del recurso a causa de la actividad antrópica se hace necesario plantear soluciones que permitan aprovechar el agua contenida en los océanos mediante un proceso viable económicamente que provea agua en condiciones óptimas para el uso y consumo de poblaciones en las que escasean las fuentes de agua superficial y que tienen acceso al mar [3].

Gracias a las numerosas investigaciones realizadas alrededor del mundo, los avances tecnológicos y su combinación con el uso de energías renovables, la desalinización se ha convertido en una alternativa para resolver el problema de escasez de agua potable en regiones costeras. La desalinización hace referencia a los procesos encaminados a la remoción del exceso de sal y de otros minerales presentes en el agua de mar y el agua salobre con el objetivo de obtener agua dulce. Esta alternativa se considera como una fuente de agua rentable, ambientalmente segura, sostenible y a prueba de sequías [4].

Dentro de las tecnologías utilizadas para la desalinización del agua en el mundo se encuentran los métodos de evaporación-condensación, como la destilación solar (SD), la destilación en múltiples etapas (MED) y la compresión mecánica de vapor (CMV); los métodos de separación por membranas, como la destilación por membrana (MD), osmosis inversa (OI), nanofiltración (NF) y otros métodos como el intercambio catiónico y la electrodiálisis. El sistema de desalinización más utilizado por los países desarrollados y de occidente es OI por su consumo eficiente de energía, mientras que los países de oriente medio prefieren los sistemas MED por la gran cantidad de petróleo del que pueden disponer para el uso de esa tecnología [5].

## 1. USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA PARA LA DESALINIZACIÓN

### 1.1 Generalidades de los procesos de separación con membranas

En los procesos de separación con membranas la presión suministrada permite el rechazo de los constituyentes disueltos en el agua de alimentación del sistema. Las membranas son permeables al agua, pero no a las sustancias presentes en ella, por esto son rechazadas y removidas. En la industria del agua potable estos procesos se

utilizan para desalinización, ablandamiento, remoción de sólidos orgánicos disueltos, color y bacterias.

Los procesos se clasifican de acuerdo con el tipo de membrana en: OI –que impiden el paso de bacterias, protozoos, algas, virus, materia orgánica disuelta, iones divalentes y monovalentes y su estructura no presenta poros–; NF –cuyo tamaño de poro es aproximadamente de  $0,001 \mu\text{m}$ , que a diferencia de las membranas de OI no retiene las especies monovalentes como sodio y cloro–; UF –con tamaño de poro de  $0,01 \mu\text{m}$  y microfiltración (MF) de  $0,1 \mu\text{m}$ , las cuales, a diferencia de las membranas anteriormente mencionadas, solo permiten la remoción de bacterias y sólidos suspendidos– [6].

Los materiales más utilizados en la fabricación de membranas de OI y NF son los derivados celulósicos y derivados de poliamida. El acetato de celulosa (material comercial) no tolera temperaturas superiores a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y sufre procesos de hidrólisis a pH menores a 3 y superiores a 8 unidades, son susceptibles a la degradación biológica y a concentraciones de cloro libre por encima a  $1,0 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ . Las poliamidas resisten la degradación biológica, funcionan de manera estable en valores de pH entre 3 y 11 unidades, y no se hidrolizan en agua. Estas membranas de poliamida, bajo condiciones similares de presión y temperaturas pueden producir un mayor flujo de agua y un alto rechazo de sales en comparación con las de acetato de celulosa, sin embargo, las membranas de poliamida son más susceptibles al ensuciamiento y no toleran ninguna concentración de cloro libre. Las membranas se fabrican comúnmente en una configuración enrollada en espiral, las cuales son mayormente utilizadas en el tratamiento de aguas para consumo humano, provenientes de aguas subterráneas o fuentes superficiales, o en configuración de fibra hueca [7].

En la fabricación de membranas de UF y MF se utilizan comúnmente polímeros orgánicos, sin embargo, en relación con el uso de las membranas de polisulfona, son las más utilizadas, debido a su alta tolerancia a los cambios de pH y a que pueden soportar temperaturas hasta de  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las membranas fabricadas con polímero de polivinilidenefluorida (PVDF) toleran un rango de pH de 2-11 unidades y las de polipropileno (PP) tienen tolerancia a valores de pH en el intervalo de 2-13 unidades y son especiales para procesos de MF. Por otro lado, las de polietersulfona (PES) y polisulfona (PS), que trabajan de manera eficiente a valores de pH entre 2-13 unidades, son ideales para UF. Por último, las membranas de fibra hueca son la configuración más común para aplicaciones de UF y MF [7].

## 1.2 Ensuciamiento y limpieza de membranas

El ensuciamiento en las membranas ocurre cuando se presentan condiciones que conducen al crecimiento y proliferación de las bacterias. Este fenómeno puede encaminar

a graves problemas operacionales que afectan los procesos de desalinización. El control del crecimiento microbiano se hace generalmente mediante la aplicación de biocidas (desinfectantes) en plantas de desalinización. Sin embargo, el crecimiento biológico y el ensuciamiento no han sido bien manejados puesto que los pretratamientos no se han enfocado en la limitación de nutrientes.

En Estados Unidos se han hecho ensayos biológicos con el carbono orgánico asimilable (AOC por sus siglas en inglés) para evaluar los efectos del pretratamiento en la concentración de nutrientes del agua cruda, los cuales han identificado correlaciones estadísticamente significativas entre AOC y los efectos operacionales causados por el ensuciamiento (mayor presión de operación y menor flujo de permeado a través de la membrana) [8]. Dentro de los biocidas potencialmente viables para combatir el ensuciamiento se encuentran las nanopartículas de cobre (CuNPs) que pueden ser fácilmente fijadas a las membranas sin necesidad de desmontar el módulo. Este agente antimicrobiano de costo relativamente bajo conduce a reducciones de hasta el 90 % del número de bacterias asociadas a *Escherichia coli* presentes en la membrana, con lo que se convierte en una alternativa potencial para reducir el ensuciamiento [9].

## 2. LA DESALINIZACIÓN EN EL MUNDO: MECANISMOS Y FUENTES DE ENERGÍA

El agua y la energía son recursos estrechamente vinculados, de los cuales depende el crecimiento económico, geográfico y social de la humanidad [10]. En el mundo existen muchas plantas de desalinización en operación, pero los costos de capital y el consumo energético son elevados. Por ello, con el objetivo de aumentar la eficiencia de los sistemas, reducir los costos y mejorar la producción de agua dulce, se desarrollan numerosas investigaciones en el área [11].

### 2.1 La desalinización en latinoamérica

En Latinoamérica, la combinación de procesos de desalinización con energías renovables como la solar, el constante desarrollo tecnológico en el uso de membranas, y la creación constante de programas gubernamentales han hecho de México un país pionero en la utilización de tecnologías de desalinización [12]. La misma fuente señala que la única planta nuclear de México utiliza un sistema de OI, ya que este proceso produce el nivel de filtración más fino existente y que la planta de 50 GPM –cuya eficiencia en remoción de sales, materia orgánica, iones y bacterias es del 99 %–, se compone de un sistema de filtración de arena de zeolita, filtros de cartucho de propileno, un sistema de OI compuesto por dos pasos (24 membranas en total) con inyección continua de anti-incrustante, un sistema de desgasificación y un módulo de electrodesionización [12].

En el marco del programa gubernamental Impulsa IV, Muñoz y Becerril [13] identificaron 28 localidades en 10 estados mexicanos con escasez de agua potable, baja población y disponibilidad de agua salada o salobre, y un buen nivel de irradiación solar, a las cuales les suministraron plantas de osmosis inversa dotadas de turbinas pelton para la recuperación de energía, un pretratamiento con filtración gruesa y fina, adición de ácidos, coagulantes y desinfección con cloro, seguido de decloración con bisulfato de sodio y un pos tratamiento de remineralización. Cada planta trata un total de  $1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  con sistema solar fotovoltaico y un rechazo de sales del 99,4 % [13].

En Brasil, las plantas de desalinización se han convertido en una alternativa de gran interés para suministrar agua potable a regiones semiáridas del país. Igualmente, la escasez de agua en la región y la oportunidad de obtener agua de buena calidad también han permitido educar a la población en el uso racional del recurso hídrico. Se estima que la mitad de las fuentes para abastecimiento de agua son de tipo subterráneas, las cuales presentan un elevado contenido de sales disueltas. Con el fin de garantizar condiciones óptimas para el agua de consumo, el gobierno brasileño financió la instalación de plantas de tratamiento por OI para la desalinización de agua salobre de los pozos construidos en las comunidades a través del programa *Água Boa*. La región semiárida situada en el nordeste del país cuenta con aproximadamente 3.000 plantas de desalinización por OI, las cuales generan un rechazo del orden del 40 al 70 % del total de agua salobre; la salmuera generada es utilizada en gran medida en actividades de agricultura, piscicultura, minería y para la alimentación de animales, para disminuir así los impactos ambientales que esta pueda generar [14].

Una de las alternativas más sobresalientes para el abastecimiento de agua en Brasil es el uso de las aguas subterráneas del acuífero Guaraní, en el cual se llevó a cabo un estudio sobre el aprovechamiento del agua salobre de esta fuente mediante OI para reducir el contenido de fluoruros ( $1,91\text{-}2,25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ F}$ ), sulfatos ( $285,4\text{-}346,1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ SO}_4^{2-}$ ) y sólidos disueltos totales ( $1059\text{-}1410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ SDT}$ ). En el sistema se utilizó una membrana OI 3838 HR-NYV de poliamida con una configuración en espiral; con presión de trabajo de 2Mpa se obtuvo un rechazo de aproximadamente 94 % para  $\text{SO}_4^{2-}$ , 97 % para SDT y 100 % para F; lo cual confirma así que la OI es un método eficaz para mejorar la calidad del agua salobre del acuífero a la calidad requerida para consumo humano [15].

De otro lado y de acuerdo con lo reportado por López *et al.*, [16] países como Cuba empezaron a incursionar en el uso de tecnologías de desalinización. Lo anterior se soporta en el hecho de que las soluciones tradicionales para el problema de escasez de agua son insuficientes y se empieza a considerar el uso de agua de mar como solución alternativa, inicialmente para la descarga de inodoros. El 79 % de la población cubana

cuenta con un suministro de agua intermitente ( $12 \text{ h.d}^{-1}$ ), se presenta una ausencia de fuentes alternativas de abastecimiento de buena calidad, las redes de distribución presentan problemas graves y son ineficientes. Debido a esto han incrementado el uso de tecnologías como la OI en el sector económico, como por ejemplo en el hotel Breezes Jibacoa, que cuenta con una planta para un caudal de  $240 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ , pese a tratarse de productos importados y de que no se cuenta con un diseño y un ensamble local de estos sistemas [16].

En Argentina la implementación de sistemas de OI se da con mayor frecuencia en poblaciones que han presentado escasez en el suministro de agua potable; un ejemplo de esto se da en la ciudad de Puerto Deseado, Santa Cruz, la cual cuenta con una planta de potabilización que incluye membranas de ultrafiltración como pretratamiento, un sistema ultravioleta, un módulo de OI de dos etapas con 120 membranas cada una y una unidad de recuperación de energía. La planta tiene una capacidad de  $3.000 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$  [17].

Países como Chile han sido objeto de estudio en el campo de la desalinización, ya que ha implementado grandes plantas para suministro de agua de uso doméstico e industrial en el desierto de Atacama, y se le ha reconocido como ejemplo global de desarrollo de energías renovables [18]. En un estudio realizado por Molinos *et al.* [19] en Chile, se concluye que el costo total del agua desalinizada se reduce en un 21 a 23 % cuando la energía para su producción se cambia predominantemente, a una fuente renovable.

En Colombia la implementación de sistemas de desalinización se enfoca en zonas costeras con escasez de agua dulce, en las cuales se han planteado alternativas de tratamiento con desalinización para pequeñas comunidades; ejemplo de ello se puede observar en el municipio de Manaure, en La Guajira, donde la empresa de acueducto cuenta con una planta de desalinización con capacidad de producción de  $950 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ , conformada por un pretratamiento con filtros a presión y microfiltración, seguido del tratamiento mediante OI; el municipio no cuenta con redes de distribución adecuadas, por lo tanto el suministro de agua a la comunidad se lleva a cabo a través de carrotanques [20]. Otro caso se presenta en El Cabo de la Vela, donde se cuenta con una planta de tratamiento mediante OI con capacidad de  $70 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$  [21]. Además, se destacan investigaciones para la automatización de plantas de OI y el ensamble nacional de dichos sistemas, presentado en Coronado [22].

## 2.2 Europa y los procesos de desalinización

Dentro de las experiencias encontradas, se destacan las investigaciones de países como España, Portugal y Francia. La costa mediterránea de España está hídricamente

condicionada debido al bajo nivel de precipitaciones, largos periodos de sequía y particular topografía del territorio. La desalinización se ha convertido en una alternativa viable para resolver el problema de escasez de agua en este país, ya que permite ofrecer soluciones de forma independiente y local. Aunque debido a su costo esta alternativa no es la preferida en la comunidad, según se evidencia en una encuesta realizada específicamente en Alicante, el uso de esta alternativa ha aumentado en España y los costos ya no se consideran un problema debido a los avances técnicos y a la combinación de procesos de desalinización con sistemas de energía renovables [23].

Lo anterior se puede evidenciar en proyectos como aquellos desarrollados en las Islas Canarias, donde se da una combinación de autogeneradores con una planta de OI de  $17 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (proyecto Aerogedesa) y otra de  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (Prodesal); en la plataforma solar Almería, la cual es referencia mundial en el uso de tecnologías de desalinización con energía solar, dichas plantas trabajan con destilación y energía solar térmica. De otro lado, el proyecto Dessol utiliza energía solar fotovoltaica para el funcionamiento de una planta de OI de  $3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , y también han estudiado la utilización de energía undimotriz (obtención de energía mecánica a partir del movimiento de las olas) para suplir el consumo energético de la planta [24]. Se pueden presentar combinaciones entre los sistemas de desalinización por OI y el uso de energías renovables, y por ende, se han modelado sistemas híbridos con base en energías renovables que garanticen las necesidades energéticas de la planta desaladora. Los resultados demuestran que el sistema híbrido óptimo –desde el punto de vista técnico-económico para el suministro energético de una planta de OI con capacidad de producción aproximada de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ – es un sistema eólico-diesel. En plantas de OI de baja producción y zonas de bajas velocidades de viento, el mejor sistema para abastecimiento de energía renovable es el que está conformado por paneles fotovoltaicos y generador diésel [25].

Portugal le ha apostado también a la integración de energías renovables con la desalinización como una solución sostenible para resolver el problema de escasez de agua en varias regiones del planeta, con menores costos y reducción significativa de la contaminación (los sistemas energéticos convencionales aportan a la contaminación y a la emisión de gases de efecto invernadero debido al uso de combustibles fósiles). Existen varias tecnologías de desalinización, así como diversas tecnologías de energía renovable para potenciarlas, la elección depende de la calidad del agua salobre, la disponibilidad de recursos de energía renovable, los costos de capital, operación y mantenimiento, la eficiencia energética y los impactos ambientales; dentro de las combinaciones posibles han considerado la desalinización mediante OI con energía solar fotovoltaica como una alternativa eficiente y rentable [26].

De la misma manera, Francia se ha enfocado en el estudio de las tecnologías más utilizadas para desalinización y las tecnologías de producción de energía solar

compatibles con estas. La solución la encuentran en la combinación de fuentes de calor (tecnologías de concentración de energía solar como cilindros parabólicos y tecnologías fotovoltaicas) y procesos de desalinización (OI y MED) [27].

### 2.3 Desalinización en Asia

Como experiencia aplicada, se conoce que el gobierno chino financia una operación a gran escala para generar agua dulce a partir de hielo por medio de la congelación, proyecto basado en el fenómeno natural de conexión en red de moléculas de agua pura y exclusión de otros iones o impurezas mientras se forma el hielo [28], específicamente mediante formación de hidratos (forma sólida, similar al hielo en el que las moléculas de gas están rodeadas por moléculas de agua en condiciones de alta presión y baja temperatura). Este método de desalinización de agua de mar utiliza CO<sub>2</sub> como refrigerante, que es más eficaz desde el punto de vista energético en comparación con la evaporación. Sin embargo, esta apuesta no ha sido suficiente para alcanzar la desalinización de agua de mar, pero se ha considerado apropiado como pretratamiento para procesos de OI [29].

La investigación en países asiáticos también se ha centrado en la integración de fuentes de energía renovable; por ejemplo, en Abu Dabi (Emiratos Árabes Unidos) se diseñó una planta de desalinización por OI integrada con una fuente de energía solar fotovoltaica para el instituto Masdar de Ciencia y Tecnología. Las necesidades hídricas del instituto se satisfacen mediante plantas de desalinización térmicas, las cuales funcionan con combustibles fósiles y son administradas por el gobierno. El estudio ha dado pie a una alternativa eficiente, sostenible y económicamente factible que permita reducir la inversión del gobierno para subsidiar los costos de producción de agua en un 43 % [30].

Japón también ha reconocido que las tecnologías de desalinización mediante OI son una alternativa necesaria frente a la creciente demanda de agua potable, al permitir un suministro de agua potable constante y de buena calidad. El gobierno de Japón desarrolló un proyecto denominado *Mega-ton Water System* con cooperación público-privada para la creación de un nuevo sistema de desalinización mediante OI multi-etapa que permita aumentar los porcentajes de recuperación con respecto a los sistemas convencionales de una sola etapa (35 a 50 %) hasta menos del 65 % para agua de mar con concentraciones de 35.000 mg/l SDT.

La característica del nuevo sistema de OI consiste en utilizar 2-4 elementos para la primera etapa y más de 4 elementos para la segunda etapa después de la bomba *booster*, con el objetivo de reducir la presión de la primera etapa. Como resultado, la alta tasa de recuperación permitió minimizar el tamaño del equipo de captación y pretratamiento, reducir el volumen de salmuera, y por tanto los gastos de capital para su

construcción y operación. Se obtuvo además una reducción en el consumo de energía de aproximadamente el 20 % en comparación con un sistema convencional [31].

#### 2.4 Procesos de desalinización en el resto del mundo

Se ha encontrado que en países como Egipto la desalinización se ha convertido en la mejor solución para enfrentar el problema de escasez de agua potable y por ello, los sistemas instalados generalmente combinan tecnologías, como el uso de la electrodiálisis como pretratamiento, seguido de un proceso de OI. Esta apuesta se convierte en un sistema eficiente, económico y rentable, tal como lo mencionan Abdel-Aal *et al.*, en el 2015 en el que alcanzaron alcanzó una disminución de la concentración de sólidos disueltos totales de agua del Mar Rojo, pasando de 42.070 ppm a 2.177 ppm, con una eficiencia de remoción del 94,8 % cuando se emplea la electrodiálisis y una eficiencia de remoción total de 99,4 % cuando se usa un sistema combinado de electrodiálisis y OI [32].

Otro de los sistemas híbridos empleados en Egipto incluye una dilución del agua cruda que reduce el costo energético de funcionamiento e impide la migración de contaminantes presentes en el agua a través de las membranas. Es decir, un sistema de pretratamiento de osmosis forzada (similar a la OI, pero que no utiliza presión sino sales adecuadas para proporcionar la presión osmótica suficiente para el proceso, como carbonato amónico) y finalmente el proceso de OI [33].

De otro lado, en países como Sudáfrica, donde la escasez de agua es un factor predominante, especialmente en las regiones que se clasifican de semiáridas a áridas del país, el uso de sistemas de desalinización para la obtención de agua dulce cuenta con un reto adicional y es que las redes de las fuentes convencionales de electricidad no están disponibles en muchas zonas rurales del país. Aunque se debe reconocer que se han realizado pocos estudios sobre la combinación de las tecnologías de desalinización con las fuentes de energías renovables, muchas comunidades que no tienen acceso a agua potable están situadas en áreas geográficas con altos niveles de radiación solar anuales y cuentan con fuentes disponibles de agua salada. Por ello, el país ha empezado a enfocar sus investigaciones alrededor de los aspectos antes mencionados [34].

En el noroeste de África, en la ciudad de Khenifra se implementó el primer sistema de desalinización por OI en Marruecos. La planta está diseñada para producir 36.290 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> y está conformada por un pretratamiento compuesto de acidificación, coagulación, floculación y sedimentación, un sistema de filtración en grava y arena, un sistema de OI y una etapa final de remineralización [35].

En países como Estados Unidos, debido al aumento en la demanda de agua y a la incertidumbre en torno a la disponibilidad de agua dulce, brotó el interés por ampliar el uso de las tecnologías de desalinización. El país cuenta con una de las plantas de desalinización más grandes del mundo, ubicada en California; con una capacidad de producir  $190.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  mediante un pretratamiento con filtros multimedia y microfiltración, un sistema de OI conformado por más de 16.000 membranas y un postratamiento de remineralización [36].

Iraq también se puede considerar como un referente en la investigación de tecnologías de desalinización, sus sistemas buscan producir agua potable para el consumo humano y agua para el sector agrícola. Los estudios desarrollados se han enfocado en identificar los factores que afectan la eficiencia del sistema (temperatura del agua de alimentación, presión, salinidad y tasa de recuperación) para obtener una gama de consideraciones a tener en cuenta en el diseño y de esta manera, obtener mejores resultados en términos de calidad, eficiencia y reducción de consumo energético [37].

## 2.5 Aspectos económicos de la desalinización

De manera general, los costos que implica un proceso de desalación se pueden dividir en dos categorías principales. En primer lugar están los costos de capital, que a su vez incluyen las subcategorías de costos de adquisición de terrenos, construcción de instalaciones y proyectos complementarios; en segundo lugar están los costos de operación y mantenimiento, que incluyen costos de energía, mano de obra, reactivos y otros consumibles como membranas y reemplazos de cartuchos, así como los costos asociados al manejo y eliminación de residuos [38].

Sin embargo, los valores varían de un sistema a otro debido a factores como la ubicación, el diseño de las instalaciones, la capacidad de la planta, la tecnología utilizada, los requisitos de calidad del agua y las limitaciones ambientales [39]. Esto implica que la comparación de precios por  $\text{m}^3$  de agua tratada entre sistemas sea un desafío, debido a la falta de criterios comunes para estimar el costo final del agua desalada [40].

En los inicios de la desalinización, aproximadamente en 1850, el costo no era tan relevante, ya que el principal objetivo era producir agua dulce a partir de agua de mar para calderas en barcos. Entre 1960 y 1970, las tecnologías de desalinización regidas por procesos térmicos estaban disponibles para la producción comercial, pero el costo era muy alto. Los procesos de membrana se empezaron a volver competitivos en la década de 1970 y con esto los costos comenzaron a disminuir. Hasta 1975, el precio de desalinización de agua de mar era aproximadamente de US \$ 2,10 /  $\text{m}^3$  [41].

Con la expansión del mercado muchas organizaciones y empresas trabajan continuamente para mejorar las tecnologías y reducir los costos; para la década del 2000, el precio del agua alcanzaba valores de US \$ 0,50 / m<sup>3</sup> para plantas de desalinización de agua de mar por OI a gran escala y por debajo de US \$ 1,00 / m<sup>3</sup> para MED [42].

En el caso del uso de tecnologías de membrana, el costo del tratamiento del agua salobre es siempre más bajo que el del agua de mar, debido principalmente a la menor salinidad del agua de alimentación, que requiere menor presión aplicada y permite mayor recuperación [42]. De acuerdo a una revisión de escala mundial hecha por Pinto y Marques en el 2017, el costo para desalinización que utiliza tecnologías de membrana y fuentes de energía convencionales oscila entre US \$ 0,46 / m<sup>3</sup> - US \$ 2,53 / m<sup>3</sup> para agua de mar y US \$ 0,31 / m<sup>3</sup> - US \$ 0,58 / m<sup>3</sup> para agua salobre, con un promedio mundial de US \$ 1,53 / m<sup>3</sup> mediante MED, y US \$ 0,98 / m<sup>3</sup> mediante CMV [38].

### 3. LA OI COMO MECANISMO EFICIENTE Y VIABLE DE DESALINIZACIÓN

#### 3.1 Generalidades de la OI

La tecnología de OI se fundamenta en el fenómeno natural de ósmosis, proceso químico a través del cual dos soluciones de diferentes concentraciones obtienen el equilibrio cuando se presenta flujo de agua a través de una membrana semipermeable desde la solución diluida hacia la más concentrada. La fuerza responsable de este movimiento se conoce como presión osmótica y está directamente relacionada con la concentración de sales en las soluciones. Si el proceso se invierte forzando la solución a través de la membrana en la dirección opuesta mediante la aplicación de una presión mayor a la osmótica del lado de la solución concentrada, se lleva a cabo la ósmosis inversa. Esta es una forma de obtener agua dulce a partir de una solución de agua salada, el agua del producto es desmineralizada y el agua residual queda más concentrada que la solución original [43].

Los sistemas de OI están compuestos principalmente por los módulos de membranas, bombas de alta presión, central eléctrica y dispositivos de recuperación de energía en algunos casos. El requerimiento energético de una planta de OI depende principalmente de las propiedades de la membrana y de la salinidad del agua de alimentación. Dentro de las ventajas de utilización de estos sistemas destacan: menor consumo de energía en comparación con otros procesos de desalinización, bajos costos de inversión a bajas capacidades, facilidad de operación, flexibilidad en el aumento de la capacidad de tratamiento, tamaño compacto y facilidad para adaptarse a fuentes de energía renovables [44].

El rendimiento de las membranas de OI depende de sus propiedades fisicoquímicas, pero la mayoría de los estudios realizados en este campo se basan en las capas de impurezas o en los cambios de rendimiento debido al ensuciamiento y no en los cambios físicos de la membrana [45].

### 3.2 El pretratamiento en los procesos de desalinización con OI

El pretratamiento cumple una función fundamental en los procesos de OI, debido a que permite eliminar componentes del agua de alimentación dentro de los que se encuentran sedimentos y bacterias, que, de paso podrían obstaculizar las membranas. Con el rápido crecimiento de la demanda de sistemas de desalinización por OI, ha sido necesaria la búsqueda de soluciones rentables de pretratamiento a gran escala, en las cuales muchas de las mejoras en el pretratamiento se han dado gracias a la comprensión de los procesos de ensuciamiento [46]. Un pretratamiento deficiente puede generar entre otros, un aumento en la presión de alimentación del sistema y por lo tanto mayor consumo de energía, reducción en el flujo permeado, aumento en costos por productos químicos para la limpieza y requerimientos frecuentes de cambio de membrana [47].

Con base en lo anterior, se puede mencionar que como pretratamientos en sistemas de desalinización se han obtenido buenos resultados con la electrocoagulación (EC) como reemplazo para los pretratamientos convencionales tales como coagulación química, cloración y aplicación de antiincrustantes. Los resultados experimentales destacan la EC como método de tratamiento eficaz para mitigar el ensuciamiento orgánico potencial y la contaminación biológica en membranas de OI, con porcentajes de remoción del 57,5 % del carbono orgánico disuelto, 10 % de la dureza y alto nivel de desinfección, en agua de mar en comparación con otros tipos de agua debido a su alta conductividad, lo que mejoraría el efecto del campo eléctrico sobre la muerte celular [48].

Las tecnologías de membrana han demostrado ser más rentables y eficientes para eliminar partículas, con tamaño de poro mayor al de la membrana, en comparación con las tecnologías de pretratamiento convencionales. La UF ha sido ampliamente estudiada, principalmente en España, en el marco del proyecto LIFE+Uftec (que propone la sustitución del pretratamiento convencional en la potabilización de las aguas superficiales por la UF directa, lo que demuestra su eficiencia técnica, ambiental y económica) desarrollado en Barcelona entre 2010 y 2013. Con este se buscaba evaluar la viabilidad y posterior optimización de las condiciones de operación de una planta piloto de UF y OI para tratar el agua procedente del río Llobregat. Se concluyó que la UF como etapa de pretratamiento a procesos de OI en plantas potabilizadoras es una alternativa viable y eficiente para el tratamiento de aguas superficiales, sin necesidad de un tratamiento químico previo [49].

Destaca también el estudio realizado por Monnot y colaboradores en el 2017, en el que evaluaron el uso de pretratamientos en procesos de desalinización y demostraron que es indispensable realizar un pretratamiento que garantice el éxito del proceso de desalinización. Asimismo, con el acoplamiento de un filtro de carbón activado granular y una etapa de UF como pretratamientos en una planta de OI de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , lograron una remoción hasta del 80 % del carbono orgánico disuelto y remoción de bacterias, sin evidenciar ensuciamiento en las membranas y con una tasa de recuperación en OI del 70 %, lo cual además arrojó una disminución en el consumo energético [50].

## 4. DESAFÍOS FUTUROS EN EL CAMPO DE LA DESALINIZACIÓN

### 4.1 Reducción de la energía del proceso, uso de energías renovables

Las condiciones de funcionamiento de las membranas influyen directamente en los gastos energéticos, ya que se ha encontrado una fuerte correlación lineal entre la presión de funcionamiento, el flujo de agua, la concentración de sales, la temperatura del agua de alimentación y el consumo de energía, que dejan ver la importancia de estudiar el comportamiento de la membrana [51]. Con base en lo anterior, destaca una investigación en la que se evaluó el análisis de permeabilidad-selectividad mediante modelos que incluyen la distribución de tamaños de poro y las relaciones de aspecto en las membranas, como una herramienta útil para la evaluación del rendimiento de las membranas [52].

De otro lado, el aumento exponencial de la población, la contaminación de las fuentes de agua dulce y el cambio climático son algunos de los responsables de la escasez de agua potable y de la búsqueda de alternativas para suplir la necesidad de agua dulce, como la desalinización. Se requiere una gran cantidad de energía para el proceso de desalinización, la cual se deriva actualmente y en gran medida de los combustibles fósiles, los cuales se agotan día a día y contaminan el medio ambiente debido a las emisiones de  $\text{CO}_2$  [53].

Las metas fundamentales para la desalinización a futuro incluyen la reducción en la cantidad de energía necesaria y en el uso de productos químicos, así como la disminución del costo total del agua para el consumidor [42].

### 4.2 Desarrollo de nuevos materiales para las membranas

A pesar de los avances en las tecnologías de membrana, las poliméricas actualmente disponibles están limitadas por el intercambio entre el flujo de agua y la selectividad. Investigaciones en Corea apuntan a la modificación de membranas con el propósito de obtener mayor flujo de agua, mayor rechazo de sales y mejor resistencia al

ensuciamiento, que redunde en costos de capital y de energía en la desalinización. Uno de los proyectos desarrollados preparó membranas de OI hechas de polisulfato con grupos amino (aPES) y sílice incrustados con poliamida aromática hiperrramificada (HBP-g-silica), los cuales permitieron un rechazo de sales del 96 %, lo que evidencia que las modificaciones ayudaron a mejorar la permeabilidad al agua, protegieron la capa activa de la degradación y aumentaron la resistencia al cloro de la membrana [54].

Para alcanzar un suministro de agua sostenible a futuro se requieren también membranas con alto flujo, selectividad, resistencia a incrustaciones y estabilidad con costos mínimos. Es necesario el uso de materiales innovadores para las membranas y sistemas híbridos (procesos de desalinización más energías renovables) que ayuden a ahorrar energía y proteger el medio ambiente [10].

### 4.3 Optimización de la limpieza de las membranas

El ensuciamiento es uno de los mayores desafíos en los procesos de membrana; niveles mínimos de ensuciamiento se ven reflejados en una mayor productividad del agua, mayor vida útil de la membrana, requerimientos menores de limpieza y reducción de costos operativos y capital. Según los estudios mencionados por Le y Nunes [55], la modificación de la estructura química (grupos funcionales, carga y afinidad por el agua) y la morfología de las membranas es potencialmente la solución más sostenible para evitar el ensuciamiento, ya que una alta afinidad por el agua, carga superficial negativa y baja rugosidad superficial harán la membrana menos propensa a la incrustación o ensuciamiento.

En términos de mantenimiento para mejorar el rendimiento, la limpieza química en membranas de OI compuestas por una etapa ácida seguida por una alcalina, pueden permitir un aumento promedio del 12,6 % del flujo permeado [56]. Se ha encontrado también que la impregnación con metales (plata y platino) de las membranas de NF, permite mayor eficiencia en remoción y un ahorro energético hasta del 75 % [57].

De manera general, para las membranas de MF y NF la estrategia más comúnmente usada para combatir el ensuciamiento ha sido la fabricación de membranas hidrofílicas mediante la modificación de los polímeros de las membranas, uso de agentes hidrófilos y recubrimiento de la superficie de la membrana con polímeros hidrófilos. Aunque estas técnicas han logrado minimizar el ensuciamiento, han dado lugar a efectos indeseables como la disminución en el tamaño del poro y hasta el bloqueo de los mismos, o el aumento en su tamaño que reduce el rechazo de sales, acompañado por la disminución de la vida útil de la membrana [58].

#### 4.4 Optimización de los pretratamientos

El pretratamiento desempeña un papel crítico en los procesos de membrana, pues es necesaria la eliminación de los componentes del agua de abastecimiento como microorganismos o materia orgánica suspendida, que puedan generar incrustaciones o ensuciamiento en las membranas, y por lo tanto la disminución de su vida útil. El rápido crecimiento de la industria de tecnologías como la OI ha impulsado la búsqueda de soluciones de pretratamiento a gran escala rentables; algunos de las tecnologías de pretratamiento más usadas en los últimos diez años incluyen la UF y MF como los más populares para sistemas de OI, y la coagulación/floculación, no solo para OI, sino también para NF y otras tecnologías que involucran membranas [59].

La desinfección ha sido catalogada como un método importante de pretratamiento gracias a que permite la destrucción de microorganismos que pueden causar enfermedades y problemas de bioincrustación en las membranas; entre los desinfectantes comúnmente usados (cloro libre, cloraminas, ozono, ultravioleta, etc) el ozono ha sido el más beneficioso para el posterior tratamiento con OI, ya que el ozono residual no es un gran problema como el cloro residual [60]. Con respecto al método de coagulación/ floculación, se ha encontrado que el uso de cloruro férrico como coagulante permite la remoción de materia orgánica algácea en agua de mar y por lo tanto, la reducción del potencial de ensuciamiento de la membrana [61]. Por otro lado, se concluyó que la EC presenta un alto potencial para reducir el ensuciamiento orgánico gracias a su capacidad para reducir la materia orgánica disuelta y los microorganismos del agua [48].

Se debe apostar además por la continua evolución de los sistemas de pretratamiento que mejoren la prevención de la contaminación biológica y la proliferación de algas. El fortalecimiento en las relaciones entre industria, academia y centros de investigación puede acelerar el avance y facilitar el alcance de los objetivos [46].

## CONCLUSIONES

Las altas presiones por el recurso, las problemáticas ambientales y la escasez de agua dulce en muchas poblaciones del mundo, obligan a realizar tratamientos avanzados a las aguas saladas y salobres mediante el uso de membranas de OI y NF. Estos tratamientos han permitido el acceso al agua potable a pequeños y a grandes núcleos poblacionales.

La principal limitación de los sistemas de desalinización con membranas tiene que ver con los altos costos operativos asociados al consumo energético. Por lo tanto, es importante realizar investigaciones que apunten a integrar las energías alternativas (eólica, solar, undimotriz, entre otras) que reduzcan efectivamente estos costos.

El gran desafío que hoy tienen los fabricantes de membranas es generar nuevos materiales que permitan superar las limitaciones asociadas a los bajos flujos de agua tratada, los problemas de ensuciamiento frecuente y la selectividad. Con el desarrollo de investigaciones sobre esta temática se logrará una reducción de costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas de desalinización.

La articulación entre la empresa, el Estado y la academia permitirá generar nuevo conocimiento que apunte a la optimización de esta tecnología y a superar los retos y limitaciones que actualmente tienen los sistemas de desalinización por membranas.

## REFERENCIAS

- [1] G. E. Dévora-Isiordia, R. González-Enríquez y S. Ruiz-Cruz, "Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México," *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 4, n.º 3, pp. 27-46, 2013.
- [2] K. Wong y C. Pecora, "Recommendations for Energy–Water–Food Nexus Problems," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 137, n.º 3, pp. 1-5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4028139>
- [3] M. M. Morad, H. A. M. El-maghawry y K. I. Wasfy, "A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity," *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 20-29, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002>
- [4] M. Frankel, *Facilities Site Piping Systems Handbook*. New York: McGraw-Hill Education, 2012.
- [5] A. Alkaisi, R. Mossad y A. Sharifian-barforoush, "A review of the water desalination systems integrated with renewable energy," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 268-274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>
- [6] AWWA, *Water Treatment Plant Design*, 5º ed., New York: The McGraw-Hill Companies, 2012.
- [7] D. Mackenzie, *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. New York: McGraw-Hill Education, 2010.
- [8] L. Weinrich, M. LeChevallier y C. N. Haas, "Contribution of assimilable organic carbon to biological fouling in seawater reverse osmosis membrane treatment," *Water Res.*, vol. 101, pp. 203-213, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.075>
- [9] M. Ben-Sasson, X. Lu, S. Nejati, H. Jaramillo y M. Elimelech, "In situ surface functionalization of reverse osmosis membranes with biocidal copper nanoparticles," *Desalination*, vol. 388, pp. 1-8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.005>
- [10] M. Wakil, M. Burhan, L. Ang, y K. Choon, "Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability," *Desalination*, vol. 413, pp. 52-64, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>
- [11] M. Chandrashekhara y A. Yadav, "Water desalination system using solar heat : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1308-1330, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.058>

- [12] D. M. Sandoval Corro, "Procedimientos para el control químico del sistema de tratamiento de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde por ósmosis inversa," Proyecto final de pregrado, Universidad Veracruzana, Veracruz, México, 2014.
- [13] F. Muñoz y L. A. Becerril, "Low-capacity Reverse Osmosis Solar Desalination Plant," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 2787-2793, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.311>
- [14] A. L. Rocha Neves, M. Pereira Alves, C. Feitosa de Lacerda y H. Raj Gheyi, "Aspectos socioambientais e qualidade da água de dessalinizadores nas comunidades rurais de Pentecoste-CE," *Rev. Ambient. e Agua*, vol. 12, n.º 1, pp. 124-135, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1722>
- [15] V. B. Brião *et al.*, "Reverse osmosis for desalination of water from the Guarani Aquifer System to produce drinking water in southern Brazil," *Desalination*, vol. 344, pp. 402-411, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.04.008>
- [16] T. D. J. R. López, D. Lafargue Verdecia, O. González Díaz y E. Medina Correa, "Uso de ósmosis inversa en el hotel Breezes Jibacoa para la desalación de agua de consumo," *Ing. Hidráulica y Ambient.*, vol. XXXVI, n.º 3, pp. 112-125, 2015.
- [17] "RWL Water awarded SWRO desalination contract in Argentina," *Pump Industry Analyst*, vol. 51, p. 4, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6128\(14\)70432-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6128(14)70432-X)
- [18] L. Greenlee, D. Lawler, B. Freeman, B. Marrot y P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges," *Water Res.*, vol. 43, pp. 2317-2348, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>
- [19] M. Molinos y D. González, "Evaluation of the economics of desalination by integrating greenhouse gas emission costs: An empiric application for Chile," *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 1327-1337, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.019>
- [20] Y. Suescun, D. Álvarez, F. Martínez y E. Jiménez, "Propuesta para el aseguramiento de la prestación del servicio de acueducto en el municipio de Manaure, departamento de la Guajira," Proyecto final de especialización, Univ. Católica Colomb., Bogotá, Colombia, 2018.
- [21] C. Alarcón, L. Amaya y O. Díaz, "Análisis comparativo entre acuíferos costeros y plantas desalinizadoras como fuente de suministro para poblaciones con escasez de fuentes hídricas superficiales," Proyecto final de especialización, Univ. Católica Colomb., Bogotá, Colombia, 2015.
- [22] M. E. Coronado, "Diseño e implementación de una planta prototipo automatizada para la potabilización de aguas por el método de osmosis inversa en Ingeaguas S.A.," Proyecto final de pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2013.
- [23] H. March, M. Hernández y D. Saurí, "Percepción de recursos convencionales y no convencionales en áreas sujetas a estrés hídrico: El caso de Alicante," *Rev. Geogr. Norte Gd.*, vol. 60, pp. 153-172, 2015.
- [24] A. Alberti Marti, "Estudio de la viabilidad técnica y económica de la desalinización de agua de mar mediante unidades autónomas de ósmosis inversa," Proyecto final de pregrado, Universitat Politècnica De Catalunya, Barcelona, España, 2015.

- [25] D. Á. Prats, R. A. García y J. V. Alonso, "Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras," *Ing. Mecánica*, vol. 14, n.º 1, pp. 22-30, 2011.
- [26] F. Diogo, A. Santos y M. Azevedo, "Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Market Analysis," Tesis de maestría, Universidad de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
- [27] P. Compain, "Solar energy for water desalination," *Procedia Eng.*, vol. 46, n.º 0, pp. 220-227, 2012.
- [28] G. Nebbia y G. Nebbia Menozzi, "Early experiments on water desalination by freezing," *Desalination*, vol. 5, pp. 49-54, 1968. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80191-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80191-5)
- [29] S. woo Han, W. Kim, Y. Lee, B. M. Jun, and Y. N. Kwon, "Investigation of Hydrate-induced Ice Desalination (HIID) and its application to a pretreatment of reverse osmosis (RO) process," *Desalination*, vol. 395, pp. 8-16, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.023>
- [30] A. Alshegri, S. A. Sharief, S. Rabbani y N. Z. Aitzhan, "Design and Cost Analysis of a Solar Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant for Masdar Institute," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 319-324, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.365>
- [31] N. Kishizawa, K. Tsuzuki y M. Hayatsu, "Low pressure multi-stage RO system developed in ' Mega-ton Water System' for large-scaled SWRO plant," *Desalination*, vol. 368, pp. 81-88, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.045>
- [32] E. A. Abdel-Aal, M. E. Farid, F. S. M. Hassan y A. E. Mohamed, "Desalination of Red Sea water using both electrodialysis and reverse osmosis as complementary methods," *Egypt. J. Pet.*, vol. 24, pp. 71-75, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.02.007>
- [33] H. M. Ali, H. Gadallah, S. S. Ali, R. Sabry y A. G. Gadallah, "Pilot-Scale Investigation of Forward / Reverse Osmosis Hybrid System for Seawater Desalination Using Impaired Water from Steel Industry," *International Journal of Chemical Engineering*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/8745943>
- [34] D. M. Van Tonder, C. Fourie y J. Maree, "Development of a solar desalination plant," *South African J. Geol.*, vol. 119, n.º 1, pp. 39-46, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2113/gssajg.119.1.39>
- [35] H. Boulahfa, B. Sakina, F. Elhannouni, T. Mohamed y E. Azzedine, "Demineralization of brackish surface water by reverse osmosis: The first experience in Morocco," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, n.º 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102937>
- [36] R. Prakash *et al.*, "Energy considerations associated with increased adoption of seawater desalination in the United States," *Desalination*, vol. 445, pp. 213-224, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.08.014>
- [37] M. Sarai Atab, A. J. Smallbone y A. P. Roskilly, "An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation," *Desalination*, vol. 397, pp. 174-184, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.020>
- [38] F. S. Pinto y R. C. Marques, "Desalination projects economic feasibility : A standardization of cost determinants," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 904-915, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.024>

- [39] E. Lapuente, "Full cost in desalination . A case study of the Segura River Basin," *DES*, vol. 300, pp. 40-45, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.06.002>
- [40] R. Semiat, "Desalination: present and future," *Int. Water Resour. Assoc. Water Int*, vol. 25, pp. 54-65, 2000.
- [41] K. V Reddy y N. Ghaffour, "Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies," *Desalination*, vol. 205, n.º 1-3, pp. 340-353, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.558>
- [42] T. M. Missimer, N. Ghaffour, A. H. A. Dehwah, R. Rachman, R. G. Maliva y G. Amy, "Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics," *Desalination*, vol. 322, pp. 37-51, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.021>
- [43] R. Duncan C., *Plant Equipment and Maintenance Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [44] M. A. Alghoul *et al.*, "Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system," *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 101-114, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.015>
- [45] T. Suzuki *et al.*, "Relationship between performance deterioration of a polyamide reverse osmosis membrane used in a seawater desalination plant and changes in its physicochemical properties," *Water Res.*, vol. 100, pp. 326-336, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.068>
- [46] L. Henthorne y B. Boysen, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment," *Desalination*, vol. 356, pp. 129-139, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.039>
- [47] M. Raulio, R. Juvonen, H. L. Alakomi, J. Ekman, M. Hesampour y T. Lundin, "Characterisation of (bio)fouling on used reverse osmosis membranes," *Procedia Eng.*, vol. 44, pp. 931-933, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.626>
- [48] J. N. Hakizimana *et al.*, "Assessment of hardness, microorganism and organic matter removal from seawater by electrocoagulation as a pretreatment of desalination by reverse osmosis," *Desalination*, vol. 393, pp. 90-101, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.025>
- [49] V. García Molina *et al.*, "Estudio de viabilidad y mejora de esquemas integrados de ultrafiltración y ósmosis inversa para la producción de agua potable a partir de agua superficial," *Tecnoaqua*, vol. 8, pp. 42-46, 2014.
- [50] M. Monnot, H. T. K. Nguyễn, S. Laborie y C. Cabassud, "Seawater reverse osmosis desalination plant at community-scale: Role of an innovative pretreatment on process performances and intensification," *Chem. Eng. Process.*, vol. 113, pp. 42-55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.020>
- [51] T. Zhou, Z. Wang y W. Li, "A cost model approach for RO water treatment of power plant," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 11, pp. 581-588, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.091>

- [52] M. U. Siddiqui, A. F. M. Arif y S. Bashmal, "Permeability-selectivity analysis of microfiltration and ultrafiltration membranes: Effect of pore size and shape distribution and membrane stretching," *Membranes (Basel)*, vol. 6, pp. 1-14, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes6030040>
- [53] S. Manju y N. Sagar, "Renewable energy integrated desalination: A sustainable solution to overcome future fresh-water scarcity in India," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 594-609, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.164>
- [54] S. G. Kim, J. H. Chun, B. H. Chun y S. H. Kim, "Preparation, characterization and performance of poly(ethylene ether sulfone)/modified silica nanocomposite reverse osmosis membrane for seawater desalination," *Desalination*, vol. 325, pp. 76-83, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.017>
- [55] N. L. Le y S. P. Nunes, "Materials and membrane technologies for water and energy sustainability," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 7, pp. 1-28, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.02.001>
- [56] N. C. Martins, "Estudo de Limpeza Quimica em Membranas de Osmose Inversa," Proyecto final de pregrado, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2012.
- [57] C. B. Bonilla Suárez, "Desmineralización de agua de mar mediante membranas cerámicas modificadas," Universidad Autónoma de Querétaro, 2011.
- [58] V. C. J. Mansouri, S. Harrisson, "Strategies for controlling biofouling in membrane filtration systems: challenges and opportunities," *J. Mater. Chem.*, vol. 20, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1039/B926440J>
- [59] S. Jiang, Y. Li y B. P. Ladewig, "A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies," *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 567-583, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.235>
- [60] S. Lee, O. M., Kim, H. Y. Park, W. Kim y T. H. Yu, "A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 295, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.016>
- [61] M. Alizadeh Tabatabai, S. A. Schippers y J. C. Kennedy, "Effect of coagulation on fouling potential and removal of algal organic matter in ultrafiltration pretreatment to seawater reverse osmosis," *Water Res.*, vol. 59, pp. 283-294, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.04.001>