

Las innovaciones y los retos del suministro de agua limpia y sostenible mediante desalinización

Autor

Sergio Salinas

Es profesor titular de Ingeniería de Abastecimiento de Agua en el IHE Delft Institute for Water Education de los Países Bajos. Es experto en la tecnología de desalinización y tratamiento de aguas, con experiencia en América Latina, Oriente Medio y Europa.

Sergio es doctor en Desalinización y Tratamiento de Aguas por la Universidad Técnica de Delft, máster en Ingeniería de Abastecimiento de Agua por el UNESCO-IHE Institute for Water Education, máster en Riego y Drenaje y licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Mayor de San Simón. También obtuvo el University Teaching Qualification en los Países Bajos.

Tiene más de 75 publicaciones en revistas revisadas por pares, actas de congresos, libros y capítulos de libros con las mejores editoriales. Sergio ha sido mentor de más de cincuenta estudiantes de máster, copromotor de cuatro estudiantes de doctorado y actualmente supervisa a dos estudiantes de doctorado. Sergio imparte y coordina varios cursos sobre desalación y tecnología de membranas.

Índice

01	Introducción	04
02	En favor de la desalinización	05
03	Problemas permanentes y cómo abordarlos	18
04	Los caminos a seguir	23
05	Conclusiones	30
<hr/>		
	Referencias	32

01

Introducción

Este artículo plantea la **desalinización como una solución técnica para paliar la escasez global y local de agua**. En el año 2050, debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático, se prevé que vivirá bajo un intenso estrés hídrico alrededor del 40% de la población mundial, lo que incluye a casi todos los habitantes de Oriente Medio y Asia del Sur, además de partes significativas de China y África del Norte¹. La utilización de recursos hídricos no convencionales es una oportunidad emergente para reducir la brecha entre la demanda y el suministro de agua². El agua de mar se considera una fuente hídrica a prueba de sequías, porque no depende del caudal de los ríos, las precipitaciones, el nivel de los embalses o el cambio climático. **La desalinización puede ser una opción para paliar la escasez en la industria y las ciudades costeras.**

En el **primer apartado**, se presentarán, en sus contextos, las **tecnologías dominantes e incipientes para la desalinización** de agua de mar, agua salobre y agua dulce, además de datos de apoyo que establecen su potencial hoy en día. Se expondrá la actual capacidad de desalinización mundial en función de la tecnología, del tipo de agua y la región, del destinatario, además del crecimiento previsto y los mercados emergentes. En el siguiente apartado se abordarán los problemas y **los costes que siempre están presentes en el proceso**: se describirán las preocupaciones medioambientales y operativas con ejemplos de modelos que ha tenido éxito y están disponibles. En el último apartado, daremos un paso hacia el futuro para describir los próximos avances en la desalinización, e indicaremos las oportunidades de desarrollo a medio plazo en relación con problemas como la gestión de la salmuera, el deterioro de la calidad del agua de origen, el suministro de energía y el cambio climático.

02

En favor de la desalinización

En el último siglo, el consumo de agua ha aumentado a una tasa más de dos veces superior a la del crecimiento de la población³. En concreto, la combinación de crecimiento económico y demográfico ha provocado en varias partes del mundo una captación excesiva de los recursos convencionales de agua dulce. Así, se ha observado un aumento de la escasez de agua, definida esta como una escorrentía anual total disponible para el consumo humano inferior a 1.000 m³ per cápita cada año.

Además, hay muchas personas que aún no pueden conectarse a un suministro de agua potable. A pesar de los recientes avances en la provisión de acceso a través de los programas de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), 2.200 millones de personas en todo el mundo siguen esperando acceder a agua potable gestionada de manera segura, entre ellas, 785 millones que no tienen acceso a agua potable básica y segura⁴. Al mismo tiempo, se prevé que en 2050 la población mundial alcance los 9.700 millones de habitantes⁵. Lo cual, combinado con un abastecimiento más errático e incierto, agravará la situación, sobre todo en regiones que ya sufren estrés hídrico (África del Norte y Oriente Medio), y generará estrés hídrico en regiones que ahora cuentan con abundantes recursos de agua.

Hay varias soluciones técnicas que pueden ayudar a resolver la escasez de agua en el mundo. Pueden agruparse en cinco categorías:

- i) **la reducción de la demanda de agua**; por ejemplo, aumentando la eficiencia en la agricultura y la industria, reduciendo las fugas en el abastecimiento público de agua o estimulando activamente la reducción del consumo mediante campañas de concienciación o tarifas progresivas;
- ii) **el transporte de agua**, aunque esto suele implicar el desplazamiento de grandes distancias, lo cual puede conllevar un importante coste energético;
- iii) **el almacenamiento de agua de los ríos** en acuíferos durante los periodos de mayor caudal;
- iv) **la reutilización del agua**, sobre todo en la industria y la agricultura; y
- v) **la desalinización de**
 - a. agua salobre (es decir, el agua de los estuarios, los manglares y otros lugares donde se mezclan el agua dulce y salada),
 - b. efluentes de aguas residuales, y
 - c. **agua de mar** como recurso hídrico no convencional.

De estas soluciones, la desalinización es la que suele implementarse como última opción, cuando los recursos de agua dulce convencionales casi se han agotado. Sin embargo, recientemente, la desalinización ha sido reconocida como una forma de resolver la escasez de agua. En el *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2021: valorando el agua*⁶, la desalinización se presenta como “una de las opciones tecnológicas que puede proporcionar una fuente adicional de agua dulce para el riego, sobre todo en las zonas costeras con escasez de agua» y se destaca cómo gracias a unos costes cada vez menores “el suministro de agua desalinizada para la agricultura tiene más probabilidades de ser rentable en un entorno muy controlado, utilizando prácticas agrícolas con el uso más eficiente del agua, cultivos con alta productividad y energías renovables”.

En síntesis

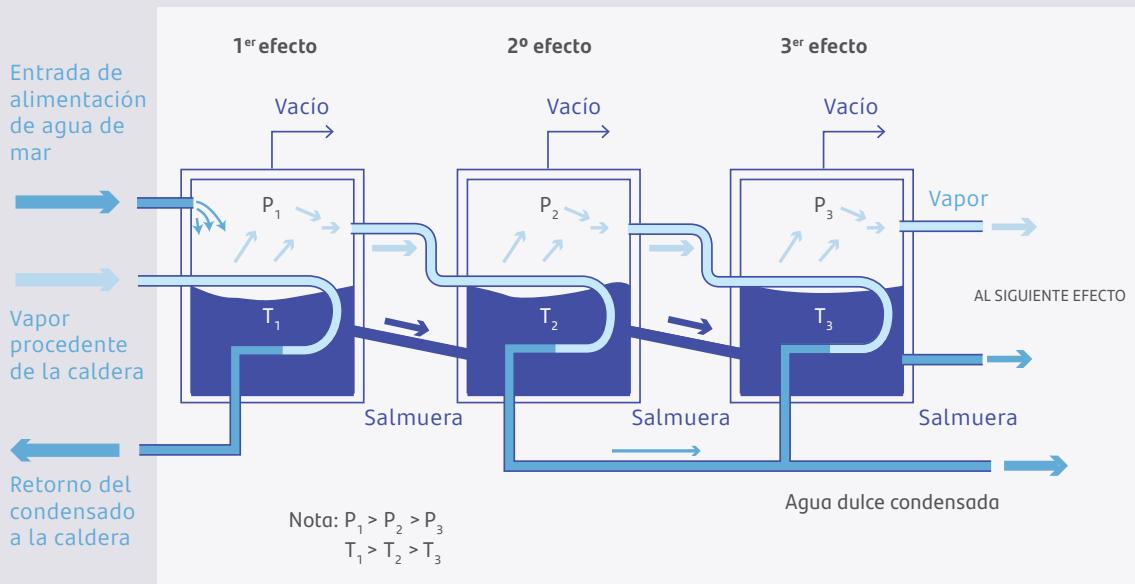
La desalinización: datos básicos y tecnologías

En la actualidad se emplean varias tecnologías de desalinización (procesos termales y procesos basados en membranas) que se han ido desarrollando a lo largo de los años. En la producción de agua potable y para la industria se utilizan las siguientes seis tecnologías de membranas: la microfiltración (MF), la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF), la ósmosis inversa (OI), la electrodiálisis (ED) y la electrodesionización (EDI).

La **destilación** es el proceso más antiguo que se conoce para producir agua dulce a partir de agua de mar. Cuando se hierve el agua salada, el agua dulce se evapora y quedan los iones de sal. En el proceso de destilación, primero se hierve el agua y después se enfría el vapor de agua en un recipiente limpio. Este enfriamiento condensa el vapor y lo convierte de nuevo en agua. Para que el vapor de agua se condense y se vuelva líquido, es necesario eliminar —o mejor, recuperar— el calor de condensación. Los tres procesos de destilación que más se utilizan hoy en la industria son: el de evaporación/destilación multiefecto (MED, por sus siglas en inglés), el flash multietapa (MSF, por sus siglas en inglés) y por compresión de vapor (VC, por sus siglas en inglés).



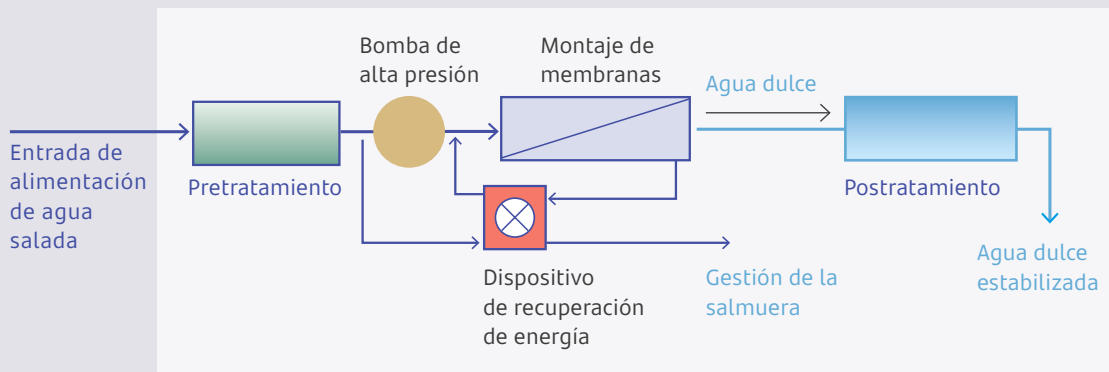
Figura 1. Ejemplo de una unidad de destilación multiefecto con tres efectos. (Con permiso de 7)



La **ósmosis inversa** se utiliza sobre todo para la desalación de agua de mar y agua salobre. La electrodiálisis se usa en la desalinización de agua salobre. La nanofiltración se utiliza principalmente para eliminar sulfatos, la dureza y materia orgánica natural. La ultrafiltración y la microfiltración se aplican para eliminar la materia en suspensión y coloidal y para desinfectar el agua potable.

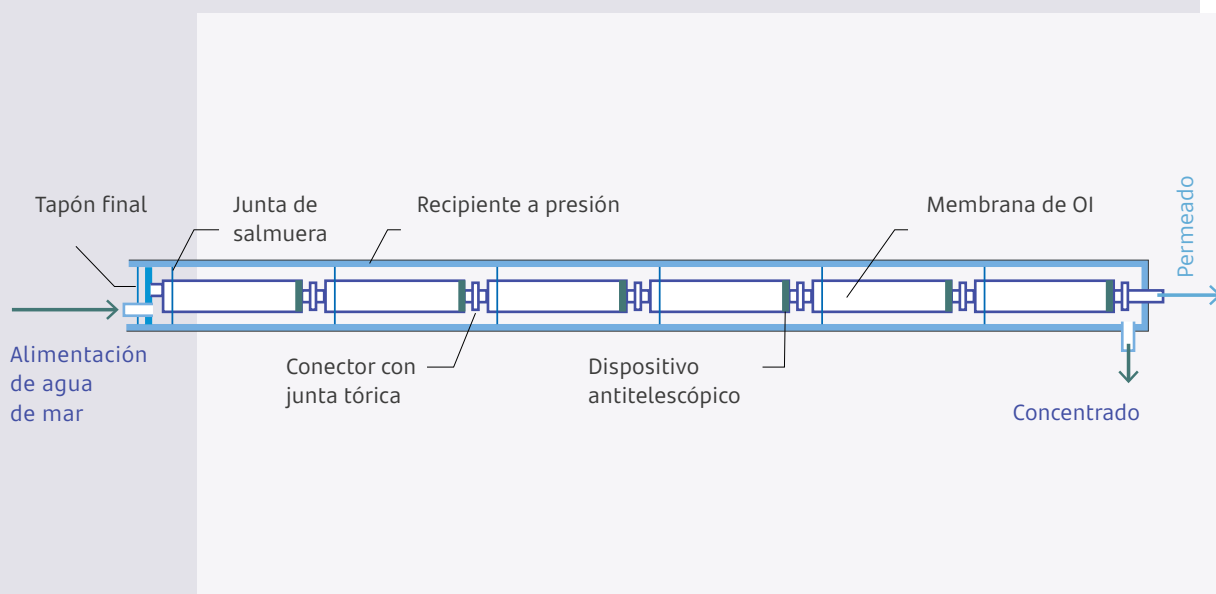
Figura 2. Esquema de un sistema de OI con pretratamiento y postratamiento.

(Con permiso de 7)



La figura 2 ilustra los distintos componentes de una planta de desalinización por ósmosis inversa, entre ellos el pretratamiento, las unidades de bombeo de alta presión, el montaje de los elementos de OI en recipientes a presión y el postratamiento necesario para remineralizar el agua permeada de la OI. Con la ayuda de dispositivos de recuperación de energía, la presión del concentrado de la OI después de salir del recipiente a presión se transfiere hidráulicamente al agua de alimentación. El pretratamiento debe garantizar que el valor del índice de densidad de sedimentos (SDI, por sus siglas en inglés) del agua de alimentación de la OI es inferior a 5, y preferiblemente inferior a 3. El postratamiento volverá a introducir minerales en el permeado de la OI y asegurará que el agua final sea apta para su uso.

Figura 3. Esquema de un recipiente a presión para OI que contiene 6 elementos de membrana de OI e ilustra las corrientes de alimentación, permeado y concentrado de la OI.
(Con permiso de 7)



En la Tabla 1 se indican los rangos del consumo energético y la presión, y se añade un coste de producción de referencia para varias tecnologías. El tratamiento de agua dulce mediante el tratamiento de agua convencional es el que menos energía consume, en comparación con las demás tecnologías. En la desalinización de agua de mar mediante membranas el consumo de energía es, de media, de 3-4 kWh/m³, con un intervalo de presión entre 50 y 90 bares. La evolución de la demanda energética se presenta en la figura 5.

Tabla 1. Consumo energético y presión para diversas tecnologías de tratamiento⁷

Tecnología	Presión (bar)	Consumo de energía (kWh/m ³)	Calor	Coste (€ o \$/m ³)
Agua potable convencional	0,1-0,2	-		
Electrodíálisis				0,25-0,50
Ultrafiltración y microfiltración	0,5-2	0,1-0,2	-	0,05-0,10
Nanofiltración	5-10	0,3-0,5	-	0,15-0,25
OI de agua salobre	10-20	0,5-1	-	0,25-0,50
OI de agua de mar	50-90	3-4	-	0,50-1,00
Destilación	-	1-4	160 MJ/m ³	
Coste de la energía		0,05-0,1 \$/kWh	5-15 \$/GJ	

El coste de producción en las plantas de ósmosis inversa de agua de mar (SWRO, por sus siglas en inglés) puede dividirse en varias categorías (véase la figura 4): el consumo de energía representa alrededor del 40% del coste de producción total, la amortización también supone en torno al 40%, los costes de personal entre el 4% y el 11%, el consumo de productos químicos durante el tratamiento entre el 2% y el 6,5%, el coste de las membranas de OI entre el 2% y el 5%, el mantenimiento de la planta entre el 3,5% y el 4,5% y la limpieza de las membranas de OI entre el 0,2% y el 0,3%. Cualquier optimización que se consiga en el consumo de energía disminuirá el coste de producción. Se espera que el uso de energías renovables (al margen de la red eléctrica) reduzca los costes energéticos, al mismo tiempo que reduce el impacto en el medioambiente. Las energías renovables también cuentan con potencial para ser utilizadas directamente en plantas pequeñas o remotas.

Figura 4. Costes de producción en las plantas de SWRO⁸

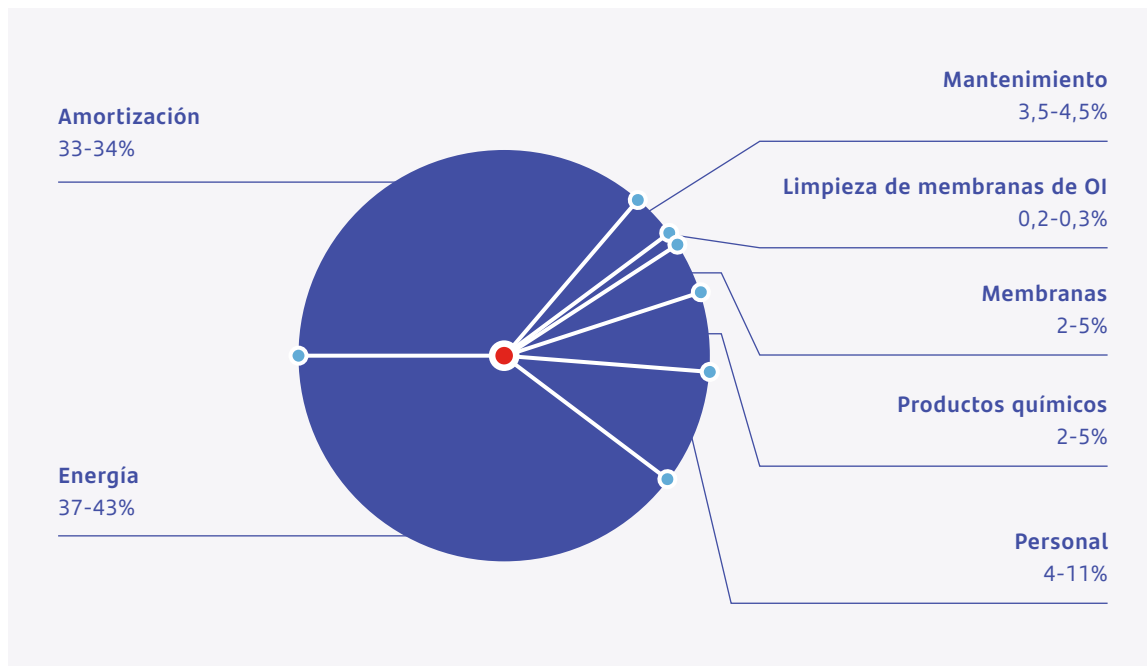
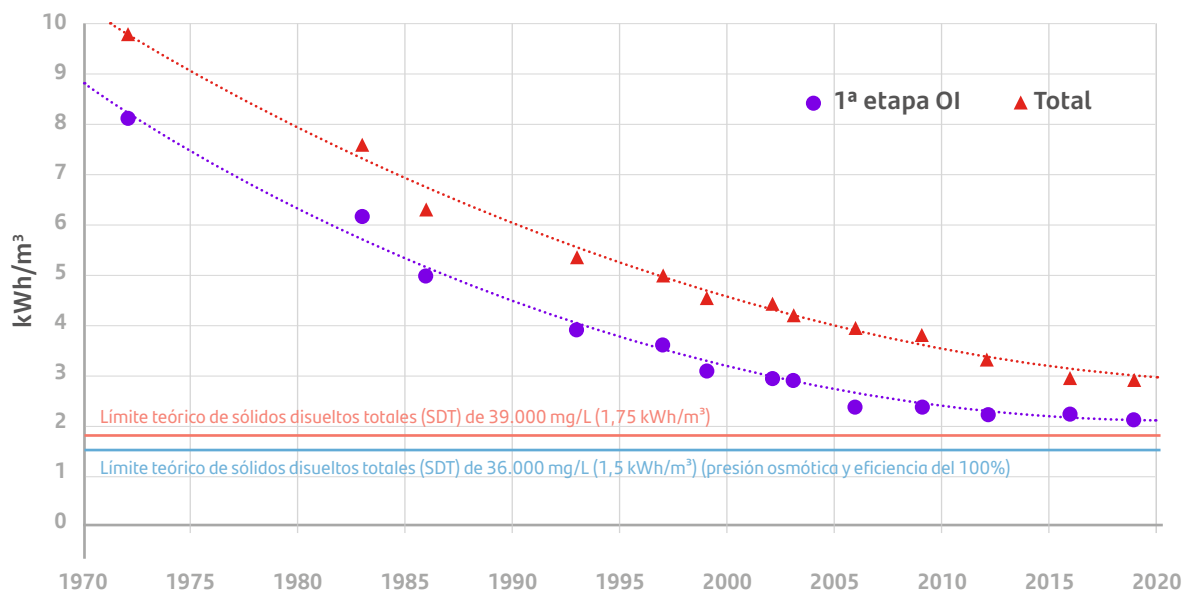


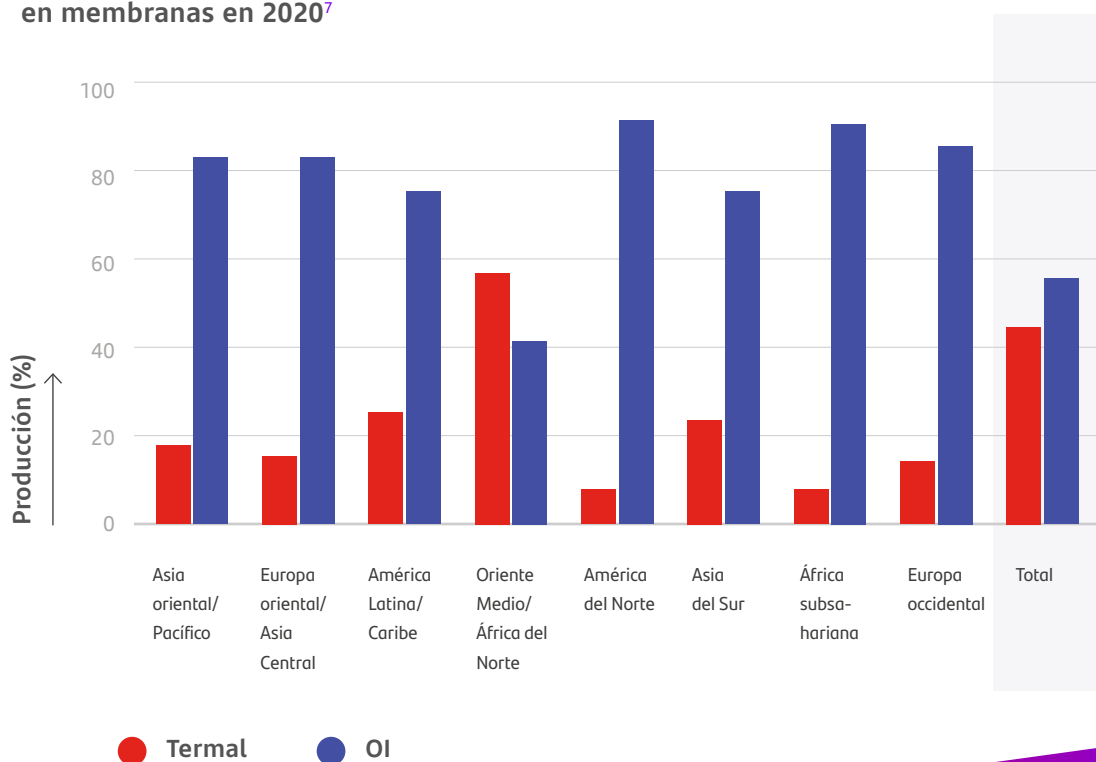
Figura 5. Evolución histórica del consumo de energía en la SWRO. Adaptado a partir de 8



Sin embargo, hay razones de peso para empezar a considerar la desalinización como una opción preferente. La desalinización está preparada para ser (más que en la actualidad) una alternativa para paliar la escasez, sobre todo en la industria y las ciudades costeras, mediante al menos tres mecanismos:

→ **Una mayor eficiencia.** La reducción continua de los precios de producción y el consumo de energía ha permitido que la desalinización ocupe una posición más destacada entre las opciones de tratamiento de agua. La desalinización por ósmosis inversa basada en membranas domina el mercado (~70%). Hoy en día, su coste de inversión y sus necesidades energéticas son inferiores a los de los procesos termales (la MSF y la MED, 24%). La destilación solo es relevante en el caso del agua de mar. Si se comparan por regiones la desalinización mediante membranas y la desalinización termal (véase la figura 6), solo en Oriente Medio y el África de Norte la desalinización termal tiene más capacidad que las plantas de ósmosis inversa (un 57% frente al 43%). En el resto del mundo, la ósmosis inversa es la tecnología dominante (con un 83% frente a 17%). En total, la capacidad de producción media de los procesos termales en todo el mundo es del 45% frente al 55% de la ósmosis inversa.

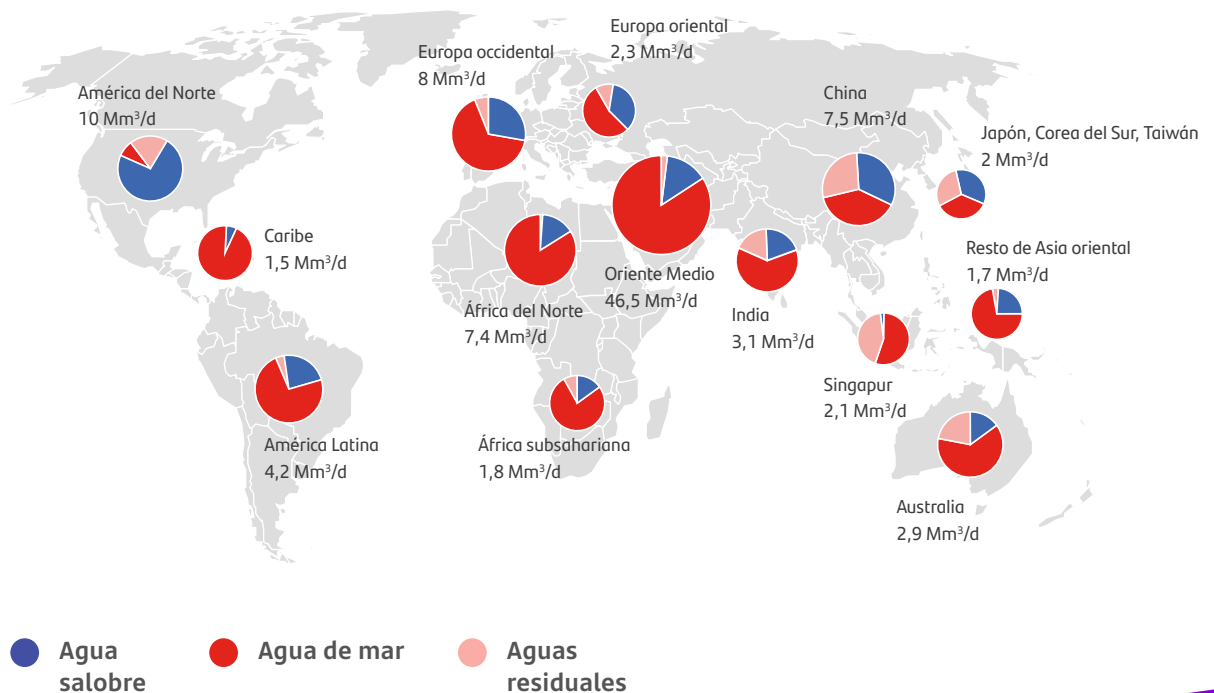
Figura 6. Desalinización de agua de mar, proceso termal frente a tecnología basada en membranas en 2020⁷



→ **La resiliencia.** La desalinización se considera una fuente de agua a prueba de sequías, que no depende del caudal de los ríos, el nivel de los embalses o el cambio climático.

→ **La conveniencia geográfica.** Con frecuencia, las megaciudades, en las que la demanda de agua suele ser elevada, están situadas en la costa, la cual se adapta perfectamente a la desalación^{9,10}. Alrededor de 680 millones de personas viven actualmente en zonas costeras bajas. Se espera que esta cifra aumente hasta los 1.000 millones en 2050¹¹. Además, casi 2.400 millones de personas viven a menos de 100 km de la costa¹², y 65 millones viven en pequeños Estados insulares en desarrollo¹³. En consecuencia, las ciudades situadas en la costa o cerca de ella pueden plantearse la utilización de agua de mar como fuente alternativa para la producción de agua potable y agua para la agricultura o la industria. La figura 7 ilustra la capacidad de desalinización mundial en función de la región y el tipo de agua.

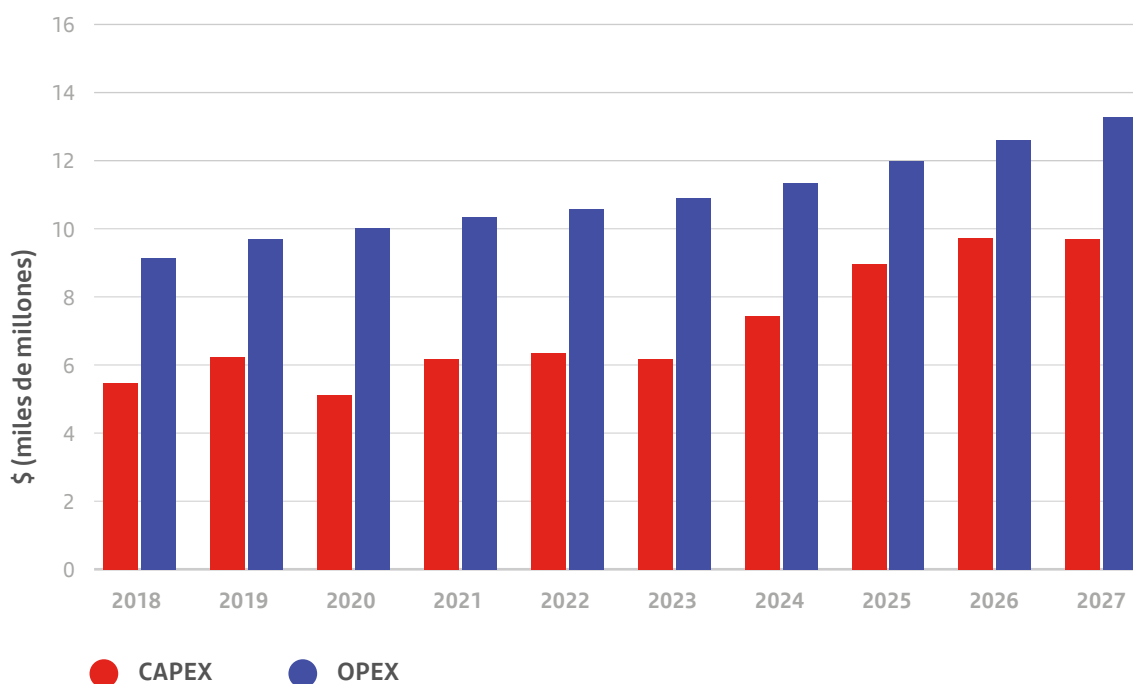
Figura 7. Capacidad de desalinización en distintas regiones del mundo según el porcentaje de la capacidad de producción a partir de diversas fuentes hídricas (agua de mar, agua salobre, efluentes de aguas residuales). (Información procedente de 14, con permiso de 7). Por ejemplo: América del Norte tiene una capacidad total de desalinización de agua de 10 Mm³/d, de los cuales el 73% se produce a partir de agua salobre, el 19% de efluentes de aguas residuales tratadas y el 8% de agua de mar.



Tal vez la mejor prueba de que la desalinización tiene un futuro prometedor sea la utilización que se le ha dado, en el pasado reciente y la actualidad, sobre todo en países de Oriente Medio que tienen una demanda urgente de agua. La capacidad instalada para desalinizar agua de mar y salobre ha crecido con rapidez en los últimos treinta años (véase la figura 9). Ahora, la capacidad mundial contratada supera los 100 millones de metros cúbicos anuales, lo que contribuye a satisfacer la creciente demanda de agua municipal y de agua para la agricultura y la industria. Actualmente, unos 330 millones de personas en el mundo reciben agua potable procedente de plantas desalinizadoras (unos 120 litros per cápita diarios).

A pesar de los importantes retrasos que se han producido durante el periodo 2021-2022, el mercado de la desalinización de agua de mar y de agua salobre sigue creciendo. En la actualidad es de 6.100 millones de dólares en gasto de capital (Capex, por sus siglas en inglés) y 10.500 millones de dólares en gastos operativos (Opex, por sus siglas en inglés) (véase la figura 8) y existen indicios claros de la existencia de capacidad nueva, tanto en los mercados que históricamente han sido más importantes como en otros minoritarios. En 2020, la tasa de crecimiento anual compuesto del mercado de la desalinización de agua de mar fue del 7,9% y se espera que en 2027 la capacidad contratada haya aumentado hasta los 39 Mm³¹⁵.

Figura 8. Gastos en el sector de la desalinización¹⁵

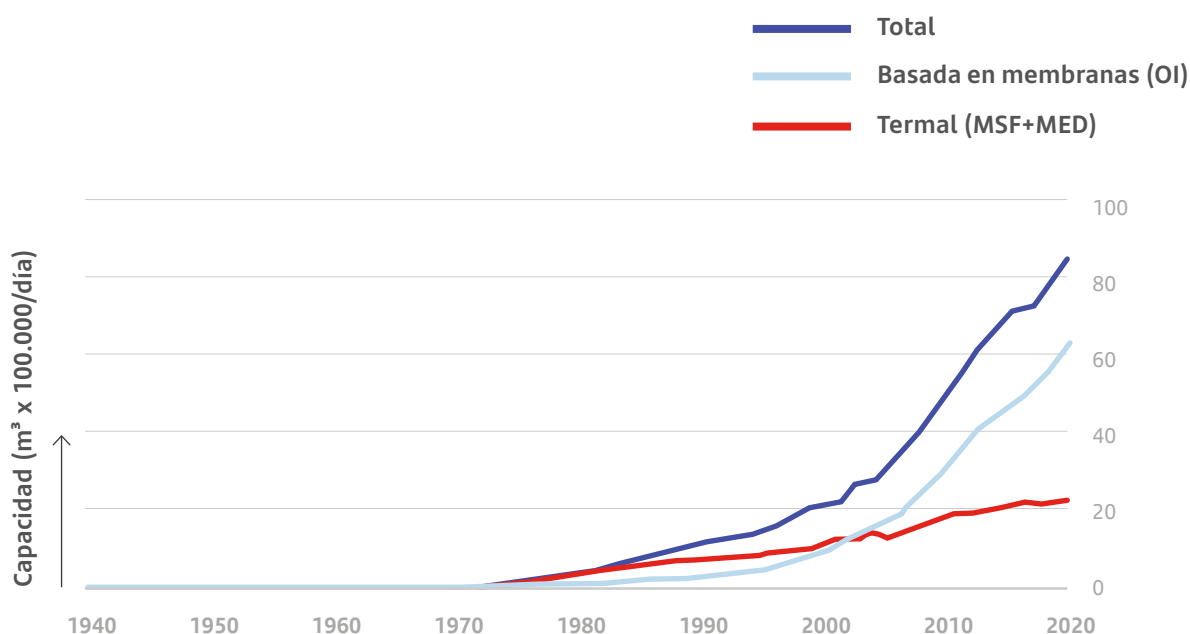


El agua de mar es la principal fuente de agua para la desalinización en todas las regiones, con la excepción de América del Norte, donde la capacidad regional se basa en la desalinización de agua salobre (73% / 7,3 Mm³/d), seguida de efluentes de aguas residuales (19% / 1,9 Mm³/d). Japón, Corea del Sur, Taiwán y China desalinizan agua de mar, agua salobre y efluentes de aguas residuales casi a partes iguales.

Por lo tanto, ya está quedando demostrado que el agua desalada resulta eficiente para el abastecimiento de agua potable, para la industria y el riego. En la mayoría de los países de Oriente Medio el consumo municipal depende de la desalinización, mientras que países como China, India, Corea del Sur, Brasil, Taiwán, Chile e Indonesia la utilizan para satisfacer la demanda industrial.

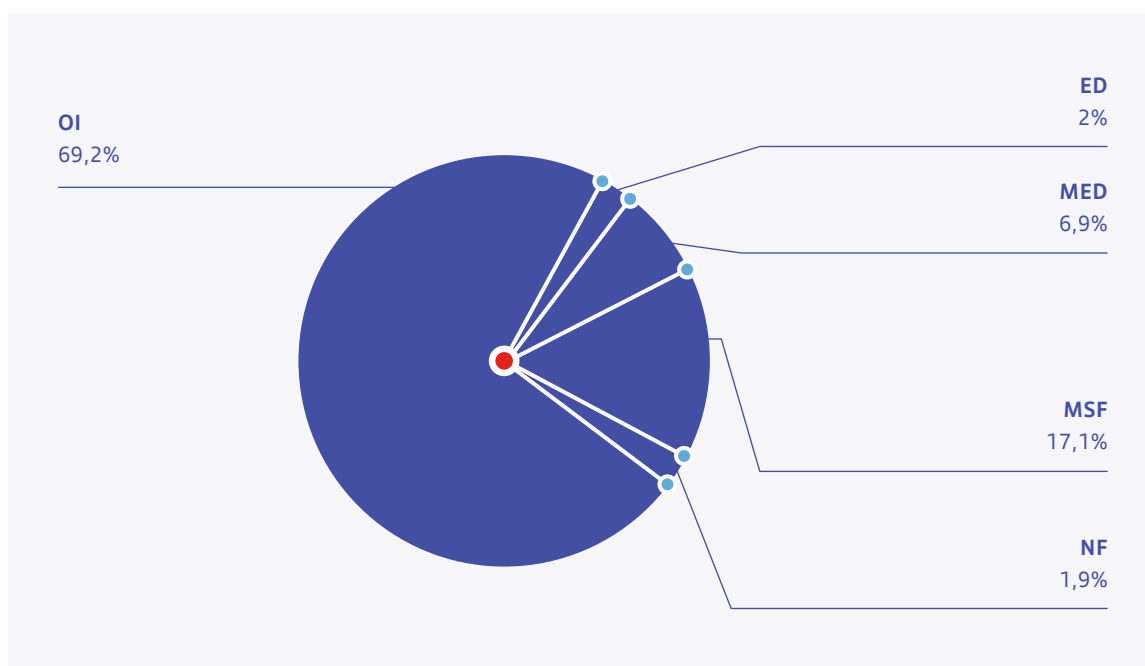
La figura 9 representa el histórico de la capacidad de producción acumulada a escala mundial de las plantas desalinizadoras para todas las fuentes de agua bruta, entre ellas el agua de mar, el agua salobre, el agua dulce, las aguas residuales tratadas y el agua pura. Más de dos tercios de la capacidad total actual se produce mediante tecnología de desalación basada en membranas (ósmosis inversa) y menos de un tercio mediante procesos termales (destilación flash multietapa y destilación multiefecto). Una de las razones por las que la capacidad de producción por ósmosis inversa de agua de mar crece con mayor rapidez que la de los procesos termales es que tanto el coste de inversión como el consumo de energía (3-4 kWh/m³) son menores. En los últimos treinta años, la capacidad de producción en línea ha pasado de 13,7 Mm³/d a los actuales 101,6 Mm³/d, lo que supone multiplicar casi por 7,5 la capacidad. En los últimos diez años, el aumento de la capacidad de desalinización ha sido de alrededor del 41% y se debe sobre todo a las nuevas plantas que utilizan la ósmosis inversa como principal tecnología de desalinización. La implantación de plantas desalinizadoras ha aumentado en muchas partes del mundo. Gran parte del crecimiento de la capacidad de desalinización se está produciendo en el sector de la desalación de agua de mar, aunque la desalinización de aguas residuales y la de agua salobre están adquiriendo mayor relevancia.

Figura 9. Capacidad total de desalinización en el mundo (agua de mar, agua salobre, aguas residuales y agua dulce) (Información procedente de 14, con permiso de 7)



La ósmosis inversa es la tecnología de desalinización preferida para todos los tipos de agua de origen. Supone el 69,2% (67 Mm³/d) de la capacidad global (figura 10); el 24% o 23,2 Mm³/d de la capacidad mundial se produce en plantas de destilación, en plantas de destilación flash multietapa (MSF) o de destilación multiefecto (MED), con cuotas de mercado relativas del 17% (16,6 Mm³/d) y el 7% (6,6 Mm³/d), respectivamente. El proceso de electrodiálisis (ED), con una cuota de mercado de alrededor del 2% (1,97 Mm³/d), y otros procesos, como la electrodesionización (EDI), suponen el 0,3% (0,3 Mm³/d) y la nanofiltración (NF) supone otro ~2% (1,8 Mm³/d) de la capacidad mundial de desalinización.

Figura 10. Capacidad de desalinización según el tipo de tecnología
 (OI = ósmosis inversa, NF = nanofiltración, MSF = destilación flash multietapa, MED = destilación multiefecto, ED = electrodiálisis).
 (Información obtenida de 14, con permiso de 7)

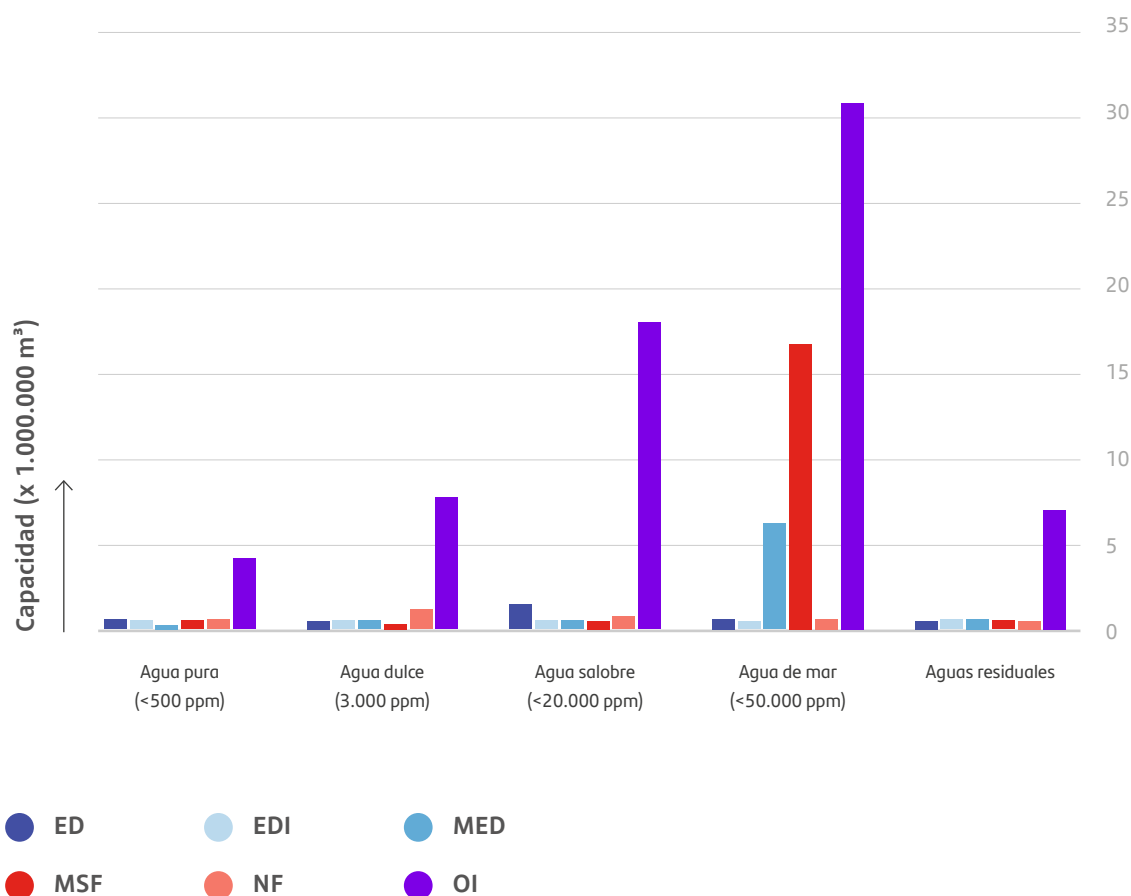


En la actualidad, ~60% de la capacidad total de desalinización se produce a partir de agua de mar, el 20% a partir de fuentes de agua salobre, sobre todo aguas subterráneas salobres, el 8% a partir de efluentes de aguas residuales, el 8% a partir de agua dulce y el 4% a partir de agua pura. El agua de mar es, por lo tanto, la principal fuente de agua para la desalinización y representa una producción mundial de agua de ~60 Mm³/d.

En la figura 11 se distingue entre los distintos tipos de agua de origen y las tecnologías utilizadas. En el caso del agua de mar, los procesos por ósmosis inversa y termal dominan la producción mundial de desalinización de agua de mar (34,4 Mm³/d y 25,7 Mm³/d). La MSF es el principal proceso termal y supone el 31% de la producción mundial de desalinización de agua de mar. La ósmosis inversa es el principal proceso utilizado en la desalinización de agua salobre (90%, 17,8 Mm³/d) y aguas residuales (91%, 6,9 Mm³/d).

Figura 11. Capacidad de producción de desalinización según la fuente de agua bruta y según la tecnología para plantas en línea y presumiblemente en línea.

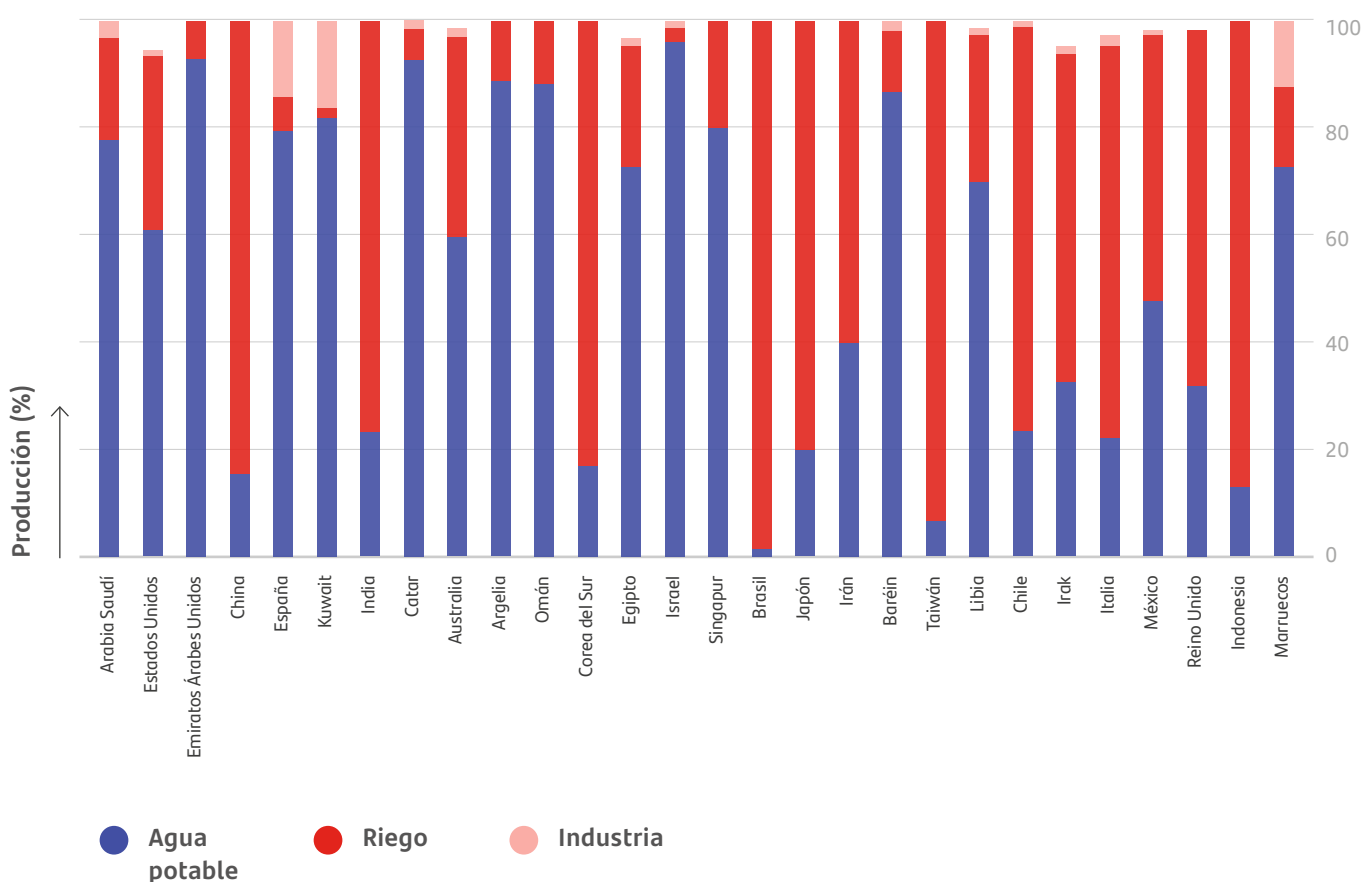
(Información obtenida de 14, con permiso de 7)



En la figura 12 se representan los países cuya capacidad de desalinización supera los 650.000 m³/d. El uso de la desalinización para el riego es relevante en tres países: España, Kuwait y Marruecos. China, India, Corea del Sur, Brasil, Japón, Taiwán e Indonesia recurren a la desalinización para aplicaciones industriales. Arabia Saudí, Estados Unidos, Emiratos Árabes Unidos, España, Kuwait, Argelia, Omán, Israel, Singapur, Baréin, Libia y Marruecos la utilizan para uso municipal. En resumen, en 2020 alrededor del 68% de la capacidad mundial de desalinización, o 68,5 Mm³/d, se produjo a partir de agua de mar. La capacidad de desalinización global aumentó un 41% en comparación con el año 2010 (59,2 Mm³/d). El 57% del agua de mar desalada se produce mediante ósmosis inversa. El proceso de destilación MSF se reserva casi en exclusiva para la desalinización de agua de mar, sobre todo en los países del Golfo.

Figura 12. Países con mayor capacidad de desalinización y principal uso de la desalinización (agua potable, industria, riego) en 2020.

(Información procedente de 14, con permiso de 7)



03

Problemas permanentes y cómo abordarlos

Muchas veces se considera que la desalinización es demasiado técnica, demasiado costosa, que consume demasiada energía y que existen problemas técnicos y medioambientales que la limitan. Como ocurre con todas las tecnologías de agua potable, la desalinización tiene sus problemas, pero existen soluciones para ellos. El precio del metro cúbico de agua se ha reducido considerablemente con los años, gracias a una producción de membranas más eficiente, a la implementación de dispositivos de recuperación de energía, la ingeniería de costes, etc., y a un mercado más amplio. La demanda de energía por metro cúbico ya se ha reducido (véase la figura 5) y los costes relacionados podrían disminuir aún más (de 0,02 a 0,08 \$/kWh⁸) con el cambio a fuentes de energía renovables o con el acoplamiento directo en el caso de las plantas pequeñas o remotas. Con todo, el **ensuciamiento de las membranas** sigue siendo el principal "talón de Aquiles" para que se generalice la utilización de la ósmosis inversa. Las **preocupaciones medioambientales** constituyen otro problema independiente, e igualmente importante, que habrá que resolver en los próximos años.

EL ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS: EL PRINCIPAL RETO

El ensuciamiento de las membranas suele provocar distintos problemas, por ejemplo la necesidad de limpiarlas (con frecuencia), la reducción de la capacidad de producción, un mayor consumo de energía y la disminución de la calidad del agua producida. Si el ensuciamiento es importante, las instalaciones de producción por ósmosis inversa serán menos fiables y al final habrá que sustituir las membranas con mayor frecuencia.

Los tipos de ensuciamiento de las membranas que hay que solucionar son cinco:

- i) **ensuciamiento particulado** debido a materia en suspensión y en partículas,
- ii) **ensuciamiento inorgánico** debido al hierro y el manganeso,
- iii) **ensuciamiento orgánico** debido a compuestos orgánicos,
- iv) **bioensuciamiento** debido al crecimiento de bacterias, e
- v) **incrustaciones** debidas a la deposición de compuestos poco solubles.

El ensuciamiento y las incrustaciones pueden manifestarse de tres maneras:

- i) un aumento de la presión diferencial en el espaciador que hay en los elementos enrollados en espiral, que se debe a la obstrucción y puede provocar **daños en la membrana**;
- ii) la **disminución de la permeabilidad de la membrana** debido a la deposición y/o adsorción de materiales en la superficie de la membrana, lo que hace que aumente la presión de alimentación de agua necesaria para mantener la capacidad; y
- iii) **el aumento del paso de sal debido a la polarización por concentraciónⁱ en la capa sucia, lo que da lugar a una mayor salinidad en el agua de producto.**

Soluciones ya disponibles que se beneficiarían de un mayor desarrollo. Los sistemas de pretratamiento (véase más adelante) controlan bien la mayor parte del ensuciamiento particulado y coloidal, pero la aparición de suciedad orgánica y bioensuciamiento sigue siendo un problema importante y es la principal razón por la que hay que limpiar con frecuencia las membranas de OI.

Para impedir que las membranas se ensucien, es fundamental realizar un **pretratamiento** en las plantas de ósmosis inversa. El pretratamiento puede hacerse con unidades de filtración (medios simples o dobles como antracita y arena); mediante filtración por membrana, por ejemplo las membranas de ultrafiltración; y recurriendo a la flotación por aire disueltoⁱⁱ combinada con las dos opciones anteriores. También son de gran ayuda los **métodos y las herramientas que monitorean la eficacia** del pretratamiento por lo que respecta al control del ensuciamiento y la optimización del proceso.

PREOCUPACIONES MEDIOAMBIENTALES

Como todas las actividades humanas, las plantas desalinizadoras tienen un impacto en su entorno. A pesar de que se han realizado muchos esfuerzos, siguen existiendo algunos problemas que afectan al medioambiente¹⁶, en concreto:

- la eliminación de materiales usados,
- el uso del suelo,
- la utilización de energía para desalar el agua y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del suministro de esa energía,
- el vertido del concentrado,
- el uso de una gran cantidad de productos químicos, y
- la pérdida de vida acuática debido a la contaminación marina y a la toma de agua directamente del mar.

i. La polarización por concentración es la acumulación de sales (iones) en la superficie de la membrana. Así, la concentración de iones en la superficie de la membrana es mayor que en el agua de alimentación. Este fenómeno es consecuencia del flujo de agua a través de una membrana, de que la membrana rechace iones y de la acumulación durante un tiempo extra de las sales retenidas en la superficie de la membrana.

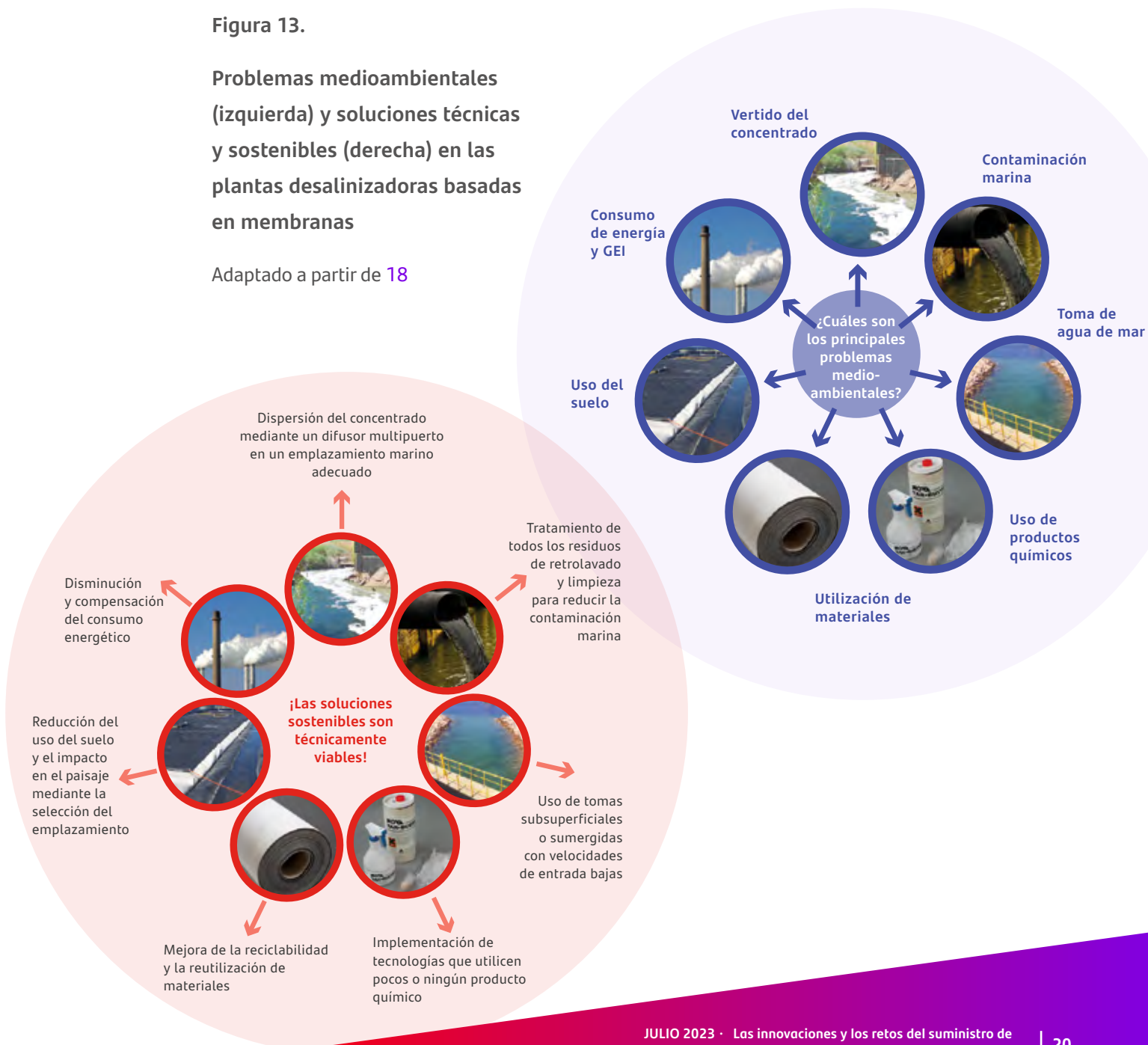
ii. En la flotación por aire disuelto, las burbujas de aire se producen debido a la reducción de la presión en una corriente de agua saturada de aire. La flotación se emplea sobre todo para el tratamiento de aguas de embalse ricas en nutrientes que puedan contener importantes floraciones de algas y para aguas coloreadas de baja turbidez y baja alcalinidad.

Los avances tecnológicos recientes (por ejemplo, la utilización de dispositivos para la recuperación de energía) han contribuido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero¹⁷. El uso de grandes cantidades de productos químicos durante el pretratamiento y el postratamiento del agua de mar es otro problema medioambiental. La principal preocupación es el vertido de productos químicos en aguas naturales, lo cual influye en el desequilibrio ecológico¹⁶. Además, el diseño de la toma de agua directamente del mar puede contribuir a la pérdida de organismos acuáticos, cuando estos chocan con la rejilla de alimentación o son arrastrados al interior de la planta¹⁷.

Figura 13.

Problemas medioambientales (izquierda) y soluciones técnicas y sostenibles (derecha) en las plantas desalinizadoras basadas en membranas

Adaptado a partir de 18



Soluciones ya disponibles para reducir el impacto ambiental. Entre las diferentes soluciones sostenibles para prevenir/reducir los problemas que ya se han enumerado¹⁸, las siguientes han dado buenos resultados y deberían incluirse en cualquier nuevo desarrollo. Podrían utilizarse como una “lista de verificación medioambiental segura” con alternativas viables que habría que considerar en cualquier proyecto de desalinización actual o futuro:

- Respecto a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (el concentrado y los productos químicos residuales):
 - utilizar las mejores técnicas disponibles para reducir el empleo de productos químicos,
 - tratar todas las soluciones de retrolavado y limpieza,
 - diseñar y utilizar difusores para dispersar el concentrado y así cumplir la normativa sobre mezclas.
- Respecto a los sedimentos y el impacto en el suelo (la contaminación de los sedimentos, los cambios en la erosión y los procesos de deposición):
 - colocar las tuberías de entrada y desagüe bajo tierra para atenuar la perturbación de los sedimentos costeros y marinos.
- Respecto al uso del suelo y el impacto en el paisaje:
 - identificar los emplazamientos adecuados mediante un proceso de evaluación del impacto ambiental (EIA),
 - realizar un diseño estético de las instalaciones, recurrir a la construcción sostenible y el paisajismo,
 - reducir el ruido y adoptar medidas de protección con pantallas,
 - minimizar el uso del suelo y compensar la pérdida de hábitats si fuera necesario.
- La calidad del aire y el clima (las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos):
 - compensar la demanda energética restante si fuera necesario, por ejemplo, mediante energías renovables o proyectos de reforestación.
- Consumo de recursos (energía, agua, materiales, productos químicos, suelo):
 - disminuir el consumo de energía utilizando las mejores técnicas disponibles, por ejemplo intercambiadores de presión,
 - realizar evaluaciones del ciclo de vida y análisis multicriterio para identificar procesos y modos de operar que reduzcan el consumo de recursos,
 - mejorar la reciclabilidad o identificar alternativas para una reutilización ventajosa.

En síntesis

Mecanismos previsibles procedentes del sector público

Dado el impacto ambiental potencial (y real) asociado a la desalinización, debe considerarse una intervención reguladora que vaya más allá de la iniciativa de las instalaciones de desalinización, sobre todo en dos ámbitos: la evaluación y las políticas.

La necesidad de evaluar. Los efectos en el ecosistema (la gestión del vertido de salmuera; el impacto de la construcción de la planta desalinizadora; la pérdida de hábitats; los efectos de la captación en la flora y la fauna marinas, debido a la gran velocidad de la toma de agua; o el diseño) deben evaluarse con detenimiento mediante estudios de EIA que incluyan: la monitorización sobre el terreno, el control de la toxicidad de toda la salmuera, la modelización hidrodinámica de las tomas y del vertido de salmuera para garantizar una mezcla rápida y eficaz y que la vida marina se vea lo menos afectada posible.

La **adopción de políticas**, al menos en tres frentes: los reglamentos de la zona de mezcla para el vertido de la salmuera; el uso cada vez mayor de túneles para las tuberías de entrada y desagüe, con el fin de disminuir las perturbaciones en los ecosistemas bentónicos sensibles; el empleo de tomas subsuperficiales o en el mar para reducir el uso de productos químicos en el pretratamiento y minimizar el choque y el arrastre (con baja velocidad de entrada) de la vida marina en las estructuras de la toma de agua.

04

Los caminos a seguir

En las nuevas instalaciones de desalinización de agua de mar se está optando claramente por la ósmosis inversa de agua de mar, de modo que en 2018 el 92% de las nuevas plantas han sido instalaciones de SWRO. Este predominio lo destacan al menos dos conjuntos de indicadores relacionados con:

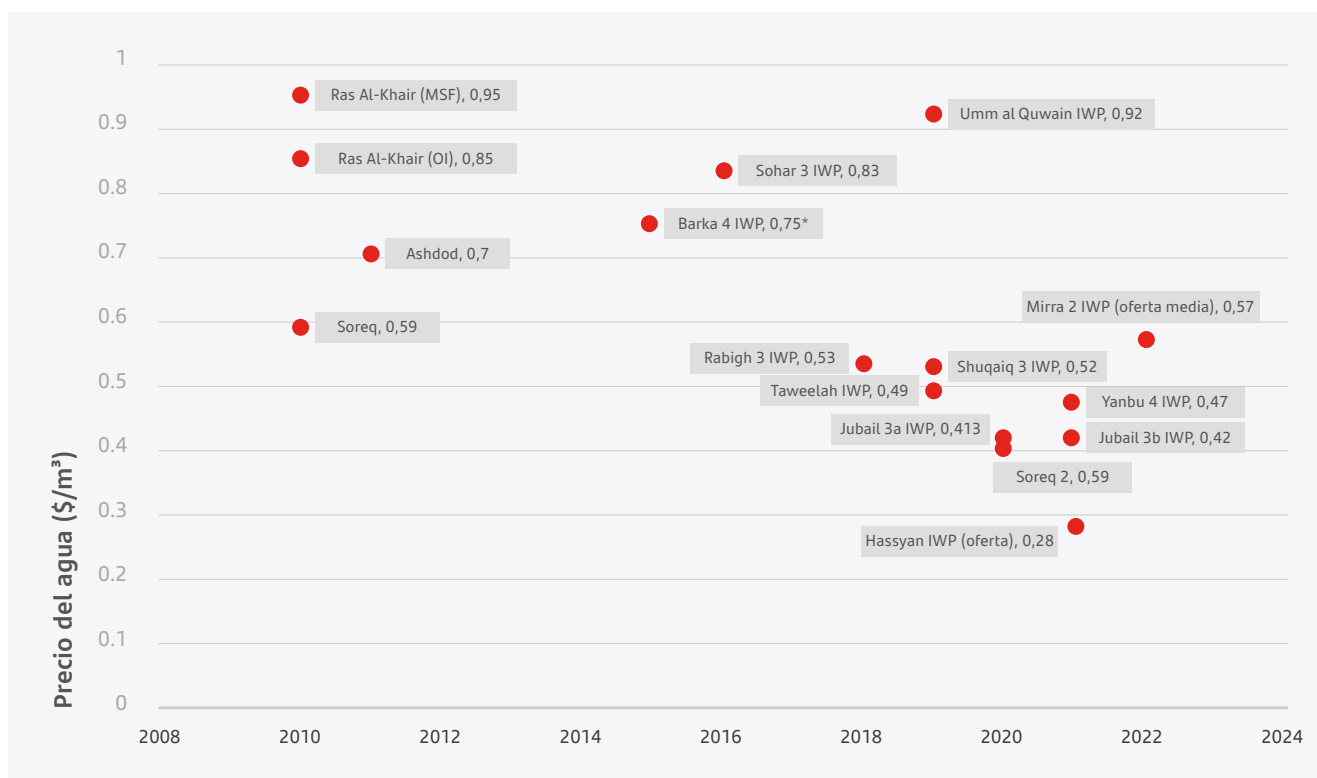
→ **El rendimiento.** La tecnología SWRO está evolucionando dinámicamente gracias a las mejoras en el rendimiento de la desalinización. Dado que el objetivo de la desalación es quitar la sal del agua para ponerla a disposición del consumo humano, la capacidad de rechazo de la salinidad es una manera básica de medir el rendimiento. La SWRO está demostrando ser la alternativa más competitiva en este aspecto, así como en la eliminación de ciertos elementos problemáticos para el consumo humano, sobre todo el boroⁱⁱⁱ. En consecuencia, se están mejorando los indicadores clave de rendimiento. Entre ellos destacan el coste unitario (€/m³), el consumo específico de energía (kWh/m³), la permeabilidad y la resistencia al ensuciamiento¹⁹. Este último indicador es particularmente importante, porque aborda lo que antes se ha identificado como el reto más inmediato para que la desalinización pueda propagarse.

→ **La eficiencia.** Como resultado de lo anterior, la huella energética de la SWRO ha disminuido hasta niveles cercanos a un consumo específico de energía de 2,5 y de 3,5 kWh/m³ de agua procesada para la etapa de ósmosis inversa y para todo el sistema, respectivamente.

Sin embargo, la energía necesaria para desalar agua de mar tiene un límite teórico cuyo valor aproximado es 1 kWh/m³, el cual está muy por debajo de la práctica actual. Hoy, los costes unitarios del sistema se sitúan en torno a 0,5-1,00 €/m³^{20,21}, dependiendo del tamaño y la financiación, alrededor del doble de los del agua potable procedente de fuentes de agua dulce (en concreto, la toma y el desagüe pueden suponer hasta el 20% de los costes de capital). Estas últimas cifras indican que queda bastante margen de mejora. En la figura 14 se representa una muestra de la evolución de los precios en proyectos de desalinización situados en Oriente Medio y África del Norte (región MENA, por sus siglas en inglés). Estos proyectos son, al mismo tiempo, más grandes y más baratos que nunca: el récord de 0,53 \$/m³ que se estableció en 2003 en Ashkelon (Israel) se superó varias veces en los años 2019-2020, y el nuevo récord lo ostenta actualmente IDE Technologies en Soreq 2 (Israel), que se adjudicó con una tarifa de 0,405 \$/m³. Las mayores tasas de recuperación, las economías de escala y la obtención de energía barata han sido claves para estas reducciones.

iii. Aunque el boro es un elemento necesario para el consumo orgánico, existe un límite para este: en 2009 la OMS lo fijó en 2,4 mg por litro y ciertos países exigen una concentración aún menor, siguiendo las directrices previas de la OMS de 0,5 mg por litro. El exceso de boro es sobre todo problemático para las plantas, por lo que resulta preocupante en el agua destinada al riego. Tradicionalmente, la tecnología de membranas de OI no lo ha eliminado con la suficiente eficacia. Por eso las mejoras en la eliminación del boro son especialmente valiosas para el sector.

Figura 14. Megaproyectos recientes de desalinización en la región MENA según el precio del agua (\$/m³)²²



Además de estas cifras y el aumento observado en el número de plantas desalinizadoras (cuyo total acumulado en 2020 llegó a unas 21.000), la capacidad de las plantas ha aumentado significativamente con el tiempo. Cada vez más, se prefieren las instalaciones extragrandes (con una capacidad superior a 50.000 m³ diarios) y se espera que en el futuro haya más. Esto significa que los sistemas de pretratamiento fiables y las herramientas de monitorización mencionados antes serán fundamentales en estas plantas, porque la limpieza automática *in situ* (CIP, por sus siglas en inglés) de los módulos de la membrana más de una vez al año es difícil. Sin embargo, esto no bastará y será necesario seguir trabajando en frentes concretos y potencialmente fructíferos que permitan mejorar la ósmosis inversa. A continuación, analizamos las vías más prometedoras en cinco áreas diferentes: la ciencia de materiales, los sistemas operativo y de procesos, el suministro de energía para el funcionamiento y las innovaciones en el pretratamiento y el postratamiento.

MEJORAS EN LOS MATERIALES

Se está realizando un trabajo considerable en la ciencia de materiales para mejorar el rendimiento de la SWRO mediante el desarrollo de membranas de alta permeabilidad, que permiten una superficie de membrana menor para una presión de funcionamiento determinada, y membranas antiensuciamiento, que permiten ciclos de funcionamiento más largos entre operaciones de limpieza CIP con menos residuos químicos procedentes de las soluciones de limpieza.

* IWP = Independent Water Project, Proyecto Independiente de Agua

Membranas antiensuciamiento. Para abordar lo que hemos calificado el problema permanente de la desalinización, en la fabricación de membranas se ha optado, en general, por modificar la superficie de las membranas convencionales mediante métodos físicos y químicos^{23,24}, entre los cuales está la creación de patrones superficiales, así como el desarrollo de membranas compuestas orgánicas/inorgánicas con buena resistencia al ensuciamiento.

En las versiones más recientes y prometedoras, los materiales con propiedades antiensuciantes se injertan en la superficie de la membrana o se utilizan para recubrirla, incluidos materiales que, por sus propiedades, son atraídos por el agua (es decir, son hidrófilos). Esto reduce la probabilidad de deterioro. Otra propuesta reciente que merece la pena considerar es la utilización de membranas poliméricas impregnadas de plata^{25,26} o nanopartículas de hierro²⁷, dirigidas a prevenir el deterioro provocado por el material biológico (es decir, el bioensuciamiento). Por último, aunque no menos importante, hay otro método que modifica la estructura interna de las membranas, de modo que su configuración geométrica se reorganiza para favorecer unas condiciones que reduzcan el ensuciamiento.

Membranas de alta permeabilidad. La fabricación de membranas con una permeabilidad mejorada puede reducir el consumo de energía²⁸ y aumentar la flexibilidad operativa, porque permiten obtener un flujo mayor a las presiones de funcionamiento típicas de la SWRO, o tasas de flujo comparables con presiones más bajas.

Las innovaciones en la ciencia de materiales han abierto este campo gracias a la fabricación de membranas de matriz mixta inorgánico-orgánicas hechas con nanocompuestos^{iv}, membranas diseñadas mediante biomímesis (es decir, enfoques de ingeniería que imitan o se inspiran en la observación de procesos naturales) y membranas de óxido de grafeno^{26,29}.

Sin embargo, hay que tener en cuenta dos problemas relacionados con la permeabilidad: en primer lugar, en la SWRO existe un límite para reducir la presión de la membrana, debido a la presión osmótica inherente del agua de mar, que es de unos 25 bares. En segundo lugar, es muy difícil fabricar membranas con una alta permeabilidad y mantener al mismo tiempo un elevado rechazo de sales (nótese que el rechazo nominal de sales de las membranas de OI es >99,7%), porque existe un equilibrio inherente entre la cantidad de agua que deja pasar la membrana y su capacidad para retener materiales salinos.

iv. Algunas de las principales propuestas basadas en nanocompuestos que deben tenerse en cuenta son: la impregnación de zeolitas, los marcos de óxido metálico y los biocidas como las nanopartículas de plata.

v. En este caso, las acuaporinas, canales sintéticos de agua y de iones, resultan especialmente interesantes.

NUEVAS CONFIGURACIONES DEL PROCESO

Además de los cambios en los materiales de las membranas, se están desarrollando nuevas configuraciones del proceso, por ejemplo, la ósmosis inversa en circuito cerrado y la ósmosis inversa con inversión de flujo, utilizando elementos estándar enrollados en espiral de SWRO, para conseguir una mayor recuperación de agua y reducir la formación de incrustaciones¹⁹.

El diseño de la configuración de los sistemas de membranas. Existen al menos dos configuraciones alternativas al sistema de ósmosis inversa estándar que, dados sus resultados recientes y potenciales, deberían llamar nuestra atención.

→ La **ósmosis inversa en circuito cerrado** es un modo de funcionamiento semicontinuo en el que, en lugar haber una entrada constante de agua, como ocurre en la ósmosis inversa convencional, el circuito permanece detenido un tiempo, después pasa por un ciclo de lavado y luego se reanuda la operación. La filtración de flujo cruzado se realiza mediante una bomba de circulación para limitar el ensuciamiento y la deposición de partículas e incrustaciones^{vi}. Los sistemas de circuito cerrado se proyectan para conseguir una reducción de entre el 15% y el 20% del consumo específico de energía, lo que sugiere que podría acercarse al horizonte de eficiencia de 2,0 kWh por m³ en la desalinización de agua de mar. En el caso del agua salobre, las simulaciones de los modelos calcularon un ahorro energético de hasta el 37% en la desalinización con una alta recuperación de agua³⁰, en comparación con la ósmosis inversa estándar. Sin embargo, esto tendría un coste, por que aumentaría la complejidad y sería necesaria una inversión adicional en la instalación. También hay que tener en cuenta que, hasta ahora, los sistemas de circuito cerrado para la desalinización de agua de mar solo se han implantado a una escala menor que la estándar.

→ **Modo operativo de ósmosis inversa con inversión de flujo.** Este modelo consiste en invertir periódicamente el sentido de la alimentación de agua, justo antes de que una solución con partículas no disueltas precipite y pase del concentrado a la membrana. El momento en que se hace lo determina la composición del agua de entrada y las condiciones de funcionamiento. Las incrustaciones se evitan controlando la solubilidad de un compuesto específico antes de que se produzca la precipitación, que está determinada por su tiempo de inducción^{vii}. Además de la ventaja de reducir o eliminar la necesidad de añadir productos químicos antical para controlar la formación de incrustaciones, también se consigue un aumento general de la recuperación de agua y una disminución de la salmuera residual, así como una limpieza CIP menos frecuente. Sin embargo, al igual que ocurre con los modelos de circuito cerrado, hasta ahora esta alternativa solo se ha implantado a una escala menor, si bien en este caso para la desalinización de agua salobre.

vi. Las incrustaciones son la precipitación de compuestos inorgánicos poco solubles (por ejemplo, carbonato de calcio) en la superficie de la membrana debido a la superación de los límites de solubilidad. Forman una capa densa con una gran resistencia hidráulica, lo que provoca una enorme reducción de la permeabilidad de la membrana.

vii. El tiempo transcurrido entre el inicio del estado de sobresaturación y el primer cambio observado en la concentración de uno de los parámetros, por ejemplo, el calcio o el pH.

LA DESALINIZACIÓN IMPULSADA POR ENERGÍAS RENOVABLES

Cuando la energía para la desalinización de agua de mar procede de combustibles fósiles, la huella de carbono de la desalación del agua de mar es considerable, de hasta 1 kg de CO₂ equivalente por cada kWh empleado, dependiendo de la combinación de combustibles fósiles. Esto ha fomentado el interés por las energías renovables^{31,33}, sobre todo por la solar, para impulsar la SWRO, así como otros métodos de desalinización. Las distintas opciones suelen centrarse en los colectores solares térmicos y la energía solar eléctrica (fotovoltaica), así como en las energías eólica y geotérmica. En el caso de la energía solar, sin embargo, existe un *trade-off* entre los costes de capital (la inversión en paneles o colectores solares térmicos) y los costes operativos (de energía). Además, una de las principales limitaciones de la energía solar es su intermitencia, por lo que requiere de almacenamiento o un refuerzo de la red eléctrica. Para superar este problema, se está estudiando un modelo híbrido innovador que combina las energías solar y geotérmica en un ciclo alterno de doce horas^{Viii}.

Ejemplo

Casos de éxito de plantas desalinizadoras alimentadas con energías renovables

La Ras Al-Khafji Desalination Solar Facility, la mayor planta de SWRO solar eléctrica del mundo (que desaliniza unos 60.000 m³ al día) está en Al Khafji, Arabia Saudí, junto a una central solar con una capacidad de 20 MW, pero también está conectada a la red eléctrica.

La instalación de SWRO de Perth, Australia, tiene una capacidad de 306.000 m³ diarios y su demanda de energía llega a los 3,6 kWh por m³ procesado. Se alimenta indirectamente de energía eólica y solar. El consumo total de energía de la planta se compensa con la producción energética del parque eólico de Mumbida^{ix}, que cuenta con 34 turbinas que producen 85 MW, y el parque solar de Greenough (que produce un total de 40 MW), frente a los 85 MW que necesita la planta. El modelo de la planta desalinizadora de Perth se basa en compensar el consumo de energía con conexiones a la red.

Viii. Otra posibilidad, relacionada con esta, sería integrar la recuperación y la utilización del calor residual para sustituir la energía solar térmica e impulsar formas alternativas de desalinización: tanto la destilación por membrana como la ósmosis forzada termolítica solo necesitan calor residual de bajo grado (60-80 °C) o energía solar térmica

ix. mumbidawindfarm.com.au

INNOVACIONES EN EL PRETRATAMIENTO

El pretratamiento convencional del agua de mar suele consistir en una filtración de medio dual que utiliza antracita y arena, seguida de una filtración por cartucho. Sin embargo, aparte de ayudar a que no se ensucien las membranas, como se ha indicado en el apartado anterior, en la actualidad se están aplicando sistemas de pretratamiento más fuertes que responden a unas difíciles condiciones de calidad del agua. Por ejemplo, debido a la floración de algas nocivas, que contaminan cada vez más las masas de agua de todo el mundo.

- La **membranas de ultrafiltración** han demostrado su resiliencia ante los fenómenos de floración de algas nocivas adaptándose a las condiciones de funcionamiento, por ejemplo, mediante la coagulación en línea, la reducción de la tasa de flujo para controlar la formación de suciedad y el retrolavado más frecuente.
- La **flotación por aire disuelto** también ha demostrado su utilidad para eliminar el aceite y la grasa asociados al efecto que tienen los canales de transporte en la calidad del agua de mar. Funciona mediante la introducción de aire a presión en el agua y su posterior liberación a presión atmosférica. Si funciona de manera correcta, las partículas indeseables flotan junto con el aire liberado y luego son definitivamente eliminadas mediante una membrana u otro tipo de filtro.
- Existe un interés creciente por los **efectos subsuperficiales**, como los que se producen en el fondo del mar, dada su capacidad para proporcionar un pretratamiento para la SWRO mediante la mera biodegradación de sustancias orgánicas.
- Cada vez existe un mayor consenso en que los **biopolímeros** y las **partículas exopoliméricas transparentes** (TEP, por sus siglas en inglés) son los principales ensuciantes orgánicos de los sistemas de SWRO, y que las TEP sirven como precursoras del bioensuciamiento de las membranas de SWRO^{33,34} favorecido por el carbono orgánico asimilable³⁵. La eliminación de estos componentes mediante el pretratamiento reduce la necesidad de precloración (para controlar el crecimiento de vida marina dentro de la tubería que va desde la toma hasta la planta desalinizadora) y de dechloración^x antes de la etapa de ósmosis inversa, un tratamiento que de por sí resulta costoso y arriesgado. **El carbonato de calcio** sigue siendo el principal incrustante; sin embargo, estudios recientes han demostrado que la dosificación de ácido o la adición de productos antical puede interrumpirse o reducirse significativamente, porque el concentrado de la SWRO está subsaturado de carbonato de calcio o tiene una cinética de precipitación muy lenta^{36,37}.

x. Las membranas de OI, al entrar en contacto con cloro libre, pierden la capacidad de rechazar sales, y por lo tanto es necesario añadir metabisulfito de sodio para neutralizar el cloro libre añadido en la entrada.

Entre las incipientes estrategias para el control de las incrustaciones están:

- gestionar la recuperación de la primera etapa de ósmosis inversa para permitir únicamente la adición de ácido;
- cuando sea necesario, utilizar un producto antical biodegradable (por ejemplo, carboximetil inulina³⁸);
- considerar el pretratamiento por nanofiltración para la eliminación de iones divalentes; y
- considerar nuevas configuraciones de proceso como las ya descritas.

HERRAMIENTAS DE MONITORIZACIÓN

- El **índice de ensuciamiento modificado con membranas de ultrafiltración** MFI-UF, por sus siglas en inglés) en funcionamiento a flujo constante incorpora los efectos de i) la deposición de partículas en las membranas de OI, ii) el efecto de la tasa de flujo de filtración en el desarrollo del ensuciamiento, y permite predecir la tasa de ensuciamiento por partículas en los sistemas de membranas de OI. El MFI-UF supera las deficiencias y las limitaciones del índice de densidad de sedimentos (SDI, por sus siglas en inglés), que se utiliza en el sector de la desalinización como indicador de la calidad del agua de alimentación para la OI^{39,40,41}.
- Todavía no hay disponibles métodos sencillos, fiables y precisos para evaluar en qué medida se reduce el **potencial de ensuciamiento biológico** durante el pretratamiento en el caso del agua de mar. Recientemente, se ha desarrollado un nuevo método de laboratorio basado en el adenosín trifosfato (ATP) para medir el potencial de crecimiento bacteriano (BGP, por sus siglas en inglés) utilizando el consorcio bacteriano nativo del agua de mar y nuevos reactivos capaces de trabajar en condiciones de fuerza iónica alta. Se observó una buena correlación entre el BGP medido en el agua de alimentación de la SWRO y el aumento de la caída de presión en los sistemas de SWRO, lo que sugiere que puede ser conveniente utilizar el método BGP basado en el ATP como indicador de bioensuciamiento en la SWRO. Se propuso preliminarmente un nivel seguro de BGP (<70 µg/L) para el agua de alimentación de la SWRO para asegurar una frecuencia de limpieza química igual o inferior al año.

Estas *nuevas* herramientas de monitorización pueden permitir a los ingenieros, los operadores de plantas y los científicos diseñar mejores plantas y, además, mejorar la gestión y la monitorización del ensuciamiento biológico y de partículas en los sistemas de SWRO.

05

Conclusiones

La demanda mundial de agua ha aumentado en las últimas décadas debido al crecimiento de la población, el incremento de la demanda de agua per cápita, la ampliación de los sistemas de riego y el desarrollo económico. Además, la desigual distribución de las precipitaciones, la contaminación de los recursos hídricos, la desigual distribución de la población y del consumo de agua han aumentado aún más la escasez regional de agua. Aunque la desalinización se utiliza comúnmente para producir agua dulce a partir de agua de mar, también puede emplearse para tratar aguas ligeramente saladas (salobres), aguas superficiales y subterráneas contaminadas y aguas residuales.

La mayor capacidad de desalinización del mundo se encuentra en Oriente Medio y África del Norte, pero debido a la escasez de agua, la sequía, la creciente demanda, etc., muchos países de Asia y América Latina están recurriendo a la desalinización para satisfacer la demanda de agua que necesitan, ya sea para la industria, el uso doméstico o el riego. Las tecnologías de desalinización no solo pueden producir una cantidad suficiente de agua, sino hacerlo con una calidad muy buena debido a la capacidad de eliminación de sales y contaminantes.

De los distintos métodos de desalinización termal y basada en membranas, la ósmosis inversa domina el mercado, porque tanto sus costes de inversión como el consumo de energía son menores que en los procesos termales. La demanda de energía es un aspecto importante del coste total de la desalinización y, por lo tanto, las nuevas innovaciones que sean capaces de reducirla tendrán un impacto significativo en el sector. En la actualidad, las fuentes de energía renovables se utilizan para compensar el consumo de energía de la red eléctrica. Los parques solares y los eólicos contribuyen a que el sector de la desalinización sea más sostenible.

Otro aspecto importante es el funcionamiento estable de las plantas desalinizadoras, que se ve dificultado por el ensuciamiento de la superficie de la membrana y la obstrucción de los espaciadores para el agua de alimentación que se encuentran dentro de los elementos de las membranas. El pretratamiento, ya sea convencional o avanzado, desempeña un papel importante en el control de la calidad del agua que alimenta las membranas de OI. Unos sensores sensibles a la calidad del agua pueden contribuir a monitorear el rendimiento y el control del pretratamiento.

La superación de estos problemas no es la única limitación para la implantación plena de la desalinización. También existen cuestiones menos técnicas, como el desarrollo de las capacidades del personal del sector de la desalinización, que tiene un papel relevante en el funcionamiento sostenible y exitoso a largo plazo de las plantas desalinizadoras.

Sigue quedando un último problema, que es la eliminación adecuada de la salmuera o el agua concentrada producida por la ósmosis inversa durante la eliminación de las sales presentes en el agua. Existen varias iniciativas destinadas a valorizar las salmueras para recuperar minerales como el litio, el magnesio, el escandio, etc.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la desalinización desempeñará un papel clave en el ciclo del agua, incluso en un futuro próximo. Si se recurre a líneas de investigación multidisciplinarias, los retos técnicos podrán resolverse en un tiempo previsible, aunque seguirán siendo importantes, al igual que las cuestiones no técnicas.

La desalinización ha superado las primeras fases de desarrollo y es una tecnología madura de agua potable, que seguirá ampliando su contribución para satisfacer la demanda mundial de agua limpia y segura.

Referencias

1. UNESCO, UN-Water (2020). *The United Nations World Water Development report 2020: water and climate change*, Paris, UNESCO.
2. UN-Water (2020). *Analytical Brief on Unconventional Water Resources*. Geneva, Switzerland.
3. FAO (2013). *Coping with Water Scarcity: An Action Framework for Agriculture and Food Security*. FAO Water Reports No. 38, Rome, FAO.
4. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2020). *The Sustainable Development Goals Report 2020*. United Nations Publications, New York, NY, 10017, United States of America.
5. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, and Population Division (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423)*.
6. UNESCO, UN-Water (2021). *The United Nations World Water Development report 2021: Valuing Water*, Paris, UNESCO.
7. Salinas Rodríguez, S.G., et al. (2021). *Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling*. 1st ed. London: IWA Publishing. 300.
8. Sanz, M.A. (2020) *Disruptive water and desalination, in Technology Innovation Pioneers (TIP)*. UAE, Abu Dhabi.
9. Bremere, I., et al. (2001) *How water scarcity will effect the growth in the desalination market in the coming 25 years*. *Desalination*, 138(1), 7-15.
10. Dhakal, N., et al. (2022) *Is Desalination a Solution to Freshwater Scarcity in Developing Countries?* *Membranes*, 12(4), 381.
11. UN Ocean conference (2020). *Facts-figures: People and Oceans*. UN Ocean Conference. Available from: <https://www.un.org/en/conferences/ocean2020/facts-figures>. [04.08.2020]
12. United Nations (2017) *Factsheet: People and Oceans, in The Ocean Conference*, UN Editor, New York.
13. UN-OHRLLS (2015). *Small island developing states in numbers - Climate change edition 2015*. Available from: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/2189SIDS-IN-NUMBERSCLIMATE-CHANGE-EDITION_2015.pdf. [04.08.2020]
14. Global Water Intelligence, 32nd Worldwide Desalting Plant Inventory. 2020, Media Analytics Ltd.
15. DesalData (2022). *Desalination Plants Inventory - Global market forecast*, Global Water Intelligence

Referencias

16. Lattemann, S., Höpner, T. (2008). *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination*. Desalination, 220(1), 1-15.
17. Dawoud, M.A., Al Mulla M.M. (2012). *Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study*. International journal of environmental and sustainability, 1(3), 22-37.
18. Lattemann, S., et al. (2012). *Environmental and Performance Aspects of Pretreatment and Desalination Technologies, in Advances in Water Desalination*, N. Lior, John Wiley & Sons, 79-195
19. Amy, G.L., et al. (2021). *Chapter 10 – Recent advances in SWRO and emerging membrane-based processes for seawater desalination, in Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pretreatment of Fouling and Scaling*, S.G. Salinas Rodriguez, et al., (Eds.). IWA Publishing: London.
20. Salinas Rodriguez, S.G. and J.C. Schippers (2021) *Ch 01 - Introduction to desalination, in Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling*. S.G. Salinas Rodriguez, et al., (Eds.). IWA Publishing: London. 26.
21. Voutchkov, N. (2018) *Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends*. Desalination, 431, 2-14.
22. Birch, H., Pankratz, T. (2022) *Desalination 2022 Q4 market update*, Global Water Intelligence, DesalData.
23. Choudhury, R.R., et al. (2018) *Antifouling, fouling release and antimicrobial materials for surface modification of reverse osmosis and nanofiltration membranes*. Journal of Materials Chemistry A, 6(2), 313-333.
24. Shahkaramipour, N., et al. (2017) *Membranes with Surface-Enhanced Antifouling Properties for Water Purification*. Membranes, 7(1), 13.
25. Jeon, S., Lee, H.J. (2020) *Rationally designed insitu fabrication of thin film nanocomposite membranes with enhanced desalination and anti-biofouling performance*. Journal of Membrane Science, 615, 118542.
26. Saleem, H., Zaidi, S.J. (2020). *Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review*. Desalination, 475, 114171.
27. Armendáriz-Ontiveros, M.M., et al. (2022) *Optimal loading of iron nanoparticles on reverse osmosis membrane surface to reduce biofouling*. Desalination, 540, 115997.
28. Lim, Y.J., et al. (2022). *Assessing the potential of highly permeable reverse osmosis membranes for desalination: Specific energy and footprint analysis*. Desalination, 533, 115771.

Referencias

29. Pendergast, M.M., Hoek, E.M.V. (2011). *A review of water treatment membrane nanotechnologies*. Energy & Environmental Science, 4(6), 1946-1971.
30. Warsinger, D.M., et al. (2016). *Energy efficiency of batch and semi-batch (CCRO) reverse osmosis desalination*. Water Research, 106, 272-282.
31. Ghaffour, N., et al. (2015). *Renewable energydriven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems*. Desalination, 356, 94-114.
32. Ghaffour, N., et al. (2014). *Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies*. Applied Energy, 136, 1155-1165.
33. Alayande, A.B., et al. (2022). *Fouling control in SWRO desalination during harmful algalblooms: A historical review and future developments*. Desalination, 543, 116094.
34. Villacorte, L.O., et al. (2017). *Biofouling in capillary and spiral wound membranes facilitated by marine algal bloom*. Desalination, 424, 74-84.
35. Qasim, M., et al. (2019). *Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review*. Desalination, 459, 59-104.
36. Waly, T., et al. (2012). *The role of inorganic ions in the calcium carbonate scaling of seawater reverse osmosis systems*. Desalination, 284, 279-287.
37. Waly, T. (2011). *Minimizing the use of chemicals to control scaling in SWRO*. Taylor & Francis, London.
38. Yu, W., et al. (2020). *Antiscalants in RO membrane scaling control*. Water Research, 183, 115985.
39. Salinas Rodríguez, S.G., et al. (2019). *Monitoring particulate fouling of North Sea water with SDI and new ASTM MF10.45 test*. Desalination, 454, 10-19.
40. Salinas Rodríguez, S.G., et al. (2015). *The Modified Fouling Index Ultrafiltration Constant Flux for assessing particulate/colloidal fouling of RO systems*. Desalination, 365, 79-91.
41. Schippers, J.C., et al. (2014). *Why MFI is edging SDI as a fouling index, in Desalination & Water Reuse*. Faversham House with the cooperation of the International Desalination Association: UK, 28-32.

esade

Santander X Innovation
Xperts

www.santander.com/santander-x-innovation-xperts-es

By  Santander