

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE DESALINIZACIÓN Y SU DESARROLLO EN MÉXICO

• Germán Eduardo Dévora-Isiordia* • Rodrigo González-Enríquez •
• Saúl Ruiz-Cruz •

Instituto Tecnológico de Sonora, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Existen diversos procesos de desalinización y se diferencian por costos, impacto ambiental, calidad del producto y energía consumida. Mediante comparación entre procesos térmicos y de membranas se encontraron las diferentes tecnologías existentes para desalar agua de mar, número de plantas instaladas, tecnología utilizada, fuentes de abastecimiento y uso del agua desalinizada. La factibilidad técnica y principal objetivo del trabajo consistió en la comparación de los sistemas de desalinización térmicos y de membranas respecto a costos de producción en USD/m³ y consumo energético en kWh/m³. Los procesos de desalinización se realizan desde 1970, siendo por membrana: ósmosis inversa (OI), electrodiálisis (ED), nano filtración (NF); por sistemas térmicos: destilación múltiple etapa (MED), destilación *flash* múltiple etapa (MSF) y destilación solar (DS). De las 13 000 plantas instaladas, el 50% es de OI, 33% NF, 1% MED y 4% MSF. Las fuentes de abastecimiento más utilizadas son agua de mar (60%) y agua salobre (22%). Los sectores beneficiados con agua desalinizada son el municipal (66%) e industrial (23%). El tipo de tecnología que requiere menor consumo energético es OI, de 2 a 2.8 kWh/m³ y costo de 0.6 USD/m³; las tecnologías MED y MSF consumen de 3.4 a 4 kWh/m³ y de 5 a 8 kWh/m³, respectivamente, con un costo de producción de 1.5 USD/m³ y 1.10 USD/m³. La comparación entre tecnologías permite determinar que el consumo energético y costo de producción de OI es menor y con mayor producción de agua desalinizada; además presenta ventajas significativas sobre el resto debido a que no requiere cambios de estado, como en MED y MSF. La OI es el proceso más viable en producción, energía consumida y costo.

Palabras clave: ósmosis inversa, electrodiálisis, destilación, desalinización, calidad del agua, cationes, aniones.

Introducción

El agua es un compuesto esencial para la vida y las actividades que se efectúan en pro del sustento del ser humano, como los procesos industriales, y la producción agrícola y ganadera, entre otros; este líquido también es un factor influyente para impulsar la economía de un país; sin embargo, ya se están presentando problemas en la actualidad por el déficit del vital elemento, ya que el tamaño de la población es muy grande y esto origina grandes esfuerzos para abastecer de agua a todos, incluyendo a los sectores productivos, por ello la preocupación

mundial por la escasez de agua es inobjetable y cada día se encuentran más problemas por falta de agua dulce y procesos que contaminan e impactan al medio ambiente (Valencia, 2000).

Las proporciones de agua en la Tierra, según Al-Sofi (2001), indican que solamente el 2.5% representa agua dulce y de ésta, el 68.7% corresponde a los glaciares, los cuales no pueden ser utilizados para obtener agua dulce, ya que son parte fundamental de los ecosistemas de la hidrosfera; en las aguas superficiales y atmosféricas, los lagos de agua dulce representan el 67.4%, pero la mayor parte está contaminada; el consumo de agua dulce se utiliza para la

agricultura y la industria, y sólo el 10% es de uso doméstico (Lechuga, 2007).

Nogueira (2011) menciona que la población del mundo en estos dos últimos siglos ha aumentado con rapidez, para dar un total de alrededor de 6 700 millones de seres humanos. El problema no se detiene allí. En la actualidad, la población mundial crece a un ritmo de 78 millones de personas al año. Inclusive, de mantenerse las tasas de natalidad invariables, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) calcula que la población mundial para el año 2050 será de 11 900 millones de personas.

En México, la escasez de agua también ha limitado el desarrollo económico y social del país (Sánchez *et al.*, 2008). Cada vez es menor la proporción de agua que pueden poseer los mexicanos. La disponibilidad natural media per cápita, que resulta de dividir el valor nacional entre el número de habitantes, ha disminuido de 9 880 m³/hab/año en 1970 a tan sólo 4 312 en el 2007, y una proyección a 3 822 m³/hab/año para el año 2025 (cuadro 1). Bajo este contexto, instancias gubernamentales están viendo la manera de solucionar el problema de déficit de agua a través de varias opciones, una de ellas es la desalinización.

Así, se han buscado soluciones para aportar agua en el corto y mediano plazos. Si bien no se puede obtener agua de forma directa, sí por medio de distintas tecnologías (Medina, 2000). La desalinización se vislumbra como una tecnología viable que aporta agua al ciclo hidrológico y que no compite con otros sistemas, como los trasvases.

Desalinización

En el siglo pasado se empezaron a utilizar algunos destiladores pequeños en barcos. Las primeras unidades para producir agua para consumo humano en gran escala usaban la tecnología de destilación en múltiples efectos con tubos sumergidos, donde la seguridad de funcionamiento era más importante que el costo del agua producida. En la década de 1940, aparecen en Kuwait, Aruba y las Antillas Holandesas, los primeros destiladores de 1 o 2 m³/d para uso en barcos. En la década de 1950 se inician las primeras investigaciones sobre desalinización, con el objeto de construir grandes instalaciones de producción de agua dulce, y se obtienen resultados importantes, como el sistema de destilación súbita en 1957, lo que permite construir la primera planta comercial en 1960 (Custodio, 1976). Hoy día, el agua desalinizada se utiliza para consumo humano, en procesos industriales y, en forma muy limitada, para riego agrícola, pues los costos de desalinizar agua son relativamente altos para usar este líquido con los métodos tradicionales de riego; resulta más económico importar los productos agrícolas de aquellos países que cuentan con las condiciones climatológicas adecuadas para producirlos.

Medina (2000) menciona que la desalinización consiste en un proceso de separación de sales disueltas de aguas salobres o de mar para convertirlas en aguas adecuadas para consumo humano, industrial o de riego. Existen diversas tecnologías desarrolladas

Cuadro 1. Disponibilidad natural media de agua per cápita en el país (1970-2025).

Disponibilidad (m ³ /hab/año)	Año	Escala de clasificación
9 880	1970	Media
7 128	1980	Media
5 864	1990	Media
4 708	2000	Baja
4 250	2010	Baja
3 822	2025	Baja

Fuente: Conagua (2005).

Cuadro 2. Clasificación de los procesos de desalinización.

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación solar Destilación súbita <i>flash</i> Destilación multiefecto Termocompresión de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos Congelación
	Mecánica	Evaporación Filtración	Compresión mecánica de vapor Ósmosis inversa
Sales del agua	Eléctrica Química	Filtración selectiva Intercambio	Electrodialisis Intercambio iónico

Fuente: Lattemann y Hoepner (2007).

en la actualidad para desalinizar el agua de mar y aunque tienen características distintas de acuerdo con el tipo de energía, diseño y producción que requiere cada una, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua de mar; ello permite distinguir entre los procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de las sales de la solución (cuadro 2).

La disponibilidad de agua no implica que su calidad permita el uso. La contaminación natural y por el hombre han provocado que sea necesario tratarla antes de destinarla a consumo humano, agrícola o industrial. La calidad del agua varía de acuerdo con la región y el tipo de subsuelo de los contaminantes (cuadro 3).

Cuadro 3. Salinidad de diferentes tipos de agua.

Agua	SDT (mg/L)
Ultrapura	0.03
Pura	0.30
Desionizada	3.00
Potable	< 1 000.00
Salobre	1 000.00 - 10 000.00
Salina	10 000.00 - 30 000.00
Marina	30 000.00 - 50 000.00

Fuente: Valero (2001).

Debido a la gran importancia que ha despertado el proceso de la desalinización de agua de mar para poder hacerla apta para consumo humano y como una solución al desabasto de agua en el mundo, existen varias estrategias que estudian este proceso, mismas que se explican a continuación.

Tecnología de la desalinización

El sistema de desalinización consiste en alimentar agua salobre o marina a una planta desaladora, que tiene como función acondicionar y eliminar sales al agua para obtener un producto, y un rechazo o salmuera (figura 1). La desalinización de agua salobre y de mar se realiza con dos sistemas principalmente: los que utilizan el uso de combustibles fósiles, como los sistemas térmicos, y por otro lado, los que utilizan membranas y alta presión.

Al-Sahali (2007) menciona que los costos de desalinización por unidad de agua producida varían ampliamente, y obedecen al tipo de agua salobre o de mar de alimentación, y a la cantidad de energía necesaria en el sistema de desalinización elegido. Los costos para acondicionar el agua en un sistema tradicional van de 3.18 a 8.01 pesos/m³. Cuando se utiliza la desalación y la alimentación es agua salobre, el costo va de 5.31 a 10.62 pesos/m³; cuando la alimentación es de agua de mar, el costo varía de 10.62 a 24 pesos/m³. Por otra parte, cuando

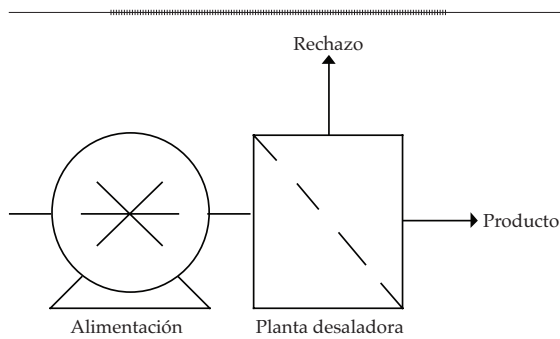


Figura 1. Esquema de un sistema de desalinización.

se combina el sistema tradicional con agua salobre, el costo es de 4.24 a 9.73 pesos/m³; cuando se trata de agua de mar con el sistema tradicional, el costo es de 3.92 a 10.79 pesos/m³ (AMTA, 2012).

Sistemas térmicos

Los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de estado del líquido a vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que tenga el agua y es el proceso en el cual el agua de mar se calienta hasta evaporarla; después el vapor se condensa formando agua dulce y el agua sobrante se desecha como salmuera concentrada (Porta *et al.*, 2002; Hiriart, 2007). Entre los principales sistemas de destilación se cuentan la destilación por compresión mecánica de vapor (MVC), destilación relámpago *flash* multietapa (MSF) y destilación multiefecto (MED). Las instalaciones de destilación pueden producir agua en un rango de entre 1 y 50 miligramos de sólidos disueltos (TDS) por litro (WHO, 2007).

Destilación por compresión mecánica de vapor (MVC)

Los sistemas MVC funcionan comprimiendo vapor de agua, lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo), lo cual permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie, resultando en la vaporización de ésta. El compresor es

el requerimiento de energía principal. El compresor aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición (Cipollina, 2005).

En la figura 2 se tiene un esquema del funcionamiento de un equipo que desaliniza agua marina por medio de compresión de vapor, donde se utiliza un elemento calefactor en una caldera y se comprime el vapor para obtener agua con una disminución considerable de sales.

Destilación flash multietapa (MSF)

Las plantas MSF constituyen una gran parte de la capacidad de desalinización mundial. En este proceso, el agua de mar es calentada en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente; después se pasa a otro tanque, llamado etapa, donde la presión reducida permite que el agua hierva. El agua vaporizada es enfriada y condensada para obtener el producto. Khawaji (2008) menciona que el calor latente liberado en la condensación del vapor es utilizado para calentar la salmuera en otra etapa; el producto destilado se colecta en cascada, en cada uno de los tanques colocados en paralelo con la salmuera y se bombea a un tanque de almacenamiento. La tasa de producción depende de la temperatura del agua salada y del número de etapas que se lleven a cabo. El agua desalinizada en este proceso contiene por lo general de 2 a 10 ppm de sólidos disueltos, por lo tanto es remineralizada por potabilización (figura 3).

Las plantas MSF se caracterizan por requerir altos volúmenes y flujo de agua disponible para tratar problemas de corrosión y mineralización en la planta, y altas tasas de uso de químicos en el tratamiento del agua (Valero, 2001).

Destilación multiefecto (MED)

Las plantas MED se configuran con base en tubos verticales u horizontales. El vapor

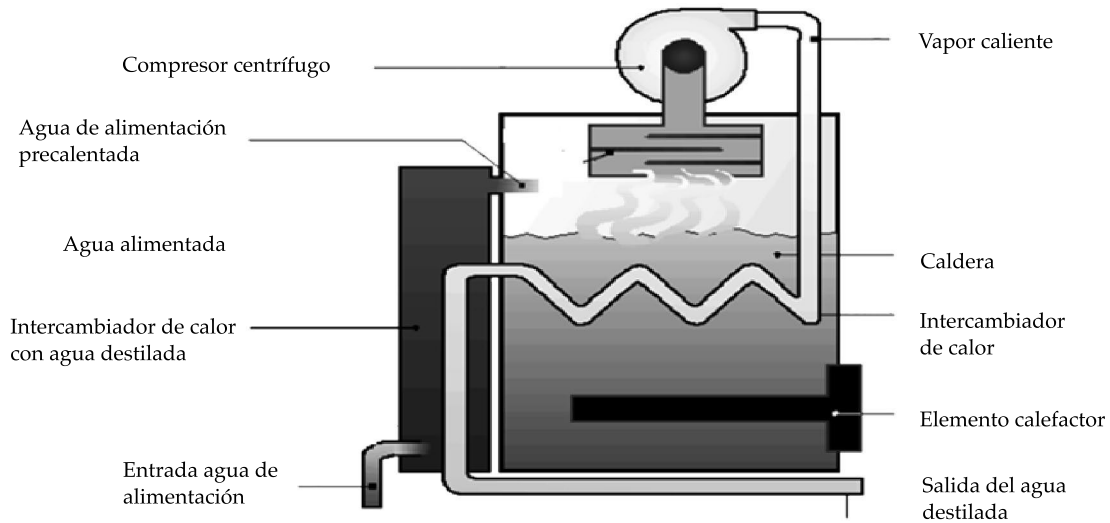


Figura 2. Esquema de destilación por compresión mecánica de vapor. Fuente: Norland Int'l (2004).

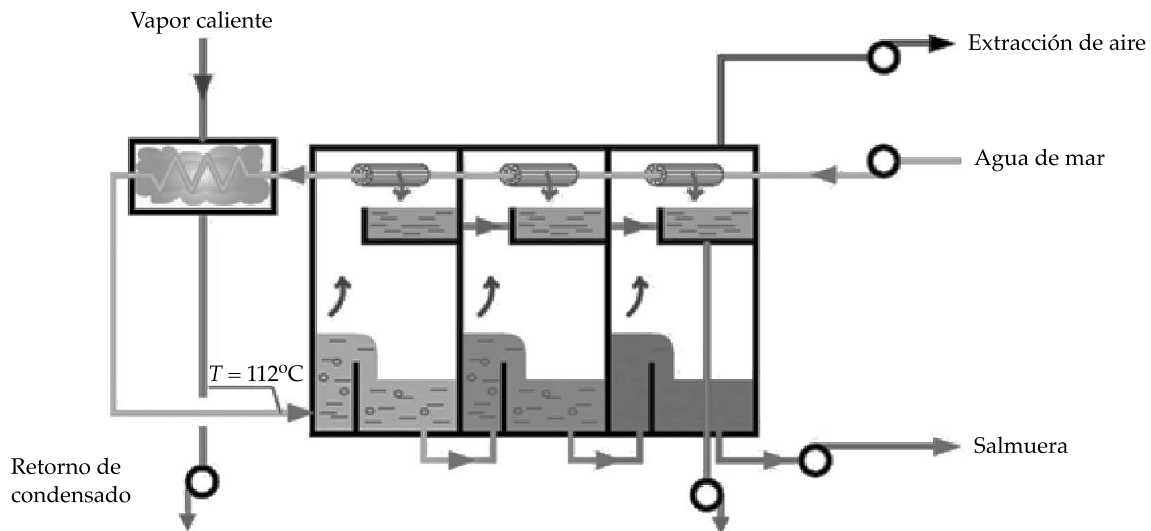


Figura 3. Procesos de desalinización mediante MSF. Fuente: Veolia (2011).

se condensa en un lado de un tubo, lo que ocasiona la evaporación de agua salada en el otro lado. En la configuración más común de este proceso, el agua salina, al evaporarse, es distribuida sobre la superficie exterior de tubos calentados. Dentro de cada efecto MED se rocía agua marina fresca sobre un grupo de tubos de intercambio térmico mientras el vapor que fluye

a través de los tubos se condensa, volviéndose agua pura. Fuera de los tubos, la delgada película de agua marina hierve a medida que absorbe el calor del vapor. El vapor resultante pasa a través de eliminadores de rocío para atrapar gotas de salmuera remanentes antes de que el vapor se introduzca en los tubos para el próximo efecto. El proceso se repite a través

de toda la planta. También están disponibles configuraciones MED alternativas que emplean tubos verticales o superficies de transferencia de calor planas (WHO, 2007).

La presión se reduce de forma secuencial en cada efecto a medida que la temperatura se reduce; se proporciona más calor en cada etapa para mejorar el desempeño del proceso. Este tipo de instalaciones cubre grandes superficies (figura 4).

Desalinización solar

En México, según reporta Dévora (2007), hay 436 plantas desalinizadoras ubicadas en 320 lugares, con capacidad instalada de 311 377 m³/d, pero del total de plantas instaladas, sólo 13 son por el método de destilación y únicamente cinco utilizan energía solar como fuente energética. De las plantas desalinizadoras que utilizan energía solar, sólo tres utilizan el método de destilación y energía solar simultáneamente, y siete emplean energía solar aplicada a otros procesos de desalación.

El calentamiento de agua con energía solar es una alternativa viable y probada en México y el resto del mundo (Conae, 2007), donde el dispositivo para destilación por medio de placa

plana es el más utilizado en México cuando se pretende utilizar al Sol como fuente de calentamiento.

Por otro lado, la desalinización solar en el país se utiliza desde 1970 en la Paz, Baja California Sur. Esta planta fue un proyecto entre Alemania y México, que utilizaba energía solar acoplada a un sistema MSF, utilizando colectores de concentración lisos y parabólicos. Posteriormente, a principios de 1980, se instaló otra planta en Las Barrancas, localidad en el mismo estado. Este proyecto se implementó como un sistema integral, que incluyó agua desalada para varios usos; pero al terminar el convenio, las dos plantas desalinizadoras quedaron en el abandono (Bermúdez y Thomson, 2008).

En esa misma década se realizaron investigaciones y se construyeron diferentes tipos de colectores solares de concentración para agricultura y para abastecer a la población.

Hoy día existen diferentes tipos de sistemas solares para desalación en la nación; la mayor parte se encuentran en el estado de Baja California, donde las condiciones climáticas y la energía solar presente durante todo el año permiten que se instalen desde celdas fotovoltaicas para acoplarse a sistemas de

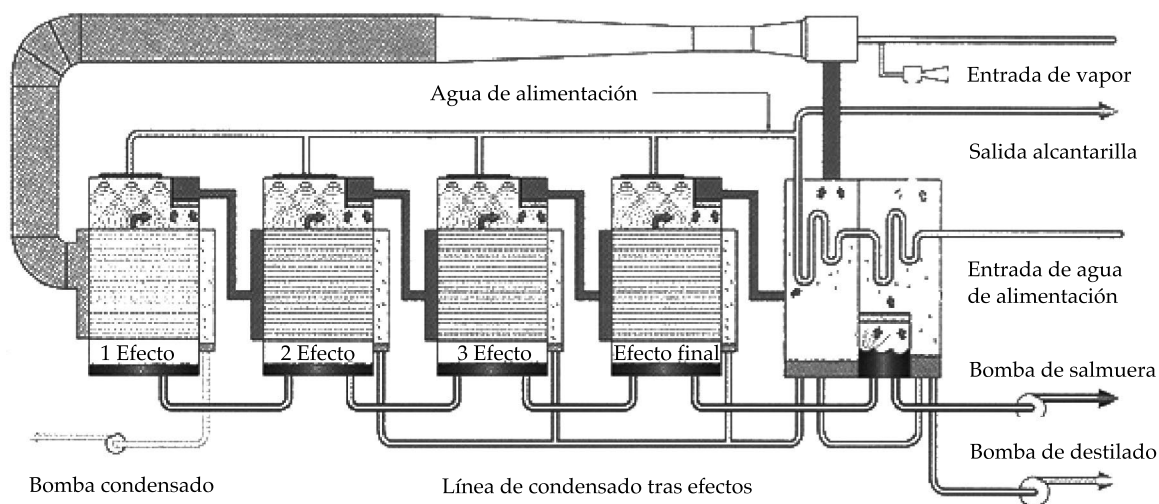


Figura 4. Procesos de destilación multiefecto (MED). Fuente: Cetenma (2008).

ósmosis inversa hasta sistemas con colectores de concentración para ensamblarse a desaladoras de tipo MED y MSF (Bermúdez y Thomson, 2008), o incluso para la agricultura (Fernández y Chargoy, 2003), aplicados para el aprovechamiento óptimo del agua, o en lugares donde el líquido no es abundante o no está en condiciones aptas para el cultivo.

Sistemas por membranas

La desalinización de agua de mar por medio de membranas es un proceso que separa el agua salina en dos vertientes: una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y una corriente de salmuera concentrada. Los sistemas más utilizados son ósmosis inversa y electrodiálisis.

Osmosis inversa

Este proceso aplica presión para superar la presión osmótica del agua a tratar. El proceso de ósmosis inversa es quizá el método más sencillo para desalar y el que parece acercarse a los mejores rendimientos energéticos. El sistema toma su nombre por realizarse el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales. Es decir, las

soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas, a través de una membrana semipermeable, con la necesidad de aplicar una fuerza externa para lograr la separación del agua de las sales (Arreguín, 2000).

Por tanto, cuanto mayor sea la salinidad del agua, mayor será su presión osmótica a superar. Consta de obra de toma para captación de agua de mar, seguido de un sistema de pretratamiento físico y químico, consistente en filtros de arena y filtros de carbón activado (físico); dosificación (química) para regular el pH del agua de alimentación, y adición de anticrustantes para evitar depósitos de sal en las membranas; así como bastidores de membranas de ósmosis inversa para eliminar las sales. Desalinizada el agua, se conecta un tren de postratamiento para desinfectar el agua, usando de manera individual y de acuerdo con el uso final del agua producto, lámparas UV, cloración y ozonación, lo que permite asegurar la calidad del agua en líneas de distribución y almacenamiento. Debido al arreglo en serie o paralelo de las membranas, el espacio ocupado por la planta es pequeño, lo cual es una ventaja respecto a los sistemas térmicos (figura 5).

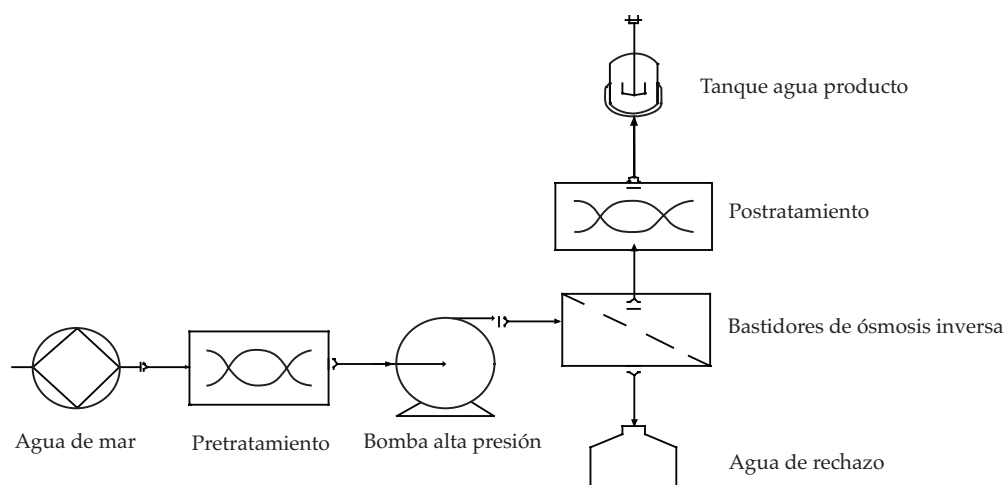


Figura 5. Esquema general de una planta de ósmosis inversa.

Electrodiálisis

La tecnología de electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímico, donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico (figura 6), por medio de un campo de corriente continua (Belfort, 1984; Mani, 1991).

En este proceso, las sales disueltas ionizadas atraviesan las membranas y de esta forma se eliminan las partículas cargadas eléctricamente; no produce una total eliminación de sales, sino que en la práctica, la reducción de salinidad es del orden del 40%. Para efectuar una determinada reducción se dispone de una cascada de células de electrodiálisis. Este proceso puede competir de forma ventajosa con la destilación para aguas de baja salinidad (salobres), pero no con el agua marina. La explicación reside en que mientras en los procesos de destilación el costo de la operación no depende de la salinidad del agua de partida, en la electrodiálisis el consumo de energía es proporcional al contenido de sólidos disueltos. No se tratan por electrodiálisis aguas con más 5 000 de ppm. Otra desventaja es que las membranas son caras y están sometidas a polarización e incrustación si la intensidad de corriente es elevada. La presencia de materia orgánica, sílice disuelto y hierro en el agua de

alimentación incrusta y reduce la vida de las membranas (Arreguín, 2000).

Por otra parte, Torrent (2011) menciona que la electrodiálisis, en su modalidad reversible (EDR), permite obtener elevadas recuperaciones de agua respecto a la ED, gracias a su cambio de polaridad, lo que permite la auto limpieza de los compartimentos de producto y rechazo, disminuyendo la polarización e incrustación (figura 7).

Comparación entre sistemas térmicos y de membranas

Los procesos de destilación requieren un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía; es por ello que es la tecnología con más tiempo de uso; sin embargo, han perdido importancia en la última década, siendo desplazados por los procesos de membrana, por ser más eficientes en la recuperación de agua producto y su bajo costo energético; este último supone el mayor de los costos de producción. Existen otros aspectos de estas tecnologías que a grandes rasgos deben ser conocidas, pues en situaciones concretas puede resultar ventajosa la elección de una frente a las otras.

La utilización de OI como fase previa al intercambio reduce de manera considerable

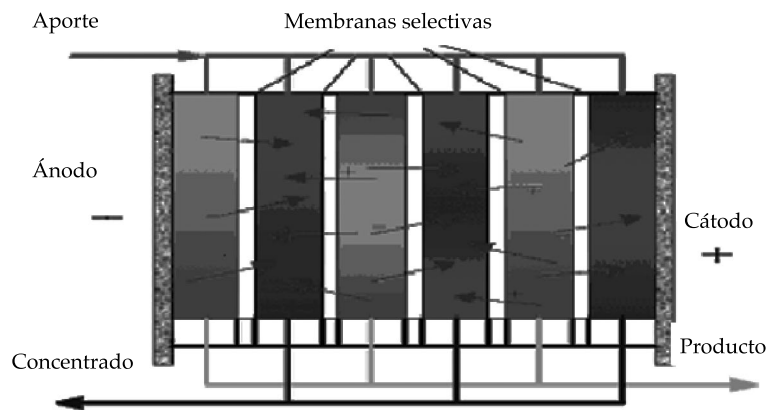


Figura 6. Esquema general de una planta de electrodiálisis.

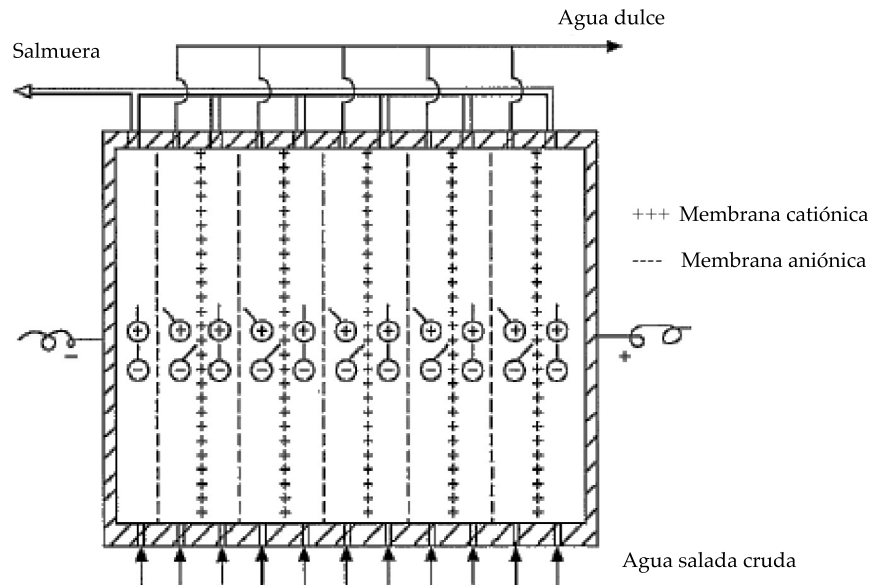


Figura 7. Esquema general de una planta de electrodiálisis reversible.

la regeneración de resinas, prolongando su vida útil, a la vez que se rebajan de forma notable el costo de los reactivos químicos y se reducen los vertidos altamente contaminantes de los procesos de regeneración (Medina, 2000). El agua obtenida de los procesos de desalinización es perfectamente utilizable en la agricultura, turismo y consumo humano, pero exige una eliminación más selectiva de iones. Bajo este contexto, el objetivo del trabajo es evaluar los procesos de desalinización, para determinar el más viable, mediante la comparación entre sistemas térmicos y de membranas, considerando el costo de producción, consumo energético, parámetros de operación y aplicación del agua producto.

Sistemas de desalación acoplados a sistemas de energías renovables

Las energías renovables en general y la energía solar en particular pueden y deben jugar un papel relevante para ayudar a conseguir el objetivo de desarrollo sostenible durante la desalación de agua salobre y marina. El binomio energía renovable más desalación ha

tomado importancia en la solución a la falta de agua en regiones donde la escasez es muy severa y la desalación contribuye para solucionar este problema (cuadro 4). Bajo este contexto, se han encontrado tres campos específicos de investigación en los que la energía solar puede aportar importantes avances científicos y tecnológicos para el logro de soluciones sostenibles para los problemas del agua: 1. Desalación del agua de mar; 2. Desinfección del agua (eliminación de elementos patógenos), y 3. Eliminación de contaminantes industriales peligrosos en el agua mediante procesos fotoquímicos.

Metodología

Utilizando el compendio realizado por el IDA Yearbook 2007-2008, informes técnicos de proyectos de investigación con fondos sectoriales de Conacyt-Conagua en México, además de visitas a más de sesenta desaladoras en México, en los estados de Sonora, Baja California Sur, Baja California, Jalisco, Quintana Roo y Estado de México, y visitas a más de diez desaladoras en el extranjero, como

Cuadro 4. Potencial estimado anual (TW) de las distintas fuentes de energías renovables.

Energía renovable	Producción	Comentario
Geotérmica	12 TW	Total estimado factible
Mareas/olas	2 TW	Valor estimado bruto total
Eólica	2 - 4 TW	Potencial extraíble. Potencial teórico total: 55 TW, considerando el uso del 5% del terreno
Biomasa	5 - 7 TW	Considerando el uso del 50% de toda la tierra cultivable
Hidráulica	4.6 TW	1.6 TW (técnicamente factible) / 0.9 TW (económicamente factible) / 0.6 TW (instalada)
Solar térmica / fotovoltaica	600 TW	Valor práctico estimado. Potencial teórico total: 12 000

Fuente: Koschikowski (2002). Nota: 1 TW equivale a un consumo sostenido de 1 012 W; este valor durante un año = 8 760 TWh.

España (Almería, Tenerife y Gran Canaria) en 2007, y los Emiratos Árabes Unidos (Dubai) en el año 2009, se determinó el número de plantas instaladas, fuente de abastecimiento y costos de producción.

La recopilación mostró las diferentes tecnologías existentes; posteriormente se compararon los números de plantas instaladas, fuentes de abastecimiento, y el uso del agua desalinizada en diversos sectores de producción y consumo. Además, se hizo una comparación entre los países con más plantas desalinizadoras y el tipo de tecnología empleada en cada uno de ellos.

Resultados

Perfil mundial

Existen alrededor de 13 000 plantas instaladas, con una producción de 25 millones de m³/d; entre las tecnologías más utilizadas para desalinización se tiene la ósmosis inversa con un 50%, MSF con 33%, MED con 7%, la nano filtración y electrodiálisis con el 4% y el EDI con un 1%.

La capacidad mundial de desalación ha crecido. En 1980, la capacidad de producción era de 950 000 m³/d y en 2006 fue de 3 350 000 m³/d (figura 8). Como fuente de abastecimiento al proceso, se tiene que la más utilizada es la proveniente de agua de mar, con un 66% y el agua salobre con un 22%. Por otra parte, los sectores con más uso del agua producto son el

municipal, con un 66%, y el industrial, con un 23% (figura 9).

Países con más plantas desaladoras en el mundo

Los países que cuentan con mayor cantidad de plantas instaladas son los siguientes: Estados Unidos (34% del total mundial), con 2 174 plantas, de las cuales el 72% corresponde a OI; Arabia Saudita (32%), con un total de 2 086 plantas, de las cuales un 65% corresponde a MSF; Japón (22%), con un total de 1 457 plantas, de las cuales un 90% corresponde a OI; España (12%), con 760 plantas, de las cuales el 90% corresponde a OI. Entre los países que tienen entre 100 y 300 plantas están Libia, India, China, Australia, Argelia, el Reino de Baréin y la Sultanía de Omán (figura 10) (IDA, 2007).

Opciones de desalinización

Es evidente que los requerimientos energéticos, uso de combustibles, uso de membranas, rango de salinidad, complejidad operacional y mantenimiento requerido, entre otros factores, varía según la tecnología a utilizar. Por otro lado, el proceso a utilizar y tamaño de planta deberán sujetarse a las necesidades de la región, calidad y cantidad de agua disponible, así como el uso final del agua producto generado del proceso, y la solvencia económica de gobiernos, industrias y agricultores (cuadro 5).

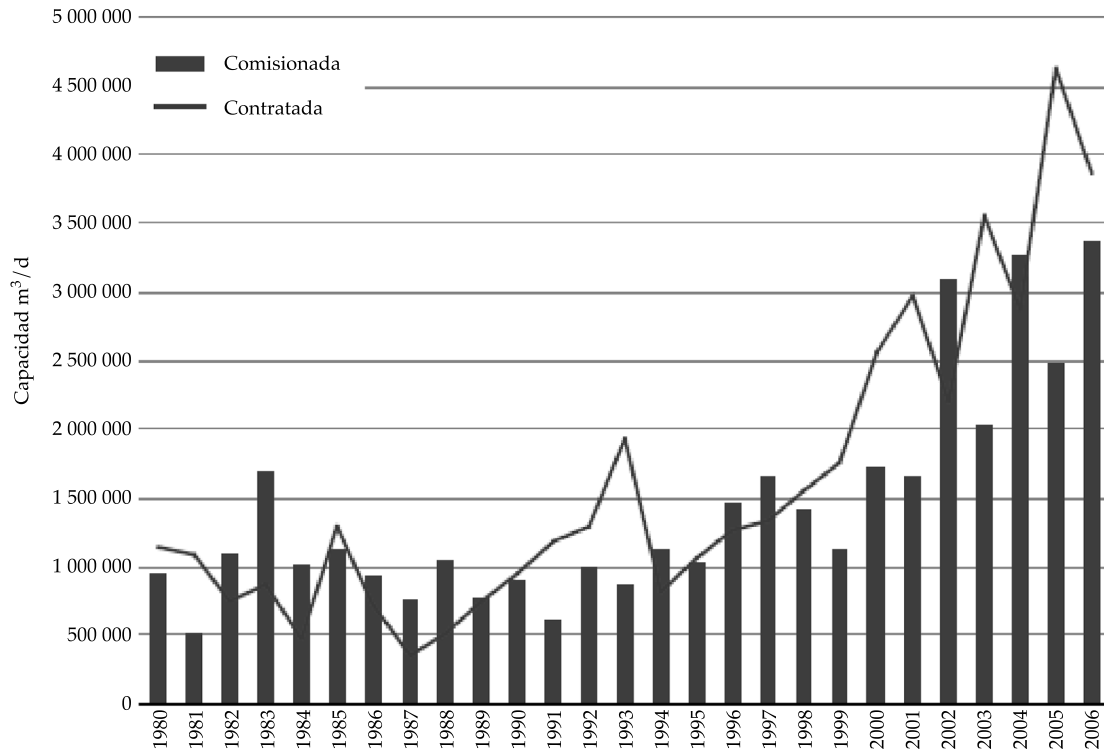


Figura 8. Capacidad mundial de desalación en m³/d. Fuente: IDA (2007).

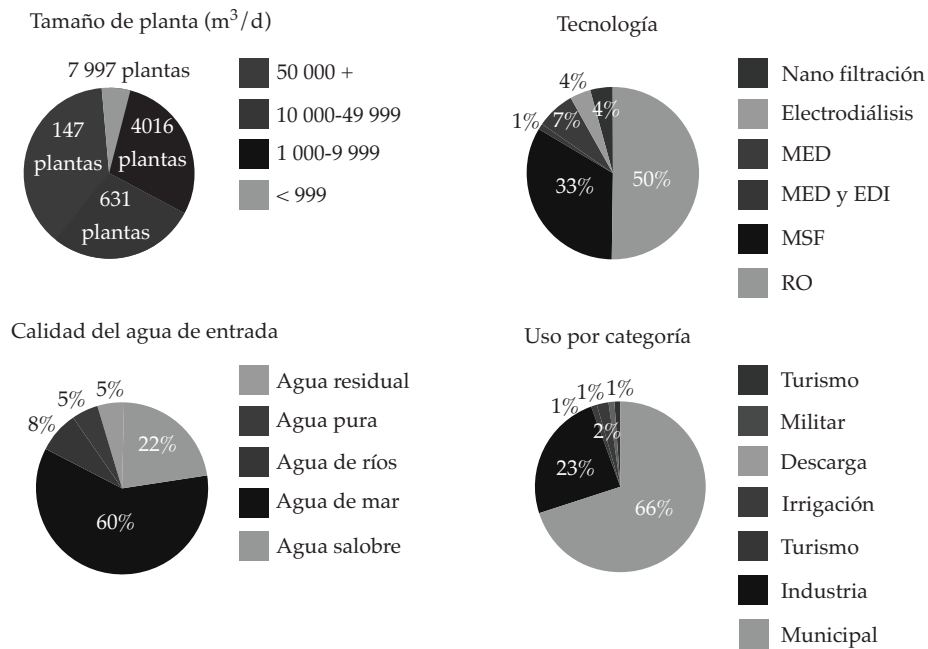


Figura 9. Perfil mundial de desalinización. Fuente: IDA (2007).

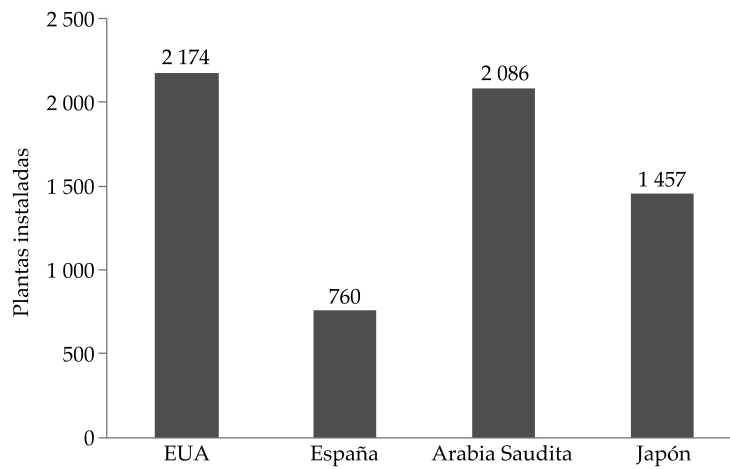


Figura 10. Países con más plantas desaladoras. Fuente: IDA (2007).

Datos importantes del cuadro 5 muestran que existen más de 10 000 plantas instaladas de desalación en el mundo. Es importante resaltar que menos del 4% de la capacidad instalada corresponde a México, donde el principal uso es para abastecer las necesidades del sector turístico, con producciones menores a los 600 m³/d en promedio, a diferencia de la tendencia mundial, donde el uso principal se da en los municipios. El consumo energético por metro cúbico es de 3 a 6 kWh/m³ en promedio en sistemas térmicos; en sistemas de membranas por ósmosis inversa, el consumo es en promedio de 0.8 a 6 kWh/m³ desde agua salobre hasta agua marina. Las tecnologías de desalación pueden desalar una calidad en el agua producto menor de 40 mg/l, inclusive los sistemas térmicos hasta niveles de agua destilada; sin embargo, su uso es para la generación casi exclusiva de vapor para termoeléctricas, a diferencia de los sistemas por ósmosis inversa, que el agua producto puede implementarse en sistemas de riego, consumo humano e industrial. Solamente se tiene registro de una planta desaladora por ósmosis inversa en el municipio de Los Cangrejos, en Baja California Sur, con una capacidad nominal de 200 LPS con alimentación de agua de mar.

Sistemas de desalinización instalados en México por entidad federativa

Según reportes de *IDA Yearbook* (IDA, 2007; IDA, 2005) e informes nacionales existen 435 plantas desalinizadoras en México, ubicadas en 320 sitios que cuentan con una capacidad instalada de 311 377 m³/d. Los estados con mayor crecimiento de plantas desalinizadoras son el de Baja California, Baja California Sur y Quintana Roo. Este último tiene la mayor cantidad de plantas desaladoras, con un 28.5%. La mayoría de las plantas desalinizadoras pertenece al sector turismo (cuadro 6).

Por otra parte, se tiene el registro de que el 32% de las plantas está fuera de uso, principalmente por fallas de operación de las desalinizadoras, falta de personal capacitado, carencia de asistencia técnica de los proveedores y alto costo de las refacciones. El proceso más utilizado en México es la ósmosis inversa. El 59.7% de las plantas desaladoras (260) es de aplicación turística, 29.8% para uso municipal (130) y 10.5% (45) para manejo industrial.

En el año 2006 entró en operación la planta desalinizadora municipal más grande de México, con una capacidad nominal de 200

Cuadro 5. Criterios de operación de diferentes tecnologías de desalinización.

Aspectos del proceso		Tecnología de desalinización			
		ESME	ED	OI	
				1 paso 2 paso	
Estado comercial	Completamente desarrollado	Desarrollo más reciente		Desarrollado	
Producción instalada	3 520 plantas	497 plantas		4 000 plantas	
Capacidad máxima	45 000 m³/d	18 000 m³/d		9 000 m³/d	
Plazo de instalación	24 meses	18 - 24 meses		18 meses	
Fabricantes	Amplia competencia	Pocos en el mercado		Amplia competencia	
Consumo de energía	3 - 6 kWh/m³	1.5 – 2.5 kWh/m³		0.8 - 6 kWh/m³	
Temperatura máxima	90 - 120 °C	70 - 75 °C		40-45 °C	40-45 °C
Calidad del agua producto (STD)	< 40 mg/L	< 40 mg/L		< 40 mg/L	< 40 mg/L
Necesidades de mantenimiento	Limpiezas 2 - 4 veces por año	Limpiezas 0.5 - 2 veces por año		Limpiezas 1 - 2 veces por año	
Sensibilidad al agua de mar	Media	Reducida		Alta. Mayor control de membranas	
Pretratamiento	Moderado	Simple		Exigente	
Influencia en la operación	Alta incidencia. Corrosión e incrustación	Baja - media		Alta. Incidencia en la vida de las membranas	
Tipo de energía	Térmica	Eléctrica		Eléctrica	
Posibilidad de ampliación	Difícil	Fácil		Fácil	
Superficie de instalación	Mucha	Poca		Poca	
Costo USD/m³ tratado	1.68	0.32		0.76 - 1.32	
Desalación con agua de mar	Sí	No		Sí	

Fuente: Thomas (1997); Medina (2000).

l/s, en Los Cabos, Baja California Sur (Dévora, 2007). Actualmente se proyectan varias plantas desalinizadoras en el noroeste de México, en particular en las ciudades de Tijuana y Ensenada, en el estado de Baja California, predominando la tecnología de OI (cuadro 7).

Discusión

Analizando el inicio y la situación actual, se tiene que en 1980, las capacidades instaladas de desalinización (miles de m³/d) por regiones era la siguiente: África (538), Europa (368), antigua URSS (120), Japón y otras islas de Asia (183), Medio Oriente (4 200), Estados Unidos (880),

México (45), islas del Caribe (150) y América del Sur (30). El Medio Oriente representaba el 61% del total, seguido de los Estados Unidos con 13% (Europa sólo alcanzaba 5%). Arabia Saudita era el primer país en cuanto a capacidad desaladora (24.4%), seguido de cerca por los Emiratos Árabes Unidos y Kuwait. Por el número de unidades instaladas, Estados Unidos ocupaba el primer lugar, ya que tenía plantas de pequeño tamaño, en comparación con las del Medio Oriente y Arabia. En cuanto a tecnologías, las de destilación, MVC y MSF suponen 52%; las de ósmosis inversa, 38% y el resto, 10%.

Cuadro 6. Plantas desalinizadoras de agua instaladas en México por entidad federativa.

Entidad federativa	Sitios con plantas desaladoras	Número de unidades	% nacional	Operan		Proceso					
				Sí	No	OI	CV	MSF	S	D	Capacidad en m ³ /d
Baja California	23	38	8.74	24	14	26	7	2	3	0	51 938
Baja California Sur	71	73	16.78	53	20	63	6	0	4	0	36 971
Campeche	8	19	4.37	14	5	16	2	0	1	0	5 456
Coahuila	31	33	7.59	23	10	30	1	0	1	1	7 668
Colima	17	18	4.14	2	16	17	1	0	0	0	2 856
Edo. de México	3	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	7 000
D.F.	14	17	3.91	12	5	15	0	0	1	1	95 471
Durango	26	26	5.98	13	13	26	0	0	0	0	868
Guerrero	6	6	1.38	3	3	6	0	0	0	0	2 355
Jalisco	3	4	0.92	3	1	3	0	0	1	0	2 865
Morelos	2	21	4.83	21	2	20	1	0	0	0	110
Nuevo León	5	5	1.15	5	1	5	0	0	0	0	2 847
Oaxaca	1	4	0.92	4	1	4	0	0	0	0	14 256
Quintana Roo	79	124	28.51	73	51	121	2	0	1	0	53 339
San Luis Potosí	1	1	0.23	1	0	1	0	0	0	0	60
Sonora	16	22	5.06	15	7	17	2	0	1	2	9 349
Tamaulipas	4	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	5 100
Veracruz	9	15	3.45	11	4	13	1	0	0	1	12 167
Yucatán	1	1	0.23	1	2	1	0	0	0	0	700
Total nacional	320	435	100%	282	137	392	23	2	13	5	311 377

Nomenclatura. OI: ósmosis inversa; MVC: compresión mecánica de vapor; MSF: *flash* multietapa; S: solar; D: destilación. Fuente: IDA (2007).

Hoy día, la capacidad total instalada de desalinización en todo el mundo es de 25 millones de m³/d y ha crecido alrededor de tres veces la capacidad existente respecto al año 1980; 14 Hm³/d corresponden a agua de mar y 12 Hm³/d a aguas salobres (Semiat, 2010).

Según IDA (2007) del total de plantas instaladas, el 50% son de OI, 33% de NF, 1% de MED y 4% de MSF. Por otra parte, la fuente de abastecimiento más utilizada es agua de mar con 60% y agua salobre con un 22%. Los sectores donde se tiene mayor uso del agua

producto son el municipal con un 66%, y el industrial con un 23% (ver figura 9).

Hace treinta años se tenían cantidades considerables de combustibles fósiles; por esta razón, la MSF era una de las principales tecnologías de desalinización utilizadas; sin embargo, en épocas actuales, dicha tecnología se ha dejado de operar de forma considerable debido al déficit de los hidrocarburos como materia prima de la tecnología y por los bajos porcentaje de obtención de agua producto. Por ello, las tecnologías de membrana han tenido un incremento en relación con los

Cuadro 7. Plantas desalinizadoras por instalarse en México.

Lugar	Producción m ³ /d	Tecnología	Calidad del agua	Empresa
Cancún, Quintana Roo	1 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	1 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	568	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	550	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Catalonia Hotel, Quintana Roo	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Chileno Bay, BCS	4 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Bekox/VWS Ibérica
Gran Gala Hotel, Quintana Roo	1 134	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Ixtapa, Guerrero	327	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE Osmonics
La Paz, BCS	120	Destilación múltiple efecto	Agua de mar	IDE
Puerto Peñasco, Sonora	870	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Mazatlán, Sinaloa	768	Destilación múltiple efecto	Agua de mar	IDE
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 364	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 091	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 091	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE Water
Los Cabos, BCS	230	Ósmosis inversa	Agua de mar	VWS México
Los Cabos, BCS	460	Ósmosis inversa	Agua de mar	VWS México
Puerto Vallarta, Jalisco	1 635	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE Osmonics
Puerto Peñasco, Sonora	401	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Riviera Maya, Quintana Roo	150	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Riviera Maya, Quintana Roo	273	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Tuxpan, Veracruz	280	Ósmosis inversa	Agua de mar	Mitsubishi
Puerto Vallarta, Jalisco	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México

Fuente: IDA (2007).

sistemas térmicos, pues no requieren para su funcionamiento de combustibles fósiles.

El estudio de la factibilidad de costos y consumo energético mostró que el tipo de tecnología que requiere menor consumo energético es la OI, con un consumo de 0.6 a 8 kWh/m³ y un costo de \$0.6 USD/m³. Por otro lado, en los sistemas térmicos, la tecnología

MED consume de 3.4 a 4 kWh/m³, con un costo de producción de \$1.5 USD/m³. El sistema MSF consume de 5 a 8 kWh/m³, con un costo de \$1.10 USD/m³.

Es evidente que el consumo energético y el costo de producción de la ósmosis inversa presentan ventajas significativas sobre el resto de los procesos debido a que no requiere de

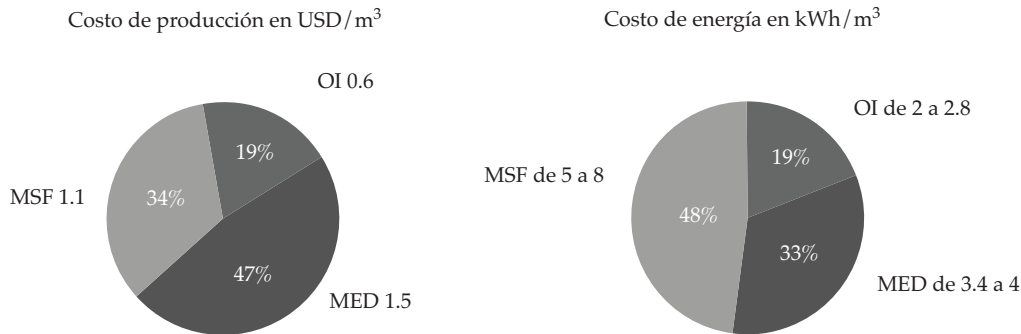


Figura 11. Costo de producción y consumo energético de procesos de desalinización. Fuente: IDA (2007).

cambios de estado, como los usados en MED y MSF, que utilizan mayor consumo energético e incrementan la emisión de CO₂, provocando el efecto invernadero y los terribles daños en la atmósfera, ocasionando problemas medioambientales que todos padecen, y que se han ido incrementando con el tiempo por agotamiento de los recursos y sobrepoblación en la Tierra (Lechuga, 2007).

Las salmueras o vertidos de desalinización ocupan una parte importante del proceso, por ser el residuo más importante de una planta desaladora. Está constituido por las aguas de rechazo. Una planta con una producción de 70 000 m³/d de agua producto generará un vertido líquido de 1 m³/s si es de ósmosis inversa, alimentándose de agua de mar (conversión del 45%); de 0.2 m³/s si es de ósmosis inversa, alimentándose de agua salobre (conversión del 80%), y de 7.3 m³/s si es de destilación (conversión del 10%) (Hoepner, 1999). En Baja California Sur, el vertido se dispone en el mar directamente; mientras que en Quintana Roo, el vertido se inyecta en pozos de adsorción (González *et al.*, 2009).

Cuando se disponga el vertido de salmuera en aguas superficiales marinas, la tubería de descarga deberá estar en sentido contrario a la obra de toma, y en los casos donde no pueda cumplirse, el punto de descarga del vertido deberá estar por lo menos a 500 metros de la dispersión y disolución del vertido; además, es deseable buscar corrientes marinas para la

disposición final, que garantice su inmediata disolución. Lo anterior, tomando en cuenta las instalaciones de descarga de otras plantas desalinizadoras estudiadas de acuerdo con la bibliografía consultada, cuya extensión va de los 100 a los 3 500 metros, a partir de la franja de mar abierto (Sadhvani *et al.*, 2005). Cuando el vertido sea inyectado a pozos profundos, debe limitarse la velocidad del fluido inyectado, para evitar daños en el sondeo o en la formación. El límite máximo recomendado por las normas de la Agencia de Protección al Ambiente es de 2.5 m/s, a menos que pueda demostrarse que no se dañará el sistema con velocidades superiores (Mickley, 2001).

Para que una operación de disposición de salmuera mediante inyección en sondeos profundos (ISP) sea factible, se han de dar cuatro condiciones que son necesarias y suficientes (IGME, 1990), es decir, una operación de ISP es posible si y sólo si: 1. Existe una formación geológica permeable capaz de admitir el residuo (permeable y transmisiva); 2. Existe una formación geológica impermeable que mantiene el residuo confinado el tiempo suficiente hasta su inocuidad; 3. Las condiciones de ambas formaciones no cambian con el desarrollo de la operación; 4. La operación de ISP no afecta a otros recursos más importantes.

Es necesario mencionar que el cálculo de consumos energéticos y costos ha sido de carácter regional (Baja California Sur, Quintana Roo y Sonora) y temporal (de 2008 a 2011).

Los costos de equipamiento y de inversión son representados desde las obras de toma y dosificación de agua salada hasta los de adquisición del activo inicial y mantenimiento por reposición de partes.

Conclusiones

La destilación tiene un elevado consumo energético; requiere una elevada inversión inicial; precisa de una extensión de terreno importante; su eficiencia es baja y no depende de la salinidad del agua. Por otra parte, necesita una fuente de vapor que, según los casos, puede o no ser independiente del proceso; produce agua de calidad casi pura, y puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía.

Los costos para los procesos de desalación térmicos (MED, MSF) son muy similares entre los procesos convencionales y los que utilizan energías alternativas, como la solar o la eólica, lo que no es el caso para los procesos de ósmosis inversa, donde la diferencia de costos de inversión entre una y otra es grande. Los procesos térmicos comerciales (MSF, MED, CV, TCV) no se recomiendan para desalar agua salobre debido al alto costo energético requerido, lo anterior significa que consume la misma energía para desalar agua salobre o agua de mar.

La ósmosis inversa tiene el menor consumo energético y puede utilizar tanto agua salobre como de mar, una ventaja ante los sistemas térmicos. El costo de inversión se liga con las características del agua que se pretende desalar y, en general, es inferior respecto a los sistemas térmicos. En este proceso es indispensable el uso de tratamientos físico-químicos que suelen ser muy importantes y claves para elevar el tiempo de vida de las membranas. El terreno en extensión es de tipo medio. Necesita una fuente exterior de energía para operar las bombas de alta presión. Por otro lado, la presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente y su manejo se complica en función de las características físico-químicas del agua.

La electrodiálisis tiene un consumo energético de tipo medio, dado que sólo utiliza agua de baja salinidad, una desventaja respecto a sistemas de OI y térmicos; necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas. Respecto a las necesidades de espacio e inversión, éstas son intermedias, comparándolas con las de otros sistemas. Por otro lado, el costo de instalación es superior a la ósmosis inversa y el agua producto es de calidad inferior a la de las otras tecnologías.

Además de estas características de capacidad para desalar, se trata de concepciones completamente diferentes, dado que el segundo y el tercero se emplean para realizar la separación de una membrana y además efectúan el proceso a temperatura ambiente, mientras que la destilación hace uso de vapor producido en el calentamiento del agua.

La destilación se emplea únicamente en el ámbito comercial para desalar agua de mar; la electrodiálisis para desalar agua salobre, y la ósmosis inversa tanto para agua salobre como para agua de mar. Analizando los resultados obtenidos, se concluye que la OI es el proceso más viable en cuanto a producción, energía consumida, costo y variabilidad en las fuentes de abastecimiento, sin olvidar que se debe seguir mejorando dicho sistema de producción para que sea sustentable.

Las energías renovables jamás van a alcanzar un nivel de costo inferior al que hemos disfrutado con las denominadas energías convencionales. La razón para ello es muy simple: las energías renovables poseen un valor añadido muy importante que las otras no tienen, que es el de la sostenibilidad. Sin embargo, uno de los principales obstáculos al desarrollo de las energías renovables es la oposición de algunos sectores políticos y empresariales a la entrega de incentivos o subsidios. Algunas de las razones aducidas son la distorsión que puede provocar en un sistema de libre competencia las ayudas, incentivos y subsidios del Estado, al favorecer las fuentes renovables por sobre las convencionales (CETENMA, 2011). Al final, como se indicaba,

nuestra sociedad debe tomar con urgencia el compromiso entre beneficios, costos y riesgos, que se quieren o se pueden asumir cuando se aplica a sistemas de desalación.

Recibido: 24/03/11
Aceptado: 10/10/12

Referencias

- AL-SAHALI, M. Developments in thermal desalination processes: design, energy, and costing aspects. *Journal for Desalination*. Vol. 214, 2007, pp. 227-240.
- AL-SOFI, M. Seawater desalination - SWCC experience and vision. *Desalination*. Vol. 1-3, 2001, pp. 121-139.
- AMTA. American Membrane Technology Association. *Improving America's Waters through Membrane Treatment and Desalting. Membrane Desalination Costs* [on line], 2012. World Wide Web: http://www.amtaorg.com/wp-content/uploads/6_MembraneDesalinationCosts.pdf.
- ARREGUÍN, F. Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 1, enero-abril de 2000, pp. 27-49.
- BELFORT, G. *Synthetic membrane processes, fundamentals and water applications*. New York: Ed. Academic, 1984, pp. 287-296.
- BERMÚDEZ, A. and THOMSON, M. Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, México. *Journal for Desalination*. *Desalination*. Vol. 220, 2008, pp. 431-440.
- CETENMA. *Vigilancia tecnológica para la energía y el medio ambiente*. Centro Tecnológico de la Energía y el Medio Ambiente, 2008 [en línea]. Fecha de consulta: enero de 2011. Disponible para World Wide Web: <http://www.ctmedioambiente.es>.
- CIPOLLINA, A. Efficiency increase in thermal desalination plants by matching thermal and solar distillation: theoretical analysis. *Journal for Desalination*. *Desalination*. Vol. 183, 2005, pp. 127-136.
- CONAE. Programa de Calentadores Solares de Agua en México (PROCALSOL). Secretaría de Energía. México, D.F. 2007 [en línea]. Disponible para World Wide Web: www.conae.gob.mx/.../sp_Programa_de_Calentadores_Solares_de_Agua_Mexico.pdf, recuperado en junio de 2012.
- CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. Tercera edición. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005, pp. 36-50.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. *Hidrología subterránea*. 2 Vols. Secciones 10 y 12. Barcelona: Ediciones Omega, 1976, 2350 pp.
- DÉVORA, G.E. Desalinización de agua de mar, una estrategia para detonar el desarrollo del noroeste de México. *Los acuíferos costeros: retos y soluciones*. Vol. 1, 2007, pp. 1025-1034.
- FERNÁNDEZ, J.L. y CHARGOY, N. *Destilación solar de agua de mar en México 1983-2003*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, 2005.
- GONZÁLEZ, E.R. y DÉVORA, G.E. Funcionamiento y contaminación generada por plantas desalinizadoras ubicadas en las zonas del mar de Cortés y mar Caribe: un estudio para el desarrollo de normatividad ambiental acuática. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. Vol. 5, núm. 2, 2009, pp. 186-197.
- HIRIART, G. *Desalinización de agua con energías renovables: interrogantes jurídicas*. Instituto de Investigaciones jurídicas de la UNAM [en línea]. Citado el 29 de octubre de 2007. Disponible para World Wide Web: <http://www.juridicas.unam.mx>, 2007.
- HOEPNER, T. *A procedure for environmental impact assessment (EIA) for seawater desalination plants*. *Desalination*. Vol. 124, 1999, pp. 1-12.
- IDA. *Desalting Plants Inventory*. Madrid: International Desalination Association, 2005, pp. 210.
- IDA. *Desalination Yearbook. Market profile*. Pankratz T. Dubai: International Desalination Association, 2010, pp. 102-153.
- IGME. *La inyección de residuos líquidos. Una alternativa*. Colección Lucha Contra la Contaminación. Almería, España: Instituto Geológico y Minero de España, 1990.
- KHAWAJI, A. Advances in seawater desalination technologies. *Journal for Desalination*. Vol. 221, 2008, pp. 47-69.
- KOSCHIKOWSKI, J. WIEGHAUS, M., and ROMMELET, M. Solar thermal driven desalination plants based on membrane distillation. *Proceedings of Membranes in Drinking and Industrial Water Production Congress*. Mülheim, September, 2002, pp. 22-26.
- LATTEMANN, S. y HOEPNER, T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Science Direct Publications*. Vol. 220, 2007, pp. 1-15.
- LECHUGA, J. Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. *Ingeniería*. Revista Académica de la FI-UADY. Vol. 11, núm. 3, 2007, pp. 5-14.
- MANI, K. Electrodialysis water splitting technology. *Journal of Membrane Science*. No. 58, 1991, pp. 117-138.
- MEDINA, J. *Desalinización de aguas salobres y de mar en ósmosis inversa*. Madrid: Editorial Mundi Prensa, 2000, 799 pp.
- MICKLEY, M.C. Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation. *Desalination and Water Purification Research Program Report*. Denver: US Bureau of Reclamation, 2001.
- NORLAND INT'L. *Sistemas comerciales de destilación*, Norland Int'l Inc. 2004 [en línea]. Disponible para World Wide Web: <http://www.norlandintl.com/spanish>, diciembre de 2009.
- NOGUEIRA, C. El ciudadano 7.000 millones. ELPAÍS.com. 2011. Madrid: Ediciones El País, S.L., España, 2011.
- PORTA, M.A., RUBIO, E. y FERNÁNDEZ, J.L. Sistema de desalación solar de agua de mar para riego eficiente en un

- módulo de cultivo. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. 17, núm. 2, 2002, pp. 55-64.
- SADHWANI, J., VEZA, M., and SANTAN, C. Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination*. Vol. 185, No. 1-8, 2005, pp. 1-8.
- SÁNCHEZ, I., DÍAZ, G., OJEDA, W., CHEBHOUNI, G., ORONA, I., VILLANUEVA, J., GONZÁLEZ, J.L. y GONZÁLEZ, G. Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 4, 2008, pp. 5-24.
- SEMIAT, R. *Desalination: Present and Future*. Vol. 25, No. 1 [en línea]. IWRA, Water International. Recuperado el 17 de abril de 2010. Disponible para World Wide Web: <http://www.cepis.org.pe/acrobat/israel.pdf>.
- THOMAS, K.E. *Overview of village scale, renewable energy powered desalination*. Denver: National Renewable Energy Laboratory, 1997.
- TORRENT, A. *Desalinización por electrodiálisis reversible. Características del proceso y casos prácticos*. Citado el 16 de febrero de 2011. Disponible para World Wide Web: <http://www.ionics.com>
- VALENCIA, J. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill, 2000, 793 pp.
- VALERO, A. *La desalinización como alternativa al plan hidrológico nacional* [en línea]. Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), España, 2001. Disponible para World Wide Web: <http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.pdf>.
- VEOLIA. *Veolia Water Solutions & Technologies - Water Treatment Specialist*. 2009. Marzo de 2011. Disponible para World Wide Web: <http://www.veoliawaterst.com>.
- WHO. *Desalinización para el suministro de agua potable segura. Guía de los aspectos ambientales y de salud aplicables a la desalinización*. Ginebra: World Health Organization, 2007.

Abstract

DÉVORA-ISIORDIA, G.E., GONZÁLEZ-ENRÍQUEZ, R. & RUIZ-CRUZ, S. *Evaluation of desalination processes and their development in Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 3, July-August, 2013, pp. 27-46.*

Different desalination processes exist, which are differentiated by their cost, environmental impact, the quality of the product and energy consumption. A comparison of thermal and membrane processes identified the existing technologies to desalinate seawater, the number of installed plants, the technology used, the supply source and the use of desalinated water. The technical feasibility and main objective of this work was the study and comparison of thermal and membrane desalination systems with respect to production costs in USD/m³ and energy consumption in kWh/m³. Desalination systems have been in practice since 1970 with the use of membrane systems (reverse osmosis (RO), electrodialysis (ED) and nanofiltration (NF)) and thermal systems (multiple stage distillation (MED), multiple stage flash distillation (MSF), and solar distillation (SD)). Of the 13,000 plants installed, 50% use RO, 33% use NF, 1% MSD and 4% MSF. The most common supply sources are seawater (60%) and brackish water (22%). The beneficiaries of this desalinated water are the municipal (66%) and the industrial (23%) sectors. The type of technology that requires less energy consumption is RO, from 2 to 2.8 kWh/m³ at a cost of 0.6 USD/m³, whereas MSD and MSF technologies consume 3.4 to 4 kWh/m³ and 5 to 8 kWh/m³ at a production cost of 1.5 USD/m³ and 1.10 USD/m³, respectively. The comparison of technologies determined that energy consumption and production costs are less and production is greater with RO. Moreover, RO has significant advantages over other systems, such as not requiring phase changes, unlike MED and MSF. Reverse osmosis is the most feasible process with regard to production, energy consumption and cost.

Keywords: reverse osmosis, electrodialysis, distillation, desalination, water quality, cations, anions.

Dirección institucional de los autores

Germán Eduardo Dévora Isiordia

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
Instituto Tecnológico de Sonora
5 de febrero 818 Sur, Colonia Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (644) 4109 001
german.devora@itson.edu.mx

Rodrigo González Enríquez

Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente
Instituto Tecnológico de Sonora
5 de febrero 818 Sur, Colonia Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (644) 4109 001
rglez@itson.mx

Saúl Ruiz Cruz

Departamento de Biotecnología y Ciencias Alimentarias
Instituto Tecnológico de Sonora
5 de febrero 818 Sur, Colonia Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (644) 4100 921
srui@itson.edu.mx