

**Revisión de las técnicas de desalinización de agua con
perspectiva de optimizar requerimiento de energía**
**Review of water desalination techniques towards an
energy saving approach**

Armando G. Canales¹

Elisabet V. Wehncke², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4650-9825>

Napoleon Gudino-Elizondo^{3, 4}, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2867-9559>

¹Consultor independiente, México, agcanales@live.com.mx

²Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIBYC),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México,
lizwehncke@gmail.com

³Department of Civil and Environmental Engineering, University of
California, Irvine, USA, ngudinoe@uci.edu

⁴ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de
Baja California, Ensenada, México, ngudino@uabc.edu.mx

Autor para correspondencia: Armando G. Canales,
agcanales@live.com.mx

Resumen

Como una contribución al cuidado de “nuestra casa común”, en consonancia con los objetivos de desarrollo sostenible relativos al agua y la energía, que buscan reducir la emisión de gases de efecto invernadero y el requerimiento excesivo de energía, incluyendo la energía convencional y la derivada de energías verdes o alternativas, a continuación se revisarán los avances tecnológicos que están ocurriendo en el proceso de desalinización de agua en el ámbito internacional. Partiendo de la técnica de ósmosis inversa, se presentan algunos aspectos del panorama futuro en cuanto al desarrollo de las membranas y las nuevas tecnologías hacia el uso sostenible y obtención de la energía. Se plantea la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos en su relación con la temperatura. Se revisaron los avances de algunos dispositivos y materiales para captación, concentración y transformación de la radiación solar. Con información sobre la capacidad de obtención de agua desalinizada de algunas de las plantas más grandes en el mundo y la energía que se requiere en todo el proceso, se presenta la evolución y metas en el corto, mediano y largo plazo, expresadas en unidades de energía necesaria por unidad de volumen desalinizado, lo que se relaciona con un proyecto en proceso en el noroeste de México. Esta revisión pretende promover el desarrollo de estas tecnologías y su aplicación en el proceso de desalinización de agua en México.

Palabras clave: plantas desalinizadoras, ósmosis inversa, mejoras tecnológicas, requerimientos de energía convencional y/o limpia.

Abstract

As a contribution to the care of "our common home", in line with the sustainable development objectives related to water and energy, which seek to reduce the emission of greenhouse gases and the excessive requirement of energy, including both the conventional and green or alternative energy, we revised technological improvements occurring in water desalination process at international levels. Starting from the reverse osmosis technique, some aspects of future scenarios are presented regarding to the development of membranes and new technologies to obtain and use sustainable energy. We present the efficiency of photovoltaic solar panels and their relationship with temperature. We also revised the progress of some devices and materials for capture, concentration and transformation of solar radiation. Based on the information gathered regarding the capacity of fresh water production and the energy required in the whole process of some of the largest plants in the world we present the evolution as well as the short, medium and long term goals, expressed in terms of energy requirements by unit of desalinated water volume, which is related to an ongoing project in the Northwest of Mexico. This review aims to promote the development of these technologies and their application in the water desalination process in Mexico.

Keywords: Desalination plants, reverse osmosis, technological improvements, energy requirements.

Recibido: 09/07/2018

Aceptado: 12/10/2019

Introducción y objetivo

Como una contribución al cuidado de “nuestra casa común”, en consonancia con los objetivos de desarrollo sostenible relativos al agua y la energía, y aquellos que contribuyan a reducir las problemáticas sociales en torno al agua y la pobreza (Figura 1), en este trabajo se resumen los cambios tecnológicos que están ocurriendo en el proceso de desalinización del agua, considerando la reducción en la producción de gases invernadero y en el requerimiento de energía, no sólo la convencional, sino también la de menor impacto ambiental o sostenible.



Figura 1. Marzo 22, 2012: una niña captura agua turbia de una

excavación cercana a un pozo que se ha secado en Jamam, South Sudan. Fuente: Hannah McNeish/AFP (Sim, 2015).

Asimismo, y con el fin de motivar la aplicación de los avances tecnológicos que redundan en un menor requerimiento de energía para el proceso de desalinización de las plantas que se proyectan, construyen y operan en México, se presentan las experiencias que están teniendo lugar en distintas partes del mundo.

Revisión bibliográfica

Los objetivos del desarrollo sostenible SDG (por sus siglas en inglés) que se presentaron en la Asamblea de la Organización de Naciones Unidas (ONU, 2015), con énfasis en los objetivos directamente relacionados con el agua (6. *Clean water and sanitation*) y la energía (7. *Affordable and clean energy*), así como de la urgencia de atender a los sectores más pobres, constituyen el marco en el que se elaboró este trabajo.

Se planteó una propuesta para alimentar una planta desalinizadora con doble barrera de pozos de bombeo que, localizada mediante el modelo Seawat, que aplicaron Canales, Islas y Velázquez (2016), y con fundamento en otras investigaciones, tuviera el doble propósito de abastecer de agua potable a las poblaciones de Guaymas y Empalme,

Sonora, México, y proteger al acuífero del Valle de Boca Abierta, Sonora, contra el avance de la intrusión salina. Además, esto también propone un ahorro de energía al utilizar el agua salobre de los pozos con menor concentración salina, en lugar del agua salada del mar. En esta descripción aún no se tomaba en cuenta el aprovechamiento de la energía solar que el sistema híbrido de alta eficiencia y elevada concentración fotovoltaica térmica ofrece ya en escala de laboratorio.

En cuanto a la aplicación de energía solar, mediante celdas fotovoltaicas para el proceso de desalinización (Figura 2) se tienen varias referencias internacionales que demuestran la factibilidad de su uso. Por un lado, Fthenakis, Atia, Morin, Bkayrat y Sinha (2015) presentan experiencias que se tienen en Arabia Saudita y, por el otro, Zimmermann *et al.* (2015) describen un sistema híbrido de alta eficiencia y concentración fotovoltaica térmica (HCPVT).



Figura 2. .Planta desalinizadora con energía solar en Kenia suministra agua potable para 25,000 habitantes diariamente.PSC Solar UK (2019).

En la actualidad, IBM, con el sistema de alta concentración fotovoltaica térmica (HCPVT) (Figura 3), puede lograr 90 °C para operar el proceso de destilación con membranas, con el cual tiene la capacidad de obtener de 30 a 40 litros diarios por cada m² de área de recepción.



Figura 3. Investigación IBM. Sistema de alta concentración fotovoltaica térmica (HCPVT). Fuente: Williams (2013).

Para Sommariva (2017), el principal problema encontrado en la aplicación de los avances de este proceso presentados por Williams (2013), se relaciona con cerrar la brecha entre investigación y desarrollo, así como la comercialización de tales conceptos. Sommariva (2017) sintetiza y proyecta los volúmenes de desalinización desde el año 2000 al presente, y realiza una predicción hasta 2020, donde también menciona

algunos costos. La escasez de agua no es sólo un fenómeno limitado al Medio Oriente y se tienen varios proyectos de gran escala de desalinización en otras partes del mundo, como en el norte de África y sur de Asia, como es el caso de Saudí-Arabia, Medio Oriente e Israel, además del sur de California en Norteamérica.

Como se muestra en la Tabla 1, los volúmenes de desalinización se han duplicado desde el 2000 hasta el 2008, y se espera se tripliquen para el año 2020, reflejando una tasa de crecimiento anual compuesta de 8%. Como el estrés hídrico se incrementa y el uso de la desalinización se expande fuera de las áreas que recientemente la han adoptado, como el Oriente Medio, se pronostica que los volúmenes de agua desalinizada alcanzarán $54 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ en 2020.

Tabla 1. Volúmenes de desalinización en el mundo. Sommariva (2017).

Año	2000	2008	2020
Volúmenes anuales desalinizados en miles de millones (m^3)	9.8	18.1	54

La desalinización se usa ahora en más de 120 países alrededor del mundo. Varios proyectos a gran escala han demostrado durante los últimos 30 años que es técnicamente factible generar grandes volúmenes de agua de pureza aceptable a través de la desalinización del agua de mar, de agua salobre y de reúso del agua (Sommariva, 2017).

El mismo autor menciona que en el pasado el costo de desalinizar agua de mar estaba por debajo de $0.50 \text{ USD}/\text{m}^3$ en muchos proyectos,

sin embargo debido al incremento de los costos de los materiales, el costo total de desalinización se ha incrementado subsecuentemente a 1-1.5 USD/m³.

Shahzad, Burhan, Ang y Ng (2017) presentaron los avances y el estado del arte en los nexos agua-energía-medio ambiente, fundamento de la sostenibilidad de la desalinización futura. El proceso de tratamiento en la desalinización es el mayor consumidor de energía, alrededor de 0.4% del total de electricidad (75.2×10^9 kWh/año en 2016) y es la mayor fuente de emisiones CO₂ por combustibles fósiles. Mejorar la eficiencia de las dos grandes fuentes, agua y energía es importante para controlar dicha emisión y proteger el ambiente.

Las plantas de energía con concentración solar (CSP, por sus siglas en inglés) representan una solución prometedora para muchos países de la región Medio Oriente y norte de África (MENA, por sus siglas en inglés) (Atanosovska, 2016). En 2014, se tenían alrededor de 2 800 plantas desalinizadoras en MENA que suministraban 27×10^6 m³/día, esto es un promedio de 10 000 m³/día en cada planta. Argelia tenía ese año una de las plantas más grandes en la región, que suministraba 500 000 m³/día.

De acuerdo con la misma autora, los proyectos CSP en vías de realizarse, también en 2014, según la Asociación de la Industria Solar para el Medio Oriente alcanzaron un récord de 294 MW de capacidad. Marruecos tenía una planta de energía solar masiva en Uarzazat. En Tunisia, para el año 2012, se construyó una planta solar en TuNur; mientras que en Qatar se lanzaba el proyecto de una desalinizadora de bajo consumo de energía.

En la actualidad, mundialmente, en cuanto al empleo de energía e impacto ambiental relacionados con la desalinización, los procesos de ósmosis inversa (OI) están dominando el mercado para agua salobre y en el periodo de 2005 a 2008 mostraron una tendencia de crecimiento en el suministro de 2.0 a 3.5 millones de m³/día.

Los procesos para desalinizar el agua globalmente aportaron en 2016, 76 x 10⁶ toneladas de CO₂ (0.2% de la emisión total de 36 100 x 10⁶ toneladas/año), estimando para 2040, emisiones de 218 x 10⁶ toneladas de CO₂. Para tener una idea de lo que esto significa, el autor menciona que se han utilizado 2/3 de la reducción requerida para mantener el incremento de temperatura global por debajo de los 2 °C, objetivo de la COP 21 y que el tercio restante se agotaría en 2050. Sachs (2014) complementa que las emisiones de CO₂ mencionadas dan lugar a un aumento anual de concentración de este gas en la atmósfera de 2 ppm. En los últimos 150 años se tuvo un incremento de 280 a 400 ppm, de modo que si en 25 años sube a 450 ppm, se tendría un planeta con 2 °C más que antes de la Revolución Industrial, con las consecuencias de eventos extremos como los meteorológicos ya evidentes, y el deterioro de los ecosistemas terrestres y marinos.

Requerimientos de energía e innovaciones tecnológicas en el proceso de desalinización

Para los futuros abastecimientos de agua en zonas áridas y semiáridas de la Tierra, la mejor elección será aquella que involucre procesos de desalinización de alta eficiencia, integrados con fuentes de energía renovable. Esto equivale a acoplar las tecnologías de desalinización con las fuentes de energía renovable, con tres grandes beneficios futuros para el mundo: sostenibilidad ambiental, suministro de agua dulce y abastecimiento de energía.

Para lograr el objetivo de suministro futuro sostenible de agua se requieren membranas de flujo elevado, selectivas, resistentes a la colmatación, estables, de mínimo costo y sin defectos de manufactura. La variedad de materiales eficientes que se han propuesto para mejorar el funcionamiento de las membranas basadas en cerámica y polímeros (de las que Shahzad *et al.* (2017) citan varios ejemplos y complementan la información con las de mejor funcionamiento) son las membranas bioinspiradas, que se detallan a continuación.

Las membranas con base de cerámica y polímeros convencionales que se utilizan en el proceso OI, actualmente consumen de 3 a 5 kWh/m³. Impulsadas por el objetivo del suministro sostenible de agua, se requiere mejorar su funcionamiento con materiales más eficientes, como cerámica cubierta con nano-partículas (nano = 10⁻⁹, *Diccionario de la Real Academia Española*) catalíticas; zeolíticas; nanocompuestas inorgánicas-orgánicas; o las bioinspiradas, que incluyen polímero-proteína biomiméticas; block copolímero isoporosa, y las nanotubo alineadas. Las bioinspiradas son las de mejor funcionamiento, pero aún alejadas unos 5 a 10 años de investigación para su disponibilidad comercial. Sin embargo, las membranas nanocompuestas con mejoras significativas ya están disponibles de manera comercial.

En cuanto al proceso de desalinización, los procesos de ósmosis inversa (OI) son prometedores, pues se espera que se refuercen en el futuro por el desarrollo de alta eficiencia del aquaporin y grafeno en las membranas. Aquaporin, propuesto por Agre, Sasaki y Chrispeels (citados en Shahzad *et al.*, 2017), es un elemento que controla el flujo a través de las membranas biológicas con canales-proteína. La membrana de OI cubierta con 75% de aquaporin aumenta en un orden de magnitud la permeabilidad de las membranas comercialmente disponibles; sin embargo, no se ha aplicado de manera masiva debido a la dificultad en lograr producir grandes áreas de proteínas. No obstante, existe el potencial para incorporar aquaporin biológico en las membranas de OI en el futuro, por lo que se requiere mayor investigación para optimizar la formación de estructuras biológicas en términos de selección, robustez, costo de material, escalabilidad y, en el proceso de OI, consumo de energía específica a menos de 2 kWh/m². El autor concluye que los procesos de desalinización híbridos térmicos pueden alcanzar entre 20 y 25% de eficiencia, con 1 o 2 años de experiencia, lo cual sería sostenible y con lo antes expuesto se ahorraría energía, protegería el ambiente y estaría acorde con los objetivos de la COP21.

Amy *et al.* (2017) exploran en su artículo el estado del arte en la práctica de la desalinización de agua de mar, con énfasis en tecnologías que se basan en membranas, mientras se identifican futuras oportunidades en mejoras por etapas de tecnologías convencionales, y el desarrollo de tecnologías emergentes y potencialmente fuera de las tendencias, a través de los avances en las ciencias de los materiales, los procesos de ingeniería y los sistemas de integración. En este artículo, la OI para agua de mar se toma como la tecnología de partida. La discusión

va más allá de los procesos de desalinización en membranas que se basan en procesos energéticos de producción con gradientes de salinidad. El panorama futuro de las membranas para desalinización y energía con gradientes salinos se proyecta para incluir membranas OI de hiper-elevada permeabilidad, energía renovable para desalinización y procesos emergentes, incluidos circuitos cerrados OI, membranas de destilación, ósmosis a futuro, presión en ósmosis retardada y electrodiálisis inversa, de acuerdo con varios nichos de aplicación y/o combinados (híbridos), que operan de forma separada o en conjunto con OI.

Ante el problema de salinidad variable por captación de agua salobre en barreras de bombeo con pozos playeros para protección contra la intrusión salina, es necesario considerar que los cambios de presión y número de membranas en la ósmosis inversa, así como la disminución de la eficiencia de las bombas de alimentación para absorber los cambios de salinidad son cuestiones que tienen que ver con el costo que al final repercute en el usuario.

Por otro lado, Raval y Maiti (2016), resumen su artículo destacando que la eficiencia eléctrica del panel solar fotovoltaico (PV) disminuye con el incremento de su temperatura y, por lo tanto, la transferencia de calor desde el panel es muy importante. Capitalizar el calor transferido para algún propósito útil es de primera importancia, pues el panel solar (PV) tiene una eficiencia de conversión de sólo 5 a 17% y, en consecuencia, gran parte de la radiación solar permanece inutilizada. Este artículo plantea el control de la temperatura del panel solar PV al mencionar la posibilidad de establecer contacto directo del cambiador de calor con el agua de alimentación que fluye hacia el sistema de ósmosis inversa (OI)

desde el extremo superior del panel, recuperando así la energía junto con un mejor funcionamiento del panel PV. Asimismo, el sistema de OI a mayor temperatura resulta en mejor flujo en la membrana. Además, la modificación de la morfología de la membrana mediante el control del tratamiento con hipoclorito de sodio incrementa la eficiencia del flujo al aumentar la capacidad de mezclarse, disolverse o humedecerse de la membrana, como evidencia se tiene la declinación del ángulo de contacto de 48.05 a 26.22°. Así, dos técnicas —el control de la temperatura del panel PV y de la transferencia de calor— y el ajuste de la morfología de la membrana hacia el aumento de la capacidad mencionada, ayudaron a mejorar de modo significativo la permeabilidad en el flujo del sistema de OI y en el funcionamiento eléctrico del panel PV. Como resultado, el total de la energía consumida por OI se ha reducido en un 40%. Este novedoso planteamiento abre los cauces para reducir de modo considerable el consumo de energía de los sistemas OI para aguas salobres.

Las investigaciones en tecnologías “híbridas”, intenso espectro luminoso concentrado fotovoltaico/térmico SBS, CPVT (por sus siglas en inglés) habiéndose iniciado en la década de 1980, fueron mejorando hasta la completa utilización de la irradiación solar del total de su espectro usando celdas fotovoltaicas (PV) y absorbentes térmicos. Diferentes intentos SBS se emplearon para conseguir mejores eficiencias de conversión, incluyendo varios tipos de filtros. Xing *et al.* (2017) y Feng, Zheng, Wang y Ma (2016), con base en el principio óptico de refracción, calcularon las dimensiones de cada elemento de la lente Fresnel. Se hizo una simulación óptica para obtener la eficiencia óptima del concentrador; al mismo tiempo, Widyolara *et al.* (2017) diseñaron,

simularon y probaron un novedoso colector solar híbrido fotovoltaico-térmico (PV/T). El sistema PV/T emplea un concentrador parabólico compuesto (CPC) no reflejante para enfocar la luz solar hacia un receptor con batería de alta concentración de la unión simple arsénico-galio, celdas solares que al mismo tiempo generan electricidad y potencia térmica de alta temperatura. Finalmente, Srivastava (2017) presenta en su artículo los análisis térmicos y eléctricos lineales-parabólicos a través de un sistema colector concentrador fotovoltaico (CPV) bajo diferentes condiciones de diseño y operación. Un colector parabólico compuesto (CPC) fue incorporado como reflector secundario para homogenizar el flujo. A continuación se presenta un ejemplo mundial de suministro de agua y potencia requerida, así como una serie comparativa de la energía requerida por unidad del agua obtenida por los sistemas de desalinización.

Resultados

Se presenta el uso de energía para los casos seleccionados, referidos a la unidad del volumen de agua desalinizada que se obtiene: la planta desalinizadora Ras Al Khair (2014) fue construida de 2011 a 2014 y tiene capacidad para aportar $728 \times 10^3 \text{ m}^3$ diarios ($8.5 \text{ m}^3/\text{s}$) de agua desalinizada para la población. El proyecto cuenta con la infraestructura

para 2 650 MW para una planta con potencia de ciclo combinado en segunda fase, que comprenderá *blocks* de cinco turbinas de gas de ciclo combinado (CCGT) y dos unidades de turbinas sencillas de gas (SCGT).

Poseidon (2010), en capacidad de desalinización de agua de mar en el mundo, expresa que a fines del siglo pasado, en 20 años, el uso de energía pasó de 30.16 a 3.7 kWh/m³ debido a mejoras en los materiales de las membranas de ósmosis inversa (OI) y los equipos de recuperación de energía, lo cual se auna al aumento de eficiencia de las bombas de alimentación, y la reducción de las pérdidas de presión en los elementos de las membranas. Tomando en cuenta que el costo de energía representa típicamente entre 20 y 30% del costo total de desalinización del agua de mar, dichas innovaciones tecnológicas contribuyen de manera significativa a reducirlo, y con los nuevos sistemas de recuperación de energía puede esperarse una reducción de 10 a 15%.

Talbot (2015) menciona que los suministros de agua y uso de energía en kilowatts-hora/m³ (de 0.1 a 4.0) son los límites inferior y superior de los rangos para cada operación en el suministro. La presión de los cambiadores de alta presión del agua de mar concentrada directamente en el agua de alimentación de la OI tiene una eficiencia de 95% o mayor. Los elementos futuros de OI de baja energía operarían aún con bajas presiones para continuar mejorando la efectividad del costo de la tecnología OI. La constitución de las membranas tiende a deteriorarse naturalmente con el tiempo debido a una combinación del uso y desgarramiento del material, y a la inevitable colmatación de los elementos de la membrana. Las mejoras de la química de los polímeros de las membranas y de los procesos de producción han hecho membranas más durables y han ampliado su vida útil a más de cinco

años. El pretratamiento de agua de mar usando sistemas de membranas de ultra y microfiltración previos a la desalinización por OI, se espera que extienda la vida útil de la membrana a más de siete años, reduciendo los costos de su reemplazo y, en conjunto, de todo el proceso de suministro del agua. Shahzad *et al.* (2017) muestran en sus estudios la cantidad de energía necesaria para obtener un m³ de agua potable procedente de distintas fuentes. Así, para agua subterránea es de 0.48 kWh/m³ y para agua de mar va de 2.6 a 8.5 kWh/m³. Al presente, como se muestra en la Tabla 2, los procesos de OI para agua de mar requieren de 3 a 8 kWh/m³, y para agua salobre de 1.5 a 2.5 kWh/m³ para plantas de gran a mediano tamaño (presión de bombeo de 55 a 82 bar); para plantas pequeñas, la energía necesaria es de hasta 15 kWh/m³.

Tabla 2. Requerimientos de energía en los procesos de OI.

Plazo	Número de años	Meta por debajo del requerimiento (kWh/m³)
Actual	Presente	3* a 8 (4**)
Corto	Menos de tres	3
Mediano	Tres a cinco	2
Largo	Más de cinco	1.5

*Shahzad *et al.* (2017) mencionan para agua salobre de 1.5 a 2.5 kWh/m³ en plantas de gran a mediano tamaño.

** Comunicación personal en relación con la planta desalinizadora El Cochorit, Sonora, México.

Noriega (2014), para el proyecto de la planta desalinizadora Rosarito, Baja California, proporciona los datos para calcular el requerimiento de energía en 3.07 kWh/m^3 para una captación de agua potable de $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$, con recuperación de 50.4% de la energía hidráulica disponible en la salmuera de retorno al mar. La potencia neta requerida es de 48 660 kW.

Entre las plantas desalinizadoras de México que están en fase inicial de los proyectos (con la información de requerimiento de energía) se tienen las siguientes: El Cochorit, en el estado de Sonora, y la de Rosarito, en Baja California. La Figura 4 muestra, a gran escala, la localización de dichas plantas.

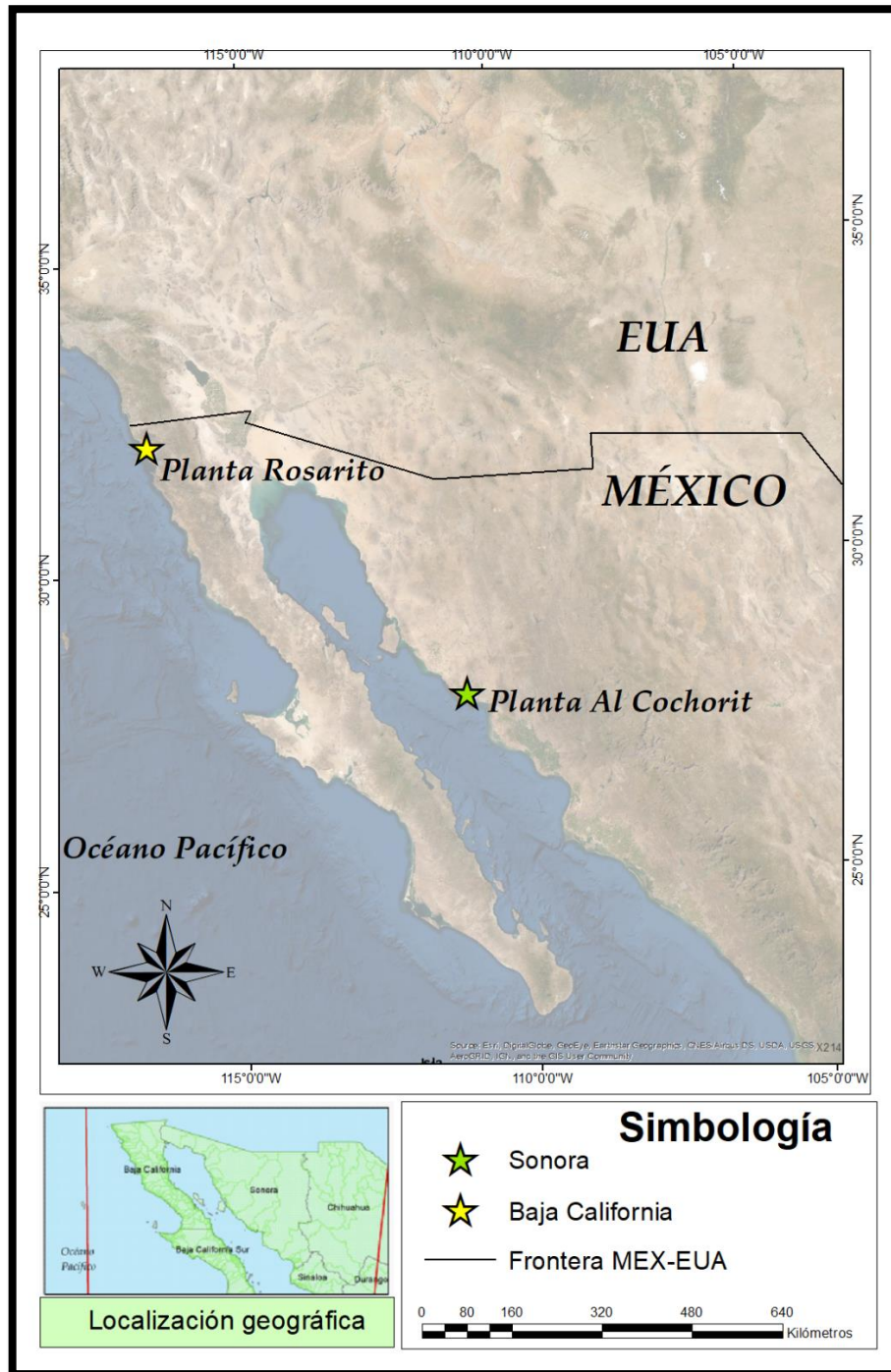


Figura 4. Localización de las plantas desalinizadoras El Cochorit, Sonora, y Rosarito, Baja California, México.

Discusión

Todos los métodos de desalinización disponibles operan bastante alejados (de 10 a 15%) del ideal o límite termodinámico de 0.78 kWh/m³, lo cual significa que para la futura desalinización sostenible, las técnicas convencionales necesitan elevar su eficiencia hasta un rango de entre 25 a 30% de dicho límite termodinámico o investigar fuentes alternativas de energía sostenible.

En cuanto a los objetivos sobre energía, la Asociación Internacional de Desalinización fijó la meta a corto plazo de reducir los requerimientos de energía en 20% para ósmosis inversa en agua de mar (SWRO, por sus siglas en inglés), lo cual equivale a un requerimiento inferior a 3 kWh/m³, con un mínimo de 1.2 kWh/m³ para 50% de recuperación. El límite termodinámico práctico es de 1 kWh/m³. La Tabla 2 muestra las metas en relación con el requerimiento actual para el corto, mediano y largo plazos. Las dificultades existentes en muchos países ante la escasez de agua dulce han obligado a tomar en consideración las posibilidades de utilizar las enormes reservas de agua de mar y aguas salobres de distintas procedencias para su tratamiento. Hoy en día existe una corriente de interés por la realización de estudios y proyectos relativos al empleo de distintas tecnologías de desalinización. No

obstante, el sistema no mostraba vías sostenibles en cuanto a la cantidad de energía necesaria para obtener agua de calidad suficiente para uso humano.

La convención de cambio climático de las Naciones Unidas sostiene que: "La eliminación del carbón como una fuente de energía es una prioridad". En la última reunión Cumbre del Clima de Bonn (COP23), donde los representantes de casi 200 países debatieron sobre las normas de aplicación del "Acuerdo de París contra el cambio climático", concluyeron que las noticias no son buenas, porque las emisiones mundiales de CO₂ volvieron a crecer en 2017 hasta llegar a las 41 500 x 10⁶ toneladas, el mismo dato que en 2015, cuando se alcanzó el pico máximo histórico.

Entre los impactos al medio ambiente del proceso de desalinización destacan aquellos relacionados con el agua de rechazo (salmuera) sobre el ecosistema costero y marino, tal como lo describen Liu, Weng y Sheu (2018). Petersen, Paytan y Bar-Zeev (2018), además, señalan el potencial impacto negativo de algunos agentes químicos utilizados en los procesos de desalinización, que causan la mortalidad de especies clave relacionadas con los servicios ecosistémicos de ambientes costeros y marinos. Los autores destacan la adecuada selección de sitios de descarga como una buena práctica de manejo, consistente con lo recomendado por Palao-Puche (2018), quien sugiere la apropiada instalación de emisores submarinos, fomentando que las condiciones naturales de corrientes y mareas permitan la máxima dispersión de estos contaminantes, reduciendo así el impacto ambiental; pero la falta de estudios en este tema es aún un factor preocupante y hacia donde deberían acoplarse las investigaciones futuras, con sus programas de

monitoreo bien diseñados y en ejecución, para realmente cumplir con los objetivos del milenio. En particular, aquellas que consideren el efecto económico para poder evaluar el impacto global de las operaciones de desalinización, y poder regular y/o minimizar los daños potenciales sobre los fondos marinos.

Conclusión

Como se describió en esta revisión, existen diversos avances tecnológicos a nivel global que conllevan hacia un manejo sostenible del proceso de desalinización desde una perspectiva de optimización de los requerimientos energéticos.

El panorama futuro de las membranas para desalinización y energía con gradientes salinos se proyecta para incluir membranas OI de hiperelevada permeabilidad, energía renovable para desalinización y procesos emergentes.

También, de acuerdo con esta revisión, la investigación en México debe orientarse a mejoras en tecnologías convencionales y emergentes; procesos de ingeniería; uso de sistemas integrados; avances en las ciencias de los materiales, como formación de estructuras biológicas en cuanto a selección, robustez, costo y escalabilidad, como la producción

de grandes áreas de proteínas para aquaporin y, con todo ello, lograr reducir requerimientos de energía en el proceso de desalinización.

Agradecimientos

Al doctor Peter Carlwright, al ingeniero Hildebrando Ramos Luna, a la ingeniera Cecilia Canales Noriega, y a la Asociación Geohidrológica Mexicana.

Referencias

- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Valladares-Linares, R., Missimer, T., & Lattemann S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401(2), 16-21. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.002>
- Atanosovska, A. (2016). Solar desalination: A promising solution for the future of water in MENA. Fanack. *Water of the Middle East and North Africa*. Recuperado de <https://water.fanack.com/specials/desalination/>
- Canales, E. A., Islas, E. L., & Velázquez, N. C. (2016). Desalination plant with double barrier of pumping wells for saline intrusion control. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 10, 139-143.
- Feng, C., Zheng, H., Wang, R., & Ma, X. (2016). Performance investigation of a concentrating photovoltaic/thermal system with transmissive Fresnel solar concentrator. *Energy Conversion and Management*, 111(1), 401-408. Recuperado de

<https://daneshyari.com/article/preview/771536.pdf>

Fthenakis, V., Atia, A. A., Morin, O., Bkayrat, R., & Sinha, P. (2015). New prospects for PV powered water desalination plants: Case studies in Saudi Arabia, *Progress in Photovoltaics*, 24(4), 543-550. DOI: doi.org/10.1002/pip.2572

Liu, T. K., Weng, T. H., & Sheu, H. Y. (2018). Exploring the environmental impact assessment commissioners' perspectives on the development of the seawater desalination Project. *Desalination*, 428, 108-115.

Noriega, S. E. (2014). *Environment impact manifestation. Desalination Plant, Rosarito, B.C.N. S.C. Agua, S.A. de C.V. Summary* (2 of 20). Ensenada, México: Cisco Consultores Ambientales.

ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Sustainable Development Goals. 17 Goals to transform our world*. Recuperado de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

Palao-Puche, J. P. (2018). *Development of a computer tool for the hydraulic design of submarine emissaries in accordance with the regulations applicable in the Valencian Community*. Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Valencia, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/114924>

Petersen, K. L., Paytan, H. A., & Bar-Zeev, E. (2018). Chapter 11. Impacts of seawater desalination on coastal environments. In: Gnaneswar-Gude, V. (ed.). *Sustainable desalination handbook* (pp.

437-463). Oxford, UK, Cambridge, USA: Butterworth-Heinemann, Elsevier.

Poseidon Water. (2010). *Worldwide seawater desalination capabilities. Seawater Desalination. Huntington Beach Facility*. Recuperado de <http://hbfreshwater.com/desalination-101/desalination-worldwide>

Ras Al Khair Desalination Plant (2014). Water Technology. Recuperado de <https://www.water-technology.net/projects/ras-al-khair-desalination-plant/>

Raval, H. D., & Maiti, S. (2016). Ultra-low energy reverse osmosis with thermal energy recovery from photovoltaic panel cooling and TFC RO membrane modification. *Desalination and Water Treatment*, 57(10), 4303-4312. DOI: doi.org/10.1080/19443994.2014.993725

Sachs, J.D. (2014). 12. Climate Change. In *The Age of Sustainable Development*. Columbia University, New York. Massive Open Online Course. Coursera. Recuperado de <https://www.coursera.org/learn/sustainable-development?>

Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52-64. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417303703>

Sim, D. (2015). *World Water Day 2015. Photos to make you think twice about wasting this precious resource*. Recuperado de <http://www.ibtimes.co.uk/world-water-day-2015-photos-make-you-think-twice-about-wasting-this-precious-resource-1492907>

- Sommariva, C. (2017). State of the art and future applications of desalination technologies in the Middle East. En: Badran A., Murad S., Baydoun E., & Dagher N. (eds.). *Water, energy & food sustainability in the Middle East*. (pp. 107-124). Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48920-9_6
- Srivastava, S., & Reddy, K. S. (2017). Simulation studies of thermal and electrical performance of solar linear parabolic trough concentrating photovoltaic system. *Solar Energy*, 149, 195-213. Recuperado de <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=1566477>
- Talbot, D. (2015). Megascale desalination. The world's largest and cheapest reverse-osmosis desalination plant is up and running in Israel. *MIT Technology Review*. 10 Breakthrough Technologies. Recuperado de <https://www.technologyreview.com/technology/megascale-desalination/>
- Water Technology. (2011-2014). *Ras Al Khair Desalination Plant*. Saudi Arabia. Recuperado de <http://www.water-technology.net/projects/-ras-al-khair-desalination-plant/>
- Widyolara, B. K., Abdelhamid, M., Jiang, L., Winston, R., Yablonovitch, E., Scranton, G., Cygan, D., Abbasi, H., & Kozlov, A. (2017). Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector. *Renewable Energy*, 101, 1379-1389. Recuperado de <https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v101y2017icp1379->

1389.html

- Williams, A. (2013). Solar powered water desalination heats up in Chile. *WaterWorld*, 28(3). Recuperado de <http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-28/issue-3/regional-spotlight-latin-america/solar-powered-water-desalination-heats.html>
- Xing, J., Chao, X., Xue, H., Xiaoze, D., Gaosheng, W., & Yongping, Y. (2017). A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology. *Applied Energy*, 187, 534-563. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916317184>
- Zimmermann, S., Helmers, H., Tiwari, M. K., Paredes, S., Michel B., Wiesenfarth, M., Bett, A. W., & Poulidakos, D. (2015). A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 514-521. DOI: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.068