

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Desalinización del agua.
<i>Autor / Adscripción</i>	Felipe I. Arreguín Cortés Alejandra Martín Domínguez Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 15(1): 27-49
<i>Fecha de publicación</i>	2000
<i>Resumen</i>	México se enfrenta a serios problemas de abastecimiento de agua en muchas regiones, debido a la mala distribución espacial y temporal de este líquido. La desalinización de agua salobre o de mar es una opción que se utiliza en muchos países para producir agua para consumo humano, procesos industriales y para cultivos de alto valor comercial en invernaderos. En este trabajo se revisan los principales procesos de desalinización, y se analizan los factores que afectan sus costos.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/720">http://hdl.handle.net/123456789/720</a>

## Desalinización del agua

Felipe I. Arreguín Cortés  
Alejandra Martín Domínguez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*México se enfrenta a serios problemas de abastecimiento de agua en muchas regiones, debido a la mala distribución espacial y temporal de este líquido. La desalinización de agua salobre o de mar es una opción que se utiliza en muchos países para producir agua para consumo humano, procesos industriales y para cultivos de alto valor comercial en invernaderos. En este trabajo se revisan los principales procesos de desalinización, y se analizan los factores que afectan sus costos. El precio promedio de desalinizar agua salobre es de USD 0.35/m<sup>3</sup> y el de agua de mar USD 1.54/m<sup>3</sup>. El costo de desalinizar agua con una planta paquete de hasta 1,900 m<sup>3</sup>/día, es de USD 2.65/m<sup>3</sup>, cuando la energía eléctrica cuesta del orden de USD 0.12/kWh. Los principales impactos ambientales de las plantas desalinizadoras se presentan durante la construcción; otros son causados por el incremento en el uso de la energía, por la emisión de compuestos de nitrógeno y oxígeno, por las descargas de salmuera, por la acción de las obras de toma y por la posibilidad de que se fomente el crecimiento poblacional en torno a la planta.*

**Palabras clave:** desalinización, aguas salobres, aguas marinas, destilación, ósmosis inversa, membranas, plantas desaladoras.

### Introducción

El mar actúa como el reservorio principal de la tierra, de él se evaporan diariamente del orden de 875 km<sup>3</sup> de agua. Aproximadamente 775 km<sup>3</sup> regresan al mar por condensación, es decir existe una transferencia neta de 100 km<sup>3</sup> de agua del mar a la tierra por medio de los vientos. Sin embargo, la distribución de este recurso en el planeta Tierra no es uniforme en el espacio ni en el tiempo. Existen regiones que cuentan con grandes cantidades de agua, mientras en otras la escasez es tal que cualquier clase de vida es restringida. Además, en la mayoría de los países sólo llueve durante unos cuantos meses.

#### *El agua en México*

Con una superficie de casi dos millones de kilómetros cuadrados, México tiene una precipitación media anual de 777 mm, lo cual equivale a 1,640 km<sup>3</sup>. Sin embargo, su distribución espacial es irregular. En el 42% del territorio, principalmente en el norte, las precipitaciones medias anuales son inferiores a los 500 mm, y en algunos casos, como en las zonas próximas al río Colorado, no llegan a 50 mm. Por el contrario, en el 7%

del territorio existen zonas con precipitaciones medias anuales superiores a los 2,000 mm, con regiones donde se registran lluvias mayores a los 5,000 mm. En general, estas precipitaciones ocurren en unos cuantos meses; el 80% de las lluvias se presentan en el verano (CNA, 1993).

La disponibilidad anual de agua *per capita* también es muy variable en todo el territorio nacional. Existen regiones con disponibilidad que varía entre 211 y 1,478 m<sup>3</sup> anuales por persona; por otro lado, hay zonas donde esta disponibilidad varía de 14,445 a 33,285 m<sup>3</sup> anuales *per capita*. En promedio cada habitante dispone de 5,200 m<sup>3</sup> anuales. Aunque en el balance nacional entre la oferta y la demanda del agua hay un superávit, en forma regional se encuentra un déficit considerable en casi la mitad del territorio, principalmente en los estados de Baja California, Sonora, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León y San Luis Potosí, así como en las entidades que comparten la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y la cuenca del Lerma-Chapala. Esta situación obliga a buscar fuentes alternas de abastecimiento, y una de ellas son las aguas salobres y marinas.

México cuenta con más de 11,000 km de litorales; 68% de estos corresponden a las costas e islas del

Océano Pacífico y Golfo de California, y 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y Mar Caribe. Además, la zona marítima mexicana tiene 500,000 km<sup>2</sup> de plataforma continental, 16,000 km<sup>2</sup> de superficie de estuarios y cerca de 12,500 km<sup>2</sup> de lagunas costeras.

Lo anterior, aunado a los derechos sobre amplias zonas marítimas, le aseguran a México una riqueza marítima que pocos países en el mundo tienen. Por otro lado, se debe considerar también el potencial aprovechamiento de los acuíferos salobres continentales para producir agua potable.

### El recurso agua para desalar

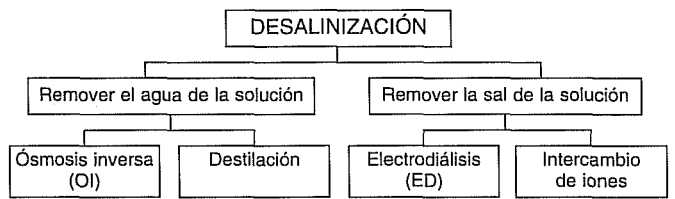
La salinidad media del agua marina es de 35,000 ppm, aunque en mares cálidos puede llegar a 42,000 ppm. En mares interiores varía entre 5,000 y 7,500 ppm. Existen acuíferos con salinidad de 2,000 ppm hasta valores superiores a los del agua de mar. Las aguas salinizadas por el uso son las provenientes de excedentes de riego, o residuales domésticas o industriales tratadas o sin tratar. Su salinidad puede variar entre 1,000 y 2,000 ppm. Para su aprovechamiento es preciso asegurar que existan reservas suficientes y que su composición varíe poco en el transcurso de la explotación.

### Sistemas de desalinización

En el siglo pasado se empezaron a utilizar algunos destiladores pequeños en barcos, y las primeras unidades para producir agua para consumo humano en gran escala, y que usaban la tecnología de destilación en múltiples efectos con tubos sumergidos, en las que la seguridad de funcionamiento era más importante que el costo del agua producida. Aparecen en la década de 1940 en Kuwait, Aruba y las Antillas Holandesas. 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 (*flash*) en múltiples etapas en 1957, lo que permite construir la primera planta comercial en 1960 (Silver, 1970; Vilentchuk, 1968; Hawes, 1973; Pugh, 1972, citados por Custodio, 1976).

Actualmente, el agua desalada se utiliza para consumo humano, en procesos industriales y en forma muy limitada (invernaderos de alta rentabilidad) 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 producirlas.

### 1. Clasificación de los sistemas de desalinización



#### Procesos de desalinización

Un esquema muy simplificado de los procesos de desalinización se presenta en la ilustración 1. A continuación se describen los más conocidos.

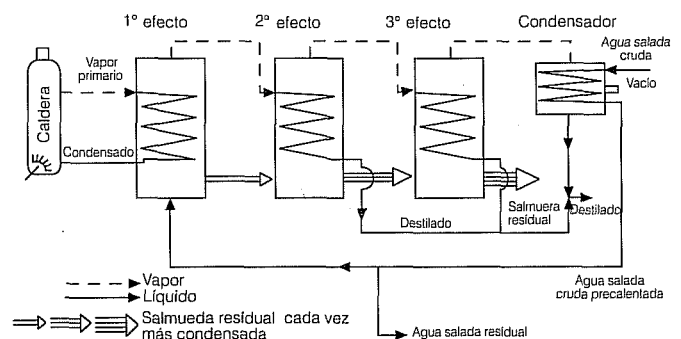
#### Destilación multiefecto (DME)

La destilación multiefecto es el procedimiento más antiguo. Se emplea normalmente para desalinizar grandes volúmenes de agua de mar. En la ilustración 2 se presenta el esquema de un triple efecto.

El principio de este proceso se basa en el hecho de que la cantidad de energía que puede ser almacenada en el agua a su temperatura de ebullición decrece cuando disminuye la presión. Es por ello que cuando el agua de mar o salobre a su temperatura de ebullición fluye a un recipiente con menor presión, el exceso de energía contenido en el líquido produce evaporación. Este flujo de energía que sale del líquido causa que la temperatura del agua de mar o salobre descienda hasta el valor correspondiente al de saturación en esa nueva presión.

Así, la primera etapa es alimentada con vapor externo (70°-80°C), y en el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación producido en la etapa anterior. De esta forma se eleva la temperatura del agua del mar desde unos 22°C hasta la temperatura

### 2. Esquema de un destilador de tres efectos



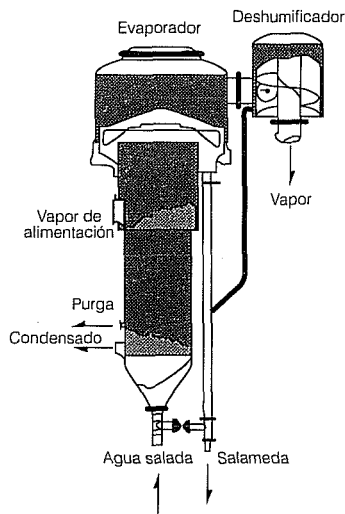
del vapor de alimentación. Simultáneamente, el condensado (agua desalinizada) va perdiendo temperatura hasta casi igualar, en la salida del proceso, a la del mar.

Este proceso se caracteriza por el hecho de que toda la energía es suministrada al líquido antes de que la ebullición tenga lugar, y que durante la evaporación no se suministra energía adicional. Cada efecto multiplica la acción del calor aportado.

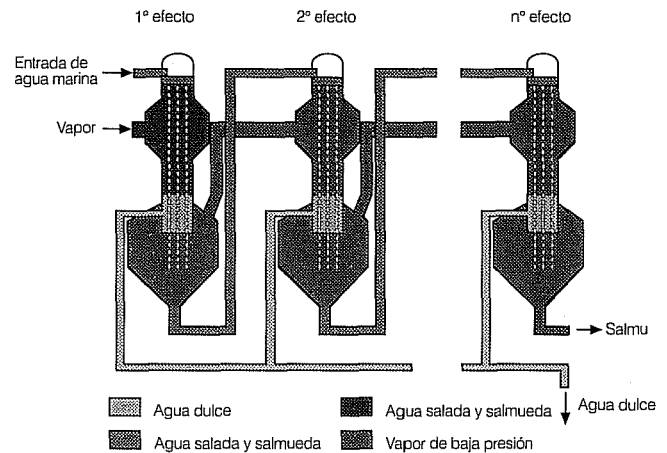
Teóricamente, con  $n$  efectos se consiguen casi  $n$  Tm (Toneladas métricas) de agua dulce, debido a la energía que proporciona cada Tm de vapor. En realidad, debido al consumo de energía de destilación y a las pérdidas caloríficas se consigue sólo del orden del 80% de esa cantidad. Cuantos más efectos se tengan, mayor es la utilización de la energía aportada; pero también mayor es el costo de la instalación. Existe un número de efectos óptimo para cada caso. Este es menor cuanto más barato es el vapor primario. El número de efectos suele variar entre 3 y 12, aunque a veces pueden ser más numerosos. La planta de Gibraltar, inaugurada en 1973, produce 1,360 m<sup>3</sup>/día con 13 efectos, con una relación de producción de 10 m<sup>3</sup>/Tm de vapor, (Hawes, 1973, citado por Cormier *et al*, 1995).

Para tener una buena eficiencia en la transmisión del calor y una baja pérdida de carga, se emplean cambiadores de tubos verticales (TV), lisos o acanalados, habiéndose encontrado ventajas en los tubos verticales largos (TVL), que pueden llegar a medir tres metros de longitud, llenos de agua (película descendente), para evitar la ebullición bajo presión hidrostática; así, se reducen las pérdidas de carga y se puede llegar hasta la máxima concentración en una sola etapa. El vapor caliente actúa por el exterior y la salmuera

### 3. Esquema de un evaporador de tubos verticales largos



### 4. Esquema de un múltiple efecto con evaporadores de tubos verticales largos



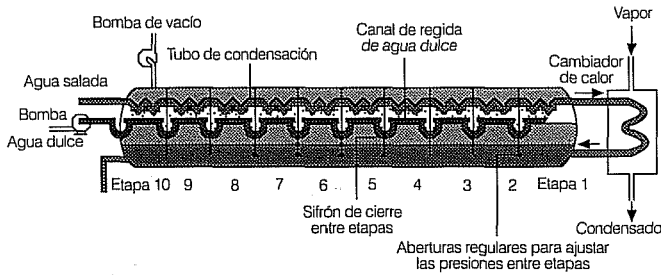
cae por el interior; el vapor condensado es agua destilada. La salmuera pasa a la siguiente etapa, donde sufre una evaporación súbita al ser menor la presión, y continúa evaporándose por efecto del vapor producido en la etapa anterior. En las ilustraciones 3 y 4 se esquematiza el sistema de tubos verticales. En algunos diseños más recientes, los evaporadores se sustituyen por cámaras de expansión súbita en múltiples etapas, los cuales se conocen como múltiples efectos en múltiples etapas (MEME).

### Destilación súbita en múltiples etapas (DSME)

Otro procedimiento térmico es la destilación súbita en múltiples etapas. Es similar a la DME, pero con las etapas sucesivas sometidas a un vacío creciente, por lo que el agua salada, cuando pasa de una etapa a la siguiente, soporta la evaporación en toda su masa, llamada por esta razón "súbita". En una planta DSME, el agua de alimentación (generalmente agua de mar), debe tener un tratamiento previo para prevenir la incrustación de sales en los tubos de transferencia de calor, debido a que la salmuera caliente afecta seriamente la operación de la planta reduciendo la transferencia de calor del vapor al agua con sales.

En el procedimiento de destilación súbita en múltiples etapas, el agua salada es calentada a presión hasta cerca de la temperatura de ebullición. Esta agua se introduce por un orificio en una cámara a presión ligeramente menor a la de saturación, donde parte del agua se evapora instantáneamente, enfriando el líquido residual. Este líquido pasa a otra cámara, donde puede seguir evaporándose por estar a presión aún menor, y así sucesivamente. El calor de condensación

**5. Proceso de destilación súbita (flash) en múltiples etapas**



de los vapores formados sirve para precalentar el flujo alimentado que circula a contracorriente. En la ilustración 5 se representa esquemáticamente el proceso de una planta horizontal. El número de etapas puede variar entre 20 y 60 (de las cuales de 1 a 4 son de eliminación de calor). En los proyectos modernos todas ellas van dentro de una misma carcasa, regulándose las presiones automáticamente mediante el propio fluir del condensado. En general, el salto de temperaturas entre etapas tiene el mismo valor.

Este procedimiento es el que tiene más ventajas para tratar agua del mar y para unidades medias y grandes, pero para estas últimas el sistema de tubos largos verticales es un serio competidor. Raramente se pasa de 95°C para evitar problemas de incrustaciones, pero el máximo beneficio parece que se obtendría con temperaturas entre 175 y 20°C en plantas simples, y de 122°C en plantas duales, siempre y cuando se consiguiese resolver el problema de las incrustaciones.

El proyecto de la primera planta de destilación súbita en múltiples etapas se realizó en 1957 y se construyó en 1960. El ahorro en superficie de transmisión del calor es muy considerable, ya que se reduce al precalentamiento de la salmuera, la evaporación se realiza sin ningún elemento separador. Si el vapor que sale de la última etapa de recuperación de calor, en vez de pasar a las etapas finales de enfriamiento, pasa a alimentar un nuevo sistema DSME, se está ante un dispositivo MEME, pero sus ventajas no están aún claramente confirmadas. El consumo de energía de una planta DSME, tratando agua con una salinidad de 45,000 ppm es de 16.62 kWh/m<sup>3</sup> (Al Marafie *et al*, 1989, citados por Samir y Dadr, 1993).

**Destilación por compresión de vapor o destilación por termocompresión (DCV)**

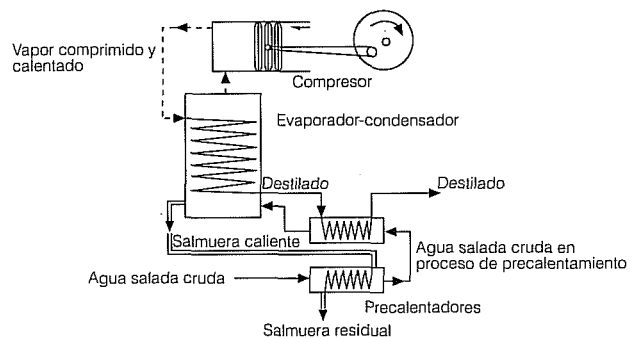
En el proceso de compresión de vapor se emplea esencialmente energía mecánica, y no es necesaria ninguna evacuación de calor residual. El agua salada cruda precalentada entra en un evaporador donde

parte de ella se evapora a presión por abajo de la atmósfera (bajo vacío) en uno de los lados de la superficie de transferencia de calor. Sobre el lado opuesto se condensa el agua destilada. El vapor de agua comprimido se obtiene por medios eléctricos y mecánicos, y al comprimirlo se calienta y, al atravesar el interior de los tubos, cede energía al agua de mar, que pulverizada sobre el exterior de estos se evapora en parte, al tiempo que el vapor se condensa en el interior (ilustración 6). El conjunto se mantiene en vacío para trabajar a una temperatura de 40-50°C. El remanente concentrado del agua salobre es extraído como salmuera, teniendo una concentración promedio de dos veces la concentración inicial, lo cual da un factor de recuperación del orden del 50%, que es mayor que el logrado con procesos de membrana cuando se utiliza agua de mar. El sistema fue utilizado en la marina de los EEUU durante la segunda guerra mundial, aunque los primeros diseños son de mediados del siglo pasado. Se han ideado varios sistemas para conseguir unidades pequeñas portátiles con buenos rendimientos. Existen pocas plantas construidas. La más conocida y grande es la de Roswell, en Nuevo México (3,780 m<sup>3</sup>/día).

**Electrodialísis (ED)**

La electrodiálisis es un proceso de separación en el cual los iones son transferidos a través de una membrana selectiva catiónica-aniónica, hacia una solución menos o más concentrada, como resultado del flujo de una corriente eléctrica directa. Existen membranas porosas sólo a los cationes (aniónicas) y otras sólo permeables a los aniones (catiónicas). Una célula de electrodiálisis consiste en una cámara dividida en compartimentos por una serie de membranas paralelas separadas del orden de 1 mm, con una alternancia de membranas catiónicas y aniónicas. En los extremos de la celda se aplica una diferencia de potencial. El

**6. Esquema de una planta de termocompresión de vapor**



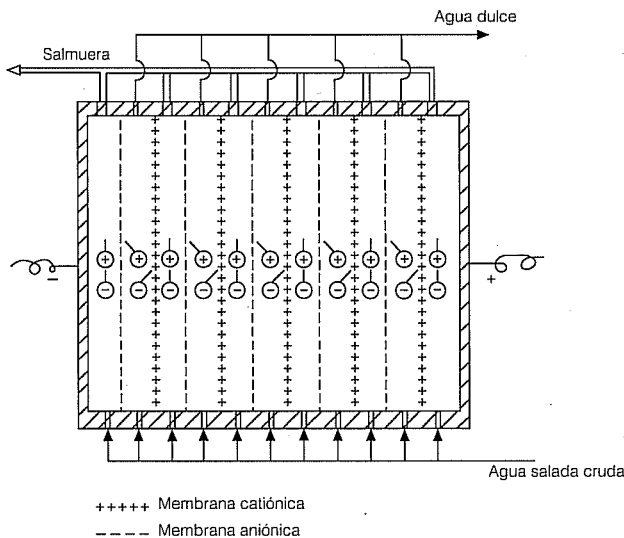
agua cruda penetra en los espacios que hay entre membranas. De acuerdo con el sentido establecido de la corriente, uno de los espacios pierde salinidad mientras los contiguos aumentan la suya. Recogiendo por separado el agua de los espacios alternados se obtiene agua dulce por un lado y salmuera por el otro (ilustración 7).

La electrodiálisis 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 ventajosamente 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 de 5,000 ppm.

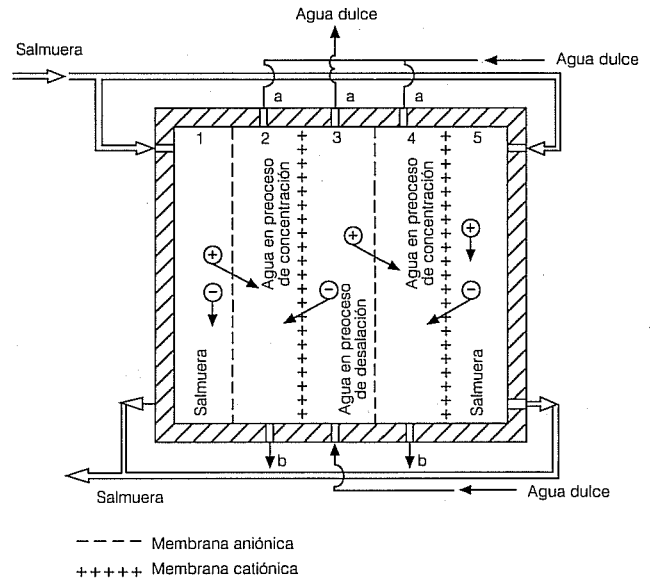
Otra desventaja es que las membranas son caras y están sometidas a polarización e incrustación, si la intensidad de corriente es elevada. La presencia de materia orgánica, sílice disuelto y hierro en el agua de alimentación incrusta y reduce la vida de las membranas. Una variante del proceso, que en vez de consumir energía eléctrica consume energía mecánica o química, es el proceso osmótico o de ósmosis iónica (ilustración 8).

En los compartimentos extremos, 1 y 5, que están comunicados, se introduce una salmuera o agua salobre a presión, la cual cede cationes al compartimento

**7. Esquema de una célula de electrodiálisis**



**8. Esquema del proceso osmótico**



2 y aniones al 4. Estos compartimentos, así como el central 3, están alimentados por agua salobre. Entre los compartimentos 2 y 4 existe un desequilibrio iónico que obliga a que el agua del compartimento 3 pierda iones, desalinizándose. La salmuera de los compartimentos 1 y 5 debe mantenerse más concentrada que el agua de alimentación.

En la electrodiálisis inversa (EDI), la polaridad de los electrodos se invierte cíclicamente cada 15 o 20 minutos, cambiando la dirección de movimiento de los iones entre las membranas, y el agua pasa de forma alternativa por membranas catiónicas y aniónicas. Esto provee una limpieza frecuente y automática de los depósitos formados en la superficie de la membrana.

**Ósmosis inversa (OI)**

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 sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa. El proceso de ósmosis inversa (ilustración 9) se basa en las propiedades de las membranas semipermeables de dejar pasar con más facilidad el agua dulce que la salada, creándose así una diferencia de potencial hidráulico entre esos dos líquidos cuando cada

uno se sitúa a un lado de la membrana. Aumentando convenientemente la presión en el lado del agua salada se puede hacer pasar al compartimento menos salino, dejando atrás parte de las sales. El problema principal reside en la obtención de membranas baratas y resistentes a la presión diferencial, campo en el cual se está realizando un gran esfuerzo y en el que ya se han obtenido logros importantes. Las membranas pierden permeabilidad si el agua original lleva un exceso de sílice, hierro o materia orgánica. El agua de alimentación debe tener una turbidez y contenido de materias en suspensión muy bajo. Típicamente, una membrana de ósmosis inversa procesa un agua de mar de 36,000 ppm de sólidos disueltos totales, SDT, y la convierte en agua dulce con una salinidad inferior a 50 ppm SDT.

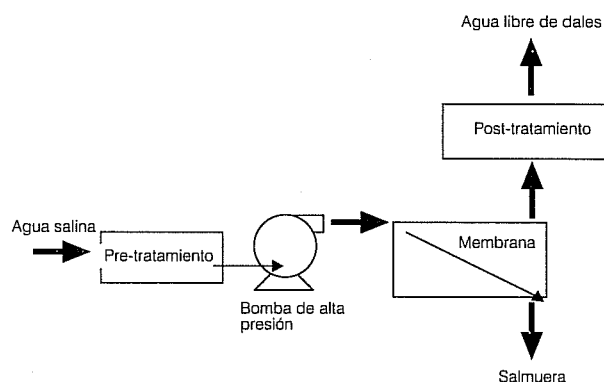
#### Ultrafiltración (UF)

La ultrafiltración es definida como un proceso de separación que utiliza membranas semipermeables para separar macromoléculas de una solución. El tamaño y la forma de la molécula son factores importantes en la retención. Las membranas de UF tienen una estructura más porosa que las membranas de ósmosis inversa, las cuales no tienen poros definidos y tienen sólo espacios entre las fibras de polímeros. El grado de retención del soluto depende de las características de la membrana y del peso molecular del mismo. Normalmente, las presiones de trabajo en estos sistemas varían entre 70 y 700 kPa. Los requerimientos de energía varían con el diseño del sistema. Las membranas de ultrafiltración están comercialmente disponibles en acetato de celulosa, polisulfato, acrílico y otros polímeros no celulósicos.

#### Separación por congelación

El proceso de separación por congelación se basa en el hecho de que el hielo formado a partir de una solución salina está exento de sales (por ejemplo los icebergs). Basta recoger los cristales y lavarlos para obtener un hielo que después de fundido proporciona agua dulce. El frío requerido para la congelación no puede obtenerse con refrigeradores ordinarios, ya que el proceso sería muy costoso dada la mala transmisión del calor. Uno de los procesos posibles se basa en la pulverización del agua cruda (preenfriada a casi la temperatura de congelación) dentro de una cámara a presión igual a la del vapor del agua para la misma temperatura. Parte del agua introducida se evapora súbitamente y origina un fuerte enfriamiento del líquido restante para dar cristales de hielo. El vapor obtenido es

#### 9. Diagrama de flujo de un sistema de ósmosis inversa



extraído y comprimido y sirve para ayudar a fundir el hielo. El agua de alimentación se enfría mediante el agua dulce obtenida y se acaba de enfriar con la salmuera residual.

Los principales problemas son el gran vacío que se requiere y el tamaño del compresor de vapor, lo que hace que la instalación sea cara y con problemas mecánicos. El enfriamiento preciso puede lograrse con un hidrocarburo adicional, tal como butano, funcionando de forma similar al vapor del proceso anterior. Así, se puede trabajar con menor vacío y menores compresores. El agua destilada y el butano se separan con facilidad por ser inmiscibles y de densidad diferente. El proceso está detenido por problemas tecnológicos en los ensayos en planta piloto.

La separación del hielo de la salmuera es un problema común a ambos procedimientos y se puede realizar por centrifugación, compresión o lavado. El lavado es el sistema más sencillo, pero supone destinar hasta un 5% del agua producida al mismo, la cual se pierde. El tamaño de los cristales de hielo producidos es importante para ahorrar agua de lavado. En el momento actual existen muy pocas plantas de ese tipo y el futuro del proceso es incierto. Para pequeñas producciones, se puede emplear el frío nocturno para desalinizar.

#### Cambio iónico

El proceso de cambio iónico se basa en la propiedad de ciertas resinas catiónicas saturadas con  $H^+$ , de intercambiar éste por los cationes del agua, y de ciertas resinas aniónicas saturadas con  $OH^-$  de cambiar éste por los aniones del agua. Después de pasar el agua cruda por una columna con resina catiónica y otra con resina aniónica, queda agua pura debido a que  $H^+ + OH^- = H_2O$ . Una vez agotada la capacidad de

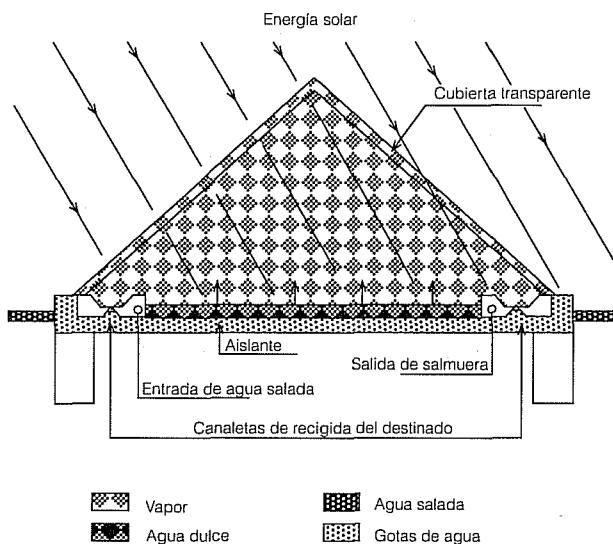
intercambio de las resinas, éstas pueden regenerarse con reactivos adecuados, por ejemplo  $H_2SO_4$  o  $HCL$  para las catiónicas y  $NaOH$  para las aniónicas.

El costo de los reactivos de regeneración es muy elevado, lo que hace que el intercambio iónico únicamente sea útil para producir agua de elevada pureza a partir de aguas poco salinas (menos de 2,000 ppm de residuo seco), pero no a partir de aguas salobres o saladas. Aunque se trabaja mucho en el abaratamiento del proceso de regeneración, aún no se han conseguido avances importantes, salvo, quizás, en el tratamiento de aguas sulfuradas con una composición apropiada. El intercambio iónico se emplea muy profusamente en la industria cuando se precisa de agua con muy baja salinidad para procesos o calderas.

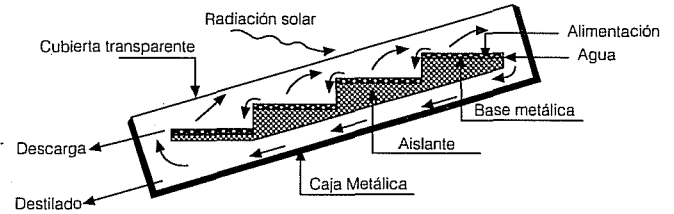
### Destilación solar

En la destilación solar el aporte de la energía es gratuito. La producción de agua dulce por este sistema es similar a lo que ocurre en la naturaleza durante el ciclo del agua, para mantener el balance hidrológico. En este proceso se trata de aprovechar el efecto de calentamiento de la radiación solar para producir vapor en un estanque con una cubierta transparente. El estanque es de muy escasa profundidad, y el calor lo absorbe y transmite el fondo del mismo. El vapor producido se condensa sobre el cristal del techo y el agua es recogida en unos canalones laterales. Es un proceso adecuado para satisfacer necesidades individuales, familiares o de pequeños grupos. Emplea agua de mar o salobre.

### 10. Destilador solar tipo caseta



### 11. Destilador solar por convección natural (tipo escalera)



En México se han diseñado y construido dispositivos de tipo modular, con charola de fibra de vidrio a dos aguas o con sólo una inclinación. El vapor se condensa en la superficie interior de los vidrios y el agua viaja por gravedad, mediante un sistema de canaletas y ductos hasta el colector de agua dulce. La producción que razonablemente puede esperarse en los destiladores solares tipo modular, depende del valor real de la insolación media horizontal anual, y en condiciones óptimas podría estimarse en 6 litros por metro cuadrado de destilador por día. Este proceso es muy efectivo porque la mayoría de los materiales químicos que se encuentran en el agua no son volátiles a las temperaturas normalmente empleadas, por lo que permanecen en la solución no evaporada. Existen diferentes tipos de destiladores reportados en la bibliografía y se pueden clasificar en forma general en:

- Destiladores tipo caseta,
- Destiladores por convección natural (tipo escalera).
- Destiladores capilares.

#### Destiladores tipo caseta

Las partes básicas de un destilador tipo caseta son: el evaporador, formado por la base metálica que absorbe un alto porcentaje de la radiación incidente, y el condensador, formado por la cubierta transparente (ilustración 10). La cubierta debe ser transparente al espectro visible de la radiación solar, para permitir el paso de ésta, y opaca a longitudes de onda mayores (infrarrojo), para evitar la pérdida de calor por radiación del interior del destilador al ambiente. Es importante seleccionar regiones donde sea posible obtener alrededor de los 500 Watts/m<sup>2</sup> durante la mayor parte del año, (Blanco 1997).

#### Destilador por convección natural (tipo escalera)

La característica principal del diseño de este destilador consiste en favorecer las corrientes de convección internas (ilustración 11). En este dispositivo, la superficie de condensación es tanto la cubierta transparente



1. Características más destacadas de los principales sistemas de desalinización

Proceso	Siglas	Fuentes de energía	Consumo de energía ¿depende de la salinidad?	Proceso	Siglas	Fuentes de energía	Fuentes de energía ¿depende de la salinidad?
DESTILACIÓN	DME		No	DE MEMBRANA			
1. De múltiples efectos		Et	No	1. Electrodialisis	ED	Ee	Sí
1a. De tubos sumergidos	TS	Et	No				
1b. De tubos largos verticales	TLV	Et	No				
2. Súbita en múltiples etapas	DSME	Et	No	2. Osmosis inversa	OI	Em	No
3. Compresión de vapor	DCV	Em Et	No	SOLIDIFICACIÓN			
4. Solar	S	Es	No	1. Congelación	C	Em	No
PROCESOS FÍSICO QUÍMICOS							
1. Cambio iónico	II	Eq	Sí en gran manera				

Et= energía térmica; Em= energía mecánica; Ee= energía eléctrica; Eq= energía química; Es= energía solar

2. Resumen de opciones de desalinización

Tecnología	Solar	Destilación en en múltiples efectos	Destilación súbita en múltiples etapas	Compresión de vapor	Osmosis inversa	Electrodialisis	Separación por congelación
¿Probada?	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Tipo de Energía	Térmica	Térmica y eléctrica	Térmica y eléctrica	Mecánica o eléctrica	Mecánica o eléctrica	Eléctrica	Térmica y/o eléctrica
Factores en la demanda de potencia	Temperatura ambiente, viento, insolación	Temperatura ambiente y de agua a tratar	Temperatura ambiente y de agua a tratar	Eficiencia de intercambio de calor	Salinidad del agua, recuperación de energía	Salinidad del agua	Temperatura ambiente
Consumo de energía (kWh/m <sup>3</sup> )	642	32 (Térmica) 1 a 2.5 (Eléctrica)	48 a 441 (Térmica) 3 (Eléctrica)	11 a 25	4 a 17	0.8 a 11	6 a 108
Costos inversión (USD/m <sup>3</sup> )	9,000 a 66,000	1,000 a 12,000	800 a 15,000	1,100 a 4,200	1,600 a 2,000	280 (salobre)	2,400
Estimación costos ciclo de vida (USD/m <sup>3</sup> )	3.4 a 50	0.7 a 4	1.2 a 4.2	0.5 a 5.0	0.5 a 3	0.5 a 3 (salobre)	No determinado
Tamaño típico de instalación (m <sup>2</sup> /día)	0.005 a 5	1,000 a 10,000	1,000 a 100,000	2 a 1,000	0.01 a 10,000	0.1 a 200	No determinado
Pretamiento requerido	Ninguno	Filtración, control de incrustaciones, deaireación	Filtración, control de incrustaciones, deaireación	Filtración, control a escala	Filtración, otros (depende del agua a tratar)	Filtración, otros (depende del agua a tratar)	No determinado
Mantenimiento requerido	Inspección y reparación de goteras, remoción de polvo y sales	Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas	Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas	Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas	Reparación de filtros, filtros, limpieza de membranas, mantenimiento de bombas, control de corrosión	Reparación de filtros, limpieza de membranas, mantenimiento de bombas	No determinado
Complejidad operacional	Baja	Alta	Alta	Alta	Depende de la tasa de recuperación y pretatamiento	Depende de la tasa de recuperación y pretatamiento	Alta (separación de hielo)
Requerimiento de repuestos	Ninguno	Filtro	Filtro	Filtro	Filtro (mensual) Membranas (2 a 5 años)	Filtro (mensual) Membranas (10 años)	uno
Rango de salinidad	Amplio	Amplio	Amplio	Amplio	Amplio	<10,000 mg/L	Amplio

Fuente: K. E. Thomas. 1997

como la cara metálica que forma el cuerpo del destilador y el evaporador se encuentra en el espacio comprendido entre ambas. De esta manera se incrementa la superficie de enfriamiento y condensación, dando por resultado un flujo convectivo muy eficiente originado por los cambios de densidad que experimenta la mezcla aire-vapor como consecuencia de los cambios de temperatura y humedad, aumentando la productividad del destilador.

*Destiladores capilares*

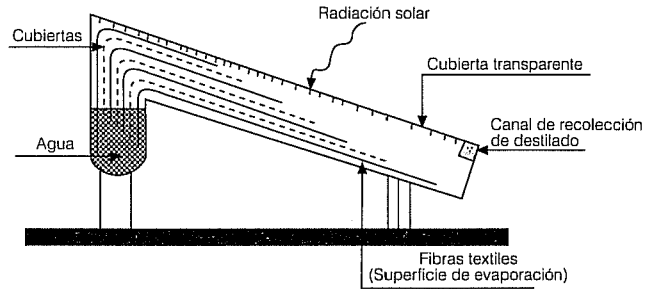
Los destiladores capilares tienen la característica de emplear como dispositivo de evaporación materiales textiles ennegrecidos. Un extremo de la tela se mantiene sumergida en un recinto que contiene el agua por destilar (ilustración 12), para, de esta manera, mantenerla constantemente húmeda.

En el cuadro 1 se presentan las características de los principales sistemas de desalación, y en el 2 las opciones de tratamiento.

*Tecnología de desalación alimentada con energía no convencional*

La mayoría de las tecnologías de desalinización permiten la operación intermitente, y ser alimentadas con energía no convencional. En el cuadro 3 se presenta el estado del aprovechamiento de energía no convencional en los procesos de desalinización (Thomas, 1997). En él puede observarse que se han utilizado fuentes

**12. Destilador capilar**



**3. Estado del aprovechamiento de la energía renovable en desalinización**

Fuente de energía renovable	Tecnologías de Desalinización				
	Destilación en Múltiples Efectos	Destilación Súbita en Múltiples Etapas	Compresión de vapor	Ósmosis Inversa	Electrodialísis
Solar	Plantas piloto (España, 1988, U.A.E. 1984 <i>Rugged ME</i> )	Plantas piloto (Kuwait, 1984, México, 1978)	n/a	n/a	n/a
Solar - Eléctrica o Mecánica		Plantas piloto solar más una máquina agitadora (Texas, 1987)		Planta piloto mecánica, de manejo directo (Francia, 1978)	
Batería fotovoltaica con invertidor	n/a	n/a		Comercial	Planta piloto (Japón, 1988)
Batería fotovoltaica sin invertidor	n/a	n/a		Comercial, manejo directo (Australia, 1996)	Prototipo comercial, batería/CD (Nuevo México, 1995) <i>PV-manejo directo</i>
Viento-Batería	n/a	n/a	Planta piloto (España, en construcción) <i>Viento-batería-invertidor</i>	Plantas piloto (Francia, 1990, España, en construcción) <i>Viento - batería -invertidor</i>	Planta piloto (España, en construcción) <i>Viento-batería</i>
Viento-Diesel			<i>Viento - diesel - administrador de carga</i>	Plantas piloto en construcción (España, Grecia) <i>Viento - diesel - administrador de carga</i>	
Viento - Mecánica	n/a	n/a		Plantas piloto con almacenamiento de agua presurizada (Australia, 1990)	n/a
Viento - Eléctrica Manejo directo	n/a	n/a		Planta piloto con control de corte (Alemania, 1979, Francia 1987) <i>Almacenaje de agua presurizada</i>	-

(Texto en itálicas indica áreas de investigación de gran interés en términos de comercialización. Las celdas blancas representan una combinación de energía renovable y desalinización, que no ha sido probada. n/a significa que la tecnología no puede ser alimentada con esta forma de energía). Fuente K. E. Thomas, 1997

4. Ejemplos de instalaciones de ósmosis inversa alimentada con energía no convencional

Localización y fuente de energía	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	Demanda de energía (kWh/m <sup>3</sup> )	SDT del agua a tratar (ppm)	Tasa de recuperación (%)	Energía almacenada/ condiciones de operación	Constructor y año de construcción	Referencia
<b>Fotovoltaica</b>							
Concepción del Oro, México 2.5kW	0.71	6.9	3000	37	Ninguna/operación intermitente	DIGAASES y GKSS, 1978	Fries et al. (1982)
Jeddah, Arabia Saudita 8 kW	3.2	13	42800	Mnr	Batería/operación en el día	Mobil, para SOLERAS, 1981	Abdul-Fattah (1986)
Perth, Australia 1.2 kW	0.4 a 0.7	4.0 a 5.8	Mnr	Mnr	Batería/operación en el día	SERIWA, 10982	Block (1989)
Vancouver, Canadá, 0.48 kW	0.5 a 1.0	10	Mnr	Mnr	Batería/Mnr	Mnr, 1984	Block (1989)
Gillen Bore, Australia 4.16 kW	1.2	Mnr	1,600	Mnr	Mnr	CAT, 1993	Harrison et. al. (1996)
Sadous, Arabia Saudita, 10.08 kW	5.7	Menor 18	5,700	21 a 35	Batería /operación intermitente	KACST, 1994	Hasnaim (1995)
St. Lucie, Florida, E.U.A. 2.7 kW	0.64	13	32,000	10	Batería/operación continua	FSEC, 1995	Huggins et. al. (1995)
Doha, Qatar 11.2 kW	5.7	10.6	35,000	Mnr	Mnr	Mobil, Mnr	Block (1989)
<b>Viento-eléctricidad</b>							
Suderog, North Sea 11 kW Turbina Aeroman	4.8	36.3	28,000	25	Ninguna/ relacionada a velocidad del viento	GKSS 1979/ Cambios en 1985	Petersen (1997)
Planier, Francia 4 kW, Turbina Aerowatt	12	7.8	Mnr	25	Ninguna/ relacionada a velocidad del viento	CEA, 1982	McBride et. al. (1987)
Pozo Izquierdo, España, 2,200 kW, Turbina Enercon de recuperación de energía	8 módulos de 25m <sup>2</sup> /día	Mnr	38,000	Mnr	Batería/carga modular	CIEA, en construcción	Cruz et. al. (1996)
Drenec, Francia 10 kW, Turbina Aerowatt	60 personas	Mnr	38,000	Mnr	Batería/operación continua	Aerowatt, 1990	Cordis (Base de datos)
<b>Viento-Diesel</b>							
Fuérteventura, Islas Canarias, España, 225 kW Turbina Vestas V27, 240 kW disel	56	7.1	3,5000	Mnr	Minired/carga variable	ITER, 1995	Cruz et. al. (1996)
<b>Viento-mecánica</b>							
Perth, Australia, bomba de aereomotor	0.213	5	2,000 a 6,000	6 a 11	Almacenaje de agua presurizada/operación intermitente	Murdoch University, 1990	Robinson et. al. (1992)
<b>Solar-mecánica</b>							
Cadarache, Francia, 223 m <sup>2</sup> de platos colectores	60	Mnr	2,000	Mnr	Ninguna/mnr	CEA, 1978	Buros (1980)

Nota; Mnr = Medición no realizada. Fuente: K. E. Thomas, 1997

de energía no convencional, como la solar directa o el viento en forma aislada, o en combinación con fuentes convencionales como el Diesel, con resultados aceptables en plantas a nivel piloto. En el cuadro 4 se presentan ejemplos de plantas de ósmosis inversa operando con fuentes no convencionales de energía.

*Desalinización del agua con energía nuclear*

La búsqueda de otras fuentes de energía para desalinizar agua se ha orientado también hacia la nuclear.

Los partidarios de ello argumentan que dicha energía es competitiva en lugares donde los hidrocarburos son escasos, que se fomenta la diversificación energética y que se evitan las emisiones al aire causantes de la lluvia ácida y del cambio climático. Quienes no aceptan esta tecnología argumentan los impactos ambientales, pero sobre todo los riesgos ecológicos.

En los años 60 se fundó la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), por sus siglas en inglés, la cual realizó en 1968 el primer simposio internacional de empleo de la energía nuclear para desalinizar agua. A

partir de esa fecha se realizan diversas actividades orientadas a intercambiar experiencias en la materia. Existen estudios de factibilidad hechos por la IAEA, y están en marcha algunas actividades a nivel bilateral o nacional sobre la materia. Hay plantas desalinizadoras acopladas a centrales nucleares en Japón y Kazakstán que han producido agua libre de sales durante muchos años, y actualmente existen proyectos para usar esta tecnología en China, La India, Corea, Marruecos y Rusia.

Otra tecnología que empieza a tomar impulso para desalinizar agua es el empleo de superconductores. Aunque por el momento se encuentra en etapa de investigación, puede en corto plazo ser una opción más para desalar agua.

#### *Tecnología mexicana en el diseño y construcción de plantas desalinizadoras*

En México (Velasco, 1995) se han construido varias plantas desalinizadoras. En 1972, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP) construyó varias plantas que fueron operadas por otras dependencias. En el ejido Tanque de Hacheros, municipio de Mazapil, Zacatecas, y en el ejido Majoma del mismo municipio y estado, se construyeron dos plantas que fueron puestas en operación en 1983. Sin

embargo, hubo en los motores fallas que no se pudieron solucionar y quedaron fuera de circulación. En el estado de Coahuila existen cinco plantas de este tipo, que estaban trabajando satisfactoriamente hasta 1995. No se tiene información de las mismas a la fecha. Éstas se encuentran ubicadas en los ejidos 28 de Agosto, San Rafael de los Milagros, El Sol y 4 de Marzo, todas dentro del municipio de Cuatro Ciénegas, y una más en el ejido Villa Progreso, del municipio del mismo nombre.

La Oficina de Aguas Salinas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (Fernández *et al*, 1997) inició un plan de abasto de pequeños destiladores de caseta, con una superficie útil aproximada de 0.8m<sup>2</sup> cada uno. Estaban construidos con fibra de vidrio, que demostró ser un material sumamente durable para esta aplicación. La parte interna de la charola se pintaba con negro mate incorporado en la propia fibra de vidrio, y los bordes formaban un canal recolector de destilado; la cubierta estaba formada por dos láminas de vidrio inclinadas a 45° con respecto a la horizontal, lo que les dio el sobrenombre de casetas de dos aguas (Reyes *et al*, 1979, citados por Porta *et al*, 1997) Durante el periodo de 1974 a 1977, se instalaron en México 16 plantas solares con el apoyo de técnicos franceses (Sofretes, 1974, citado por Velasco, 1995), dentro del programa "Tonatiuh", financiado por el Gobierno Federal a través de la Secretaría de Salubridad y Asistencia

#### 5. Datos generales sobre 16 plantas solares construidas en México de 1974 a 1977

Ciudad y estado	Año	Área del colector (m <sup>2</sup> )	Capacidad de extracción (m <sup>3</sup> /h)	Profundidad de extracción (m)	Horas de operación	Uso del Agua	Ubicación
Caborca, Son.	1974	90	3	45	5 a 6	C. Humano	Escuela
Ceballos, Dgo.	1974	90	4	40	5 a 6	C. Humano	Dispensario médico
Cedral, SLP	1975	80	4	20	5 a 6	Irrigación	Colectores a suelo
Mexicali, BC	1975	80	7	20	5 a 6	C. Humano	Restaurant
La Cruz, Chih.	1975	80	7	30	5 a 6	C. Humano	Bodega
Escárcega, Cam.	1975	70	4	25	5 a 6	C. Humano	Escuela
San Luis de la Paz, Gto.	1975	15000	150	54	5 a 6	C. Humano	Institución científica
Las Canes, Zac.	1976	90	4	30	5 a 6	Irrigación	
						C. Humano	Almacén
						C. Animal	
Todos Santos, BC	1976	90	4	30	5 a 6	C. Humano	Escuela
Tolces, Zac.	1976	90	4	30	5 a 6	C. Humano	Escuela
David Gtz., QR	1976	90	4	50	5 a 6	C. Humano	Dispensario
Yanhuitlán, Oax.	1976	90	4	22	5 a 6	Irrigación	Escuela
Ixtacuixtla, Tlax.	1976	90	4	30	5 a 6	Irrigación	Instituto
Jaumave, Tamps.	1976	90	4	13	5 a 6	C. Humano	Almacén
						C. Animal	
Nocac, Yuc	1976	90	4	50	5 a 6	C. Humano	Escuela
						C. Animal	
Paseo Guayabal	1977	90	4	35	5 a 6	C. Humano	Colector sin suelo

FUENTE: TERRA, Vol. 13, No. 4, 1995

## 6. Relación de algunas plantas desaladoras construidas por la DIGAASES

Localidad y Estado	Tipo	Capacidad m <sup>3</sup> /día	Población beneficiada	Localidad y estado	Tipo	Capacidad m <sup>3</sup> /día	Población beneficiada
URIOM La Paz, B.C.S.	C.V.	60	Experimental	URIOM Concepción del Oro, Zac.	O.I.	15	Experimental
URIOM La Paz, B.C.S.	O.I.	8	Experimental*	Ejido 29 de Agosto, Coah.	O.I.	8	700
URIOM La Paz, B.C.S.	U.E.U.E.	1	Experimental	Ejido San Rafael de los Milagros, Coah.	O.I.	8	517
Bahía de Tortugas, B.C.S.	D.S.M.E.	300	3,000	Ejido El Sol, Coah.	O.I.	8	702
Isla Natividad, B.C.S.	C.V.	40	300	Ejido 4 de Marzo, Coah.	O.I.	8	468
Bahía Asunción, B.C.S.	O.I.	100	800	Ejido Fco. Villa, Tamps.	O.I.	300	3,119
Punta Abreojos, B.C.S.	C.V.	100	900	Ejido La Leona, N.L.	O.I.	10	500
Punta Abreojos, B.C.S.	C.V.	55		San Vicente de Gñez., N.L.	O.I.	10	450
Punta Abreojos, B.C.S.	C.V.	36		San Cayetano de Vacas, N.L.	O.I.	10	490
Punta Abreojos, B.C.S.	C.V.	36		Santa Rita, N.L.	O.I.	10	600
Isla Margarita, B.C.S.	C.V.	60	862	Estanque Palomas, Coah.	O.I.	10	707
Isla Margarita, B.C.S.	C.V.	60	862	Villa Progreso, Coah.	O.I.	10	1,200
Puerto Chale, B.C.S.	D.S.	1	103	Majoma, Zac.	O.I.	10	530
El Cardón de San Ignacio, B.C.S.	D.S.	0.5	20	La Pesca, Tamps.	C.V.	60	1,351
La Bocana, B.C.S.	C.V.	100	1,350	Puerto Lobos, Sonora	D.S.	1.5	
Las Barrancas, B.C.S.	C.V.	30	250	San Miguel, Q.R.	O.I.	15	Experimental
Punata Abreojos, B.C.S.	C.V.	100	950	Calderitas, Q.R.	C.V.	60	390
Isla Socorro, Col.	C.V.	60	250	Santa Clara, Son.	O.I.	200	1,500
URIOM Mexicali, B.C.	O.I.	50	Experimental	Santa Rosalita, B.C.	O.I.	30	125
URIOM Mexicali, B.C.	O.I.	50	Experimental	Mexicali	O.I.	1,000	5,000
San Quintín, B.C.	O.I.	103	120 (flotante)	San Miguel, Q.R.	D.S.	1,000	26,000
					M.E.		
Bahía de los Ángeles, B.C.	C.V.	40	650				
El Riito, Son.	O.I.	200	4,600				

URIOM: Unidades regionales de investigación, operación y mantenimiento; C.V.: Compresión de vapor; O.I.: Ósmosis inversa;

U.E.U.E.: Un efecto una etapa; D.S.M.E.: Destilación súbita de múltiples etapas; D.S.: Destilación solar; FUENTE: DIGAASES, SEDUE, 1979.

(SSA). Las principales características de estas plantas se presentan en el cuadro 5. Actualmente, ninguna de las 16 plantas construidas mediante el citado programa está operando.

La Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar (DIGAASES), de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), diseñó, construyó y puso en marcha en 1979 varias plantas desalinizadoras de distintas capacidades y procesos. En el cuadro 6 se presenta una relación de estas plantas. En el 7 se anotan las plantas de ósmosis inversa instaladas en el país, y en el 8 se citan las plantas instaladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

### Costos de la desalinización

Los costos de la desalinización varían en un rango muy amplio, pudiendo darse el caso de que una planta valga 250 veces el costo de las plantas más baratas (Gordon, 1992). Esto obedece a una serie de factores, entre los que se destacan los siguientes:

*Calidad del agua de la fuente.* Este factor se refleja directamente en los costos de inversión y de energía necesarios para el proceso de desalinización.

*Calidad del agua demandada.* El uso que se le dará al agua impondrá una serie de parámetros químicos diferentes en cada caso, y por lo tanto con costos asociados diferentes.

*Capacidad de la planta.* Las plantas grandes normalmente tienen menores costos de inversión y de operación por metro cúbico de agua producida que las plantas pequeñas.

*Las condiciones del sitio de instalación.* La ubicación del sitio, la topografía, los accesos a la planta, la cercanía a las fuentes de energía, los sitios adecuados para depositar la salmuera o las necesidades de pretratamiento, entre otros, pueden ser factores que influyan determinante en los costos de la planta.

*Los costos de la energía.* Cada proceso de desalinización demandará diferentes tipos y cantidades de energía, que tienen costos diferentes relacionados con cada uno de ellos. Algunas plantas requieren vapor, otras calor y otras más energía eléctrica; ello impactará de manera diferente los costos de la planta.

7. Relación de los sistemas de ósmosis inversa instalados en México para uso industrial y/o potable

Compañía	Ubicación	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	Inicio	Fuente alimentadora de agua	Uso de agua
1. Altos Hornos de México (AHMSA) Fabrica de Acero I y II	Monclova, Coah.	a) 2,180	1976	Agua de pozo (3,400 umho/cm)	Construcción de Boilers de Alta presión (después del pulimiento I.E.)
		b) 820	1988		
		c) 820	1977	Agua de pozo (3,400 umho/cm)	
		d) 820 x 4	1980		
		e) 1,090	1981		
			1988	Agua de pozo y de río	
2. General Motors de México Planta ensambladora	Ramos Arizpe, Coah.	2,180 (3 unidades de 727m <sup>3</sup> /día c/u)	1981	Agua de pozo (2,000 mg/l SDT)	Agua potable y de proceso
3. General Motors de México Planta de ingeniería	Ramos Arizpe, Coah.	1,745 (5 unidades de 349 m <sup>3</sup> /día c/u)	1982	Agua de pozo (2,100 - 2,300 mg/l SDT)	Agua potable y de proceso
4. Química de Rey. Industrias Peñoles	Laguna del Rey, Coah.	a) 500	1972	Agua de pozo gaseosa (5,000 mg/l SDT)	
		b) 1,000	1984	Agua de pozo (4,100 - 4,500 mg/l SDT)	
5. Industria de Alkali (Fab. de sosa cáustica)	Villa de García, N.L.	a) 1,250	1982	Agua de pozo	
		b) 1,250	1986		
6. Cervecería Cuauhtémoc (Fab. de cervezas)	Tecate, B.C.	a) 380	1974	Agua de pozo (900 - 950 mg/l TDS)	Agua de proceso
		b) 380	1979		
		c) 380	1984		
7. Papelería Maldonado	Monterrey, N.L.	980	1987	Agua de pozo	Agua de proceso
8. Coca Cola	Campeche, Cam.	a) 600	1991	Agua de pozo	Agua de proceso (fabricación de agua gaseosa)
		b) 230	1978		
		c) 230	1983		
9. Fábricas Monterrey	Ensenada, B.C.	575	1978	Agua de pozo	Agua de proceso
10. Renault de México Planta de Ingeniería	Gómez Palacio, Dgo.	530	1984	Agua de pozo (conductividad 1,750 umho/cm)	Agua potable y de proceso
11. Chrysler de México Planta de Ingeniería	Ramos Arizpe, Coah.	a) 254	1981	Agua de pozo (conductividad 2,500 umho/cm)	Agua potable y de proceso
		b) 186	1982		
12. HYLSA	Monterrey, N.L.	380	1990	Agua de pozo	Agua de proceso
13. GALVAK	Monterrey, N.L.	272.5		Agua de pozo	Agua de proceso
14. Pita, S.A.	Mexicali, B.C.	230	1978	Agua de pozo	Agua embotellada
15. Coca Cola	Cancún, Q.R.	230	1980	Agua de pozo	Fabricación de agua gaseosa
16. General Mills	Tampico, Tam.	230	1978	Agua de pozo	Agua de Proceso
17. Univec (Fab. de Caprolactam)	Salamanca, Gto.	230	1991	Soplar torre de enfriamiento (descarga cero)	Construcción de torre de enfriamiento (Proyecto de descarga cero)
18. Hotel Sol Caribe	Cozumel, Q.R.	200	1984	Agua de pozo	Agua potable
	Total:	22,612.5			

Fuente: Desalación y reúsos de agua en México, Agua potable, 1992, Vol. 7, No. 95, págs. 26-30

**8. Relación de sistemas de ósmosis inversa instalados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE)**

Estación generadora de energía eléctrica	Ubicación	Capacidad (m³/día)	Inicio	Fuente alimentadora de agua
1. Monterrey	El Mezquital, San Nicolás de los Garza, N.L.	2,020	1979	Agua de pozo (1,900 umho/cm) Algunas veces agua potable (650 umho/cm)
2. Nachicocán	Nachicocán, Mérida, Yuc.	245	1981	Agua de pozo (720 umho/cm)
3. Río Bravo	Río Bravo, Tam.	a) 2,240 b) 75	1981 1980	Agua del Río Grande (680 umho/cm)
4. José López Portillo	Río Escondido, Nava, Coah.	2,880	1981 (parte) 1984 (todo)	Agua de pozo (850-1,250 umho/cm)
5. Rosarito*	Rosarito, B.C.	600	1983	Agua salina (55,000 umho/cm)
6. Ciclo combinado	Hiunalá, Pesquería, N.L.	440	1984	Agua de pozo (1,850 umho/cm)
7. Benito Juárez	Samalayuca, D.B., Chih.	a) 950 b) 820	1985 1991	Agua de pozo (2,000 umho/cm) Agua de pozo
8. Valle	Cd. Delicias, Chih.	820	1991	Agua de pozo
9. Unidades móviles	Varias	1,360	1991	Agua de pozo
	Total:	12,450		

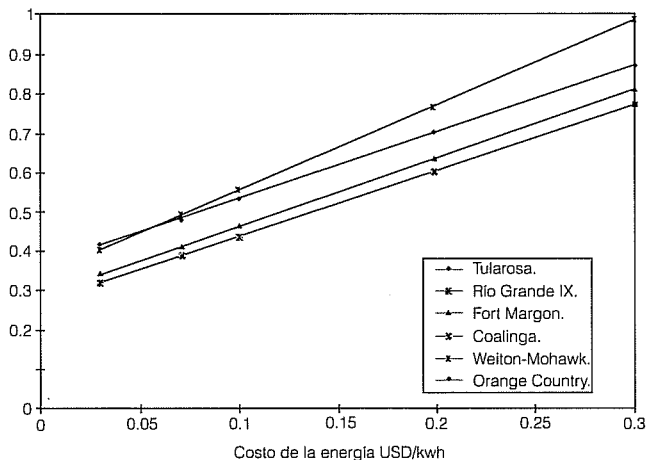
Nota: En todos los casos de sistemas de ósmosis inversa se usó generación de vapor (después limpiando por cambio de iones). Actualmente la planta de Rosarito, B. C., está desalando agua mediante destilación flash.  
Fuente: Desalación y reusos de agua en México, Agua potable, 1992, Vol. 7, No. 95, págs. 26-30

*Proceso de desalinización.* Cada proceso tiene costos que pueden variar en un rango muy amplio.

*Operación y mantenimiento.* Los costos de reactivos, filtros, membranas, mano de obra y otros, varían de planta a planta.

**13. Relación de la energía-costo del agua desalada**

Costos del agua USD/m



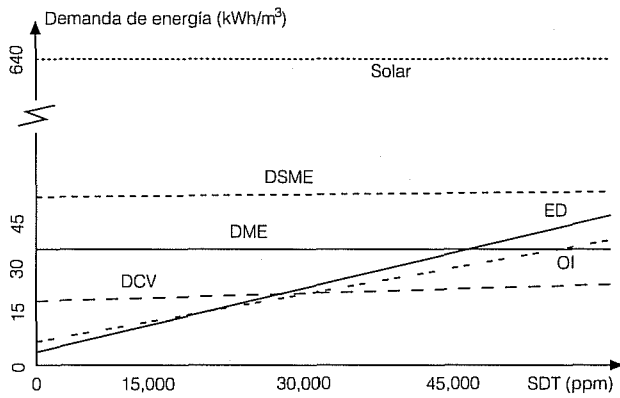
Para dar una idea del papel fundamental que representa el costo de la energía en la desalinización del agua, se muestra la ilustración 13, con datos obtenidos por Block (1989), para el proceso de ósmosis inversa, con un porcentaje de recuperación del agua del 70%.

Otro factor que influye directamente en la demanda de energía, y en consecuencia en el proceso de desalinización, son los sólidos disueltos totales, SDT. En la ilustración 14 puede observarse que la ósmosis inversa y la electrodiálisis incrementan la demanda de energía en relación directa con los SDT. La ilustración 15 muestra la relación existente entre el consumo de energía y el costo de producir un metro cúbico de agua.

*Desalinización de aguas salobres*

Se consideran como aguas salobres a aquellas que varían entre 500 y 3,000 ppm de sólidos disueltos totales. En el cuadro 9 se presenta el costo ( incluye inversión, operación y mantenimiento ) del metro cúbico de agua tratada. Dado que casi toda la tecnología se encuentra disponible en el extranjero, para efectos de comparación los costos se presentan en dólares.

**14. Efecto de los sólidos suspendidos totales en la demanda de energía.** Fuente: K. E. Thomas, 1977

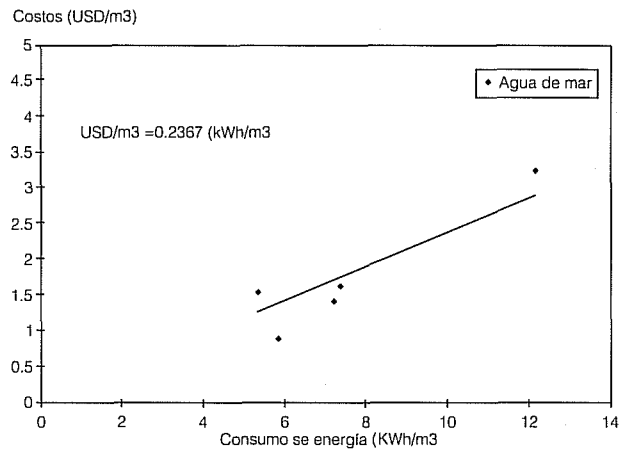


Como puede observarse en el cuadro anterior, el costo promedio del metro cúbico de agua salobre tratada con diferentes procesos es de USD 0.35/m³, con la excepción del caso en que se agrega el costo de producir energía por medios fotovoltaicos y almacenarla en baterías.

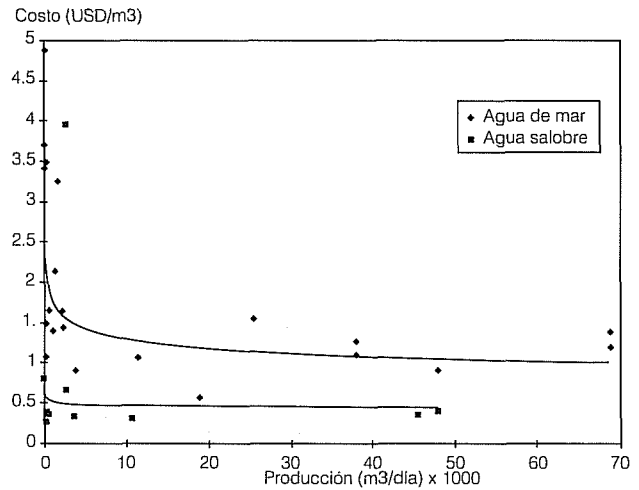
*Desalinización de agua de mar*

En el cuadro 10 se presentan los costos por metro cúbico tratado de agua con concentraciones de sales superiores a las 3,000 ppm. El costo promedio del metro cúbico es de USD 1.54, nuevamente con la excepción de los procesos en que se agrega el costo de generar energía y almacenarla en baterías. En la ilustración 16 se presenta una comparación de los costos de desalinizar agua utilizando el proceso de ósmosis inversa, donde puede observarse que los costos de desalinizar agua salobre prácticamente son independientes de la

**15. Relación consumo de energía-costo mediante el proceso de ósmosis inversa**



**16. Relación producción de agua desalada-costo, mediante el proceso de ósmosis inversa para agua de mar y salobre**



**9. Costos del metro cúbico de aguas salobres tratadas**

Tipo de proceso	Costo USD/m³	Producción m³/día	Observaciones
Ósmosis inversa	0.34	45,455	Salinidad 1,600 ppm Costo de la energía eléctrica = USD 0.08/kWh
Ósmosis inversa	0.39	264	
Ósmosis inversa	0.29	10,568	Tiempo de operación de 6 a 24 h/día
	0.34	3,646	
Ósmosis Inversa	0.36	560	Tiempo de operación de 6 a 24 h/día
	0.4	47,952	
Ósmosis inversa con alimentación fotovoltaica	0.80	13	Tiempo de operación de 6 a 24 h/día
	3.96*	2,642	
Electrodialisis inversa	0.36	45,455	Salinidad 1,600 ppm
Ósmosis inversa, electrodialisis y electrodialisis inversa	0.26	264	
	0.66	2,640	

\*Los costos se incrementan ampliamente porque se considera la generación de energía y su almacenamiento en baterías de cadmio.



## 10. Costo del metro cúbico de agua de mar tratada

Tipo de proceso	Planta	Costo dólares/m <sup>3</sup>	Consumo de energía kWh/m <sup>3</sup>	Producción m <sup>3</sup> /día	Observaciones
Ósmosis inversa		1.18		68,750	
Ósmosis inversa		1.05		264	
		2.12		1,320	
Ósmosis inversa		0.9		47,952	
Ósmosis inversa	Virgin Gorda, Islas Vírgenes Británicas	3.46		215	
Ósmosis inversa		1.09		37,850	
Ósmosis inversa	City of Morro Bay USA	1.42	7.22	2,271	Salinidad 36,000 ppm Opera con seis pozos playeros. Su producción de recuperación es del 40 % para agua de mar y 65 % para agua salobre.
Ósmosis inversa	City of Santa Bárbara. USA	1.54	5.35	25,346	La velocidad del agua es de 3 cm/s, mientras que las corrientes marinas locales varían de 0 a 0.40 cm/s. La salmuera tiene concentraciones de 26,000 a 55,000 ppm.
Ósmosis inversa	Monterrey Bay Acuarium. USA	1.46		163	
Ósmosis inversa	PG and E Diablo Canyon Power Plant. USA	1.62	7.37	2,180	
Ósmosis inversa	San Diego County Water Authority (South Bay Desalination Plant ), USA	0.89	5.83	3,785	
		1.05		11,355	
Ósmosis inversa	SCE, Santa Catalina Island. USA	1.62		500	
Ósmosis inversa	U. S, Navy, San Nicolás Island. USA	4.86	90.84		
Ósmosis inversa	Chevron Gaviota Oil and Gas Processing, Plant, USA	3.24	12.16	1,554	
Ósmosis inversa		3.68		2.64	Costo de la energía eléctrica =
		1.37		1,057	USD 0.08/kWh
Ósmosis inversa con alimentación fotovoltaica		3.40		13.2	Tiempos de operación de
Destilación multiefecto		*10.00		2,642	6 a 24 h/día
Destilación multiefecto flash		1.08		37,850	Salinidad 36,000 ppm
Destilación	Metropolitan Water District of Southern California	1.25		37,850	Salinidad 36,000 ppm
		0.57		18,925	
Destilación multiefecto flash		1.20		68,750	
		**1.38			

\*Los costos se incrementan porque se considera la generación de energía y su almacenamiento en baterías de cadmio.

\*\* La diferencia de costos está asociada a diferentes tipos de energía utilizada por los procesos.

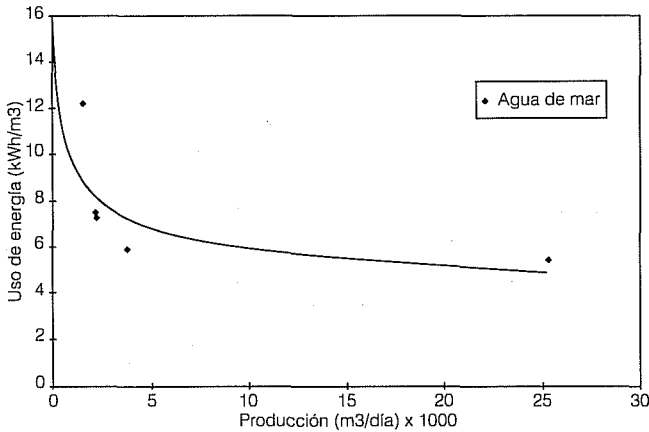
producción de la misma, cosa que no sucede con las plantas para desalinizar agua de mar, pues los costos disminuyen al aumentar la capacidad de la planta. También puede notarse que los costos de desalinizar agua de mar pueden ser hasta 10 veces mayores que los asociados con las aguas salobres.

En la ilustración 17 se presenta la relación entre producción en miles de metros cúbicos por día y el consumo de energía en kilowatts-hora por metro cúbico de agua producida, para agua de mar, donde puede observarse un comportamiento similar al mostrado en la ilustración 16, es decir, el consumo de energía disminuye sustancialmente con el tamaño de la planta.

### Plantas paquete

Existen en el mercado plantas paquete o semipaquete, recomendadas para gastos de entre 100 y 400 m<sup>3</sup>/día. Normalmente utilizan los procesos de compresión de vapor y ósmosis inversa, debido a que son los que mejor se adaptan a la operación de plantas generadoras de energía eléctrica pequeñas. Son utilizadas en plataformas petroleras, hoteles y restaurantes, o en lugares donde el agua dulce es escasa, como islas o costas. Los costos de una planta paquete para desalar 400 m<sup>3</sup>/día, incluyendo la operación y mantenimiento es de USD 2.48 por metro cúbico, con un proceso de

**17. Relación consumo de energía-costo, mediante el proceso de ósmosis inversa**



compresión de vapor, y USD 1.98 por metro cúbico, con ósmosis inversa. Gordon (1992), concluye que se pueden conseguir en el mercado plantas paquete o semipaqueo para tratar hasta 1, 900 m³/día, a costos de USD 2.64/m³, cuando la energía eléctrica cuesta del orden de USD 0.12/kWh.

*Desalinización utilizando energía solar*

Los costos de un destilador solar incluyen inversión, operación y mantenimiento, siendo el primero el más significativo, pues implica hasta un 95% del costo de producción del agua. El costo del agua desalinizada con esta tecnología varía de USD 9.00 a USD 12.00, por lo que aparentemente no puede competir con las tecnologías ya mencionadas. Sin embargo, tiene ventajas como la facilidad de operación, la posibilidad de utilizar materiales del sitio donde se pretende construir, la opción de utilizar mano de obra local sin preparación especializada y, sobre todo, los bajos costos de operación y mantenimiento, por lo que se puede ver como una tecnología propia para el medio rural y zonas marginadas, donde se requieren bajos volúmenes de agua y se cuenta con las condiciones para que se opere adecuadamente.

*Los costos de la desalinización en México*

En México, como ya se señaló anteriormente, existen hoteles e industrias que cuentan con plantas de desalinización. Por ejemplo, la CFE está produciendo, mediante el proceso de efectos múltiples, agua dulce a partir de agua de mar a un costo de \$ 7.00/m³ (pesos mexicanos).

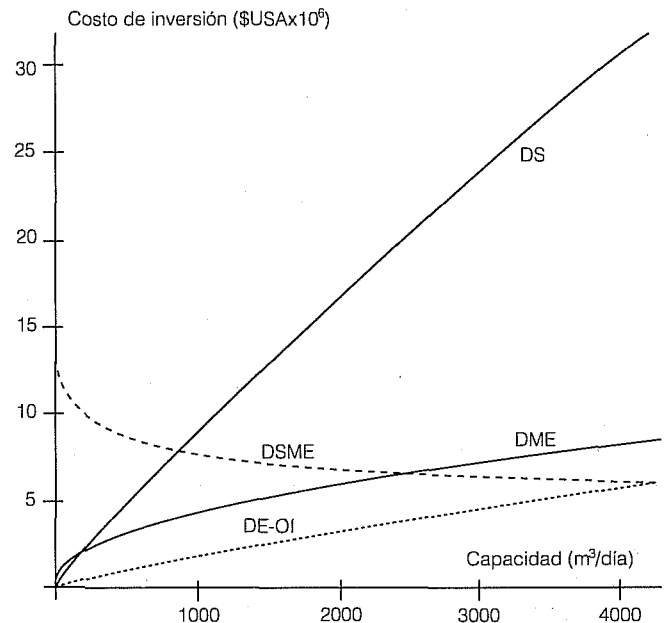
*Costos de inversión*

El arranque de cualquier proyecto de desalinización se ve fuertemente impactado por los costos de inversión; esto es, el costo de la planta sin incluir los costos de energía, operación, mantenimiento, ni los del pretratamiento. En la ilustración 18 se presenta la relación entre la capacidad de la planta y los costos de inversión. Es de notar el decremento de la inversión con el incremento de la producción de las plantas multietapas súbitas, y el marcado gradiente de la tecnología de destilación solar con el aumento de la producción. El U.S. Army Corps of Engineers ha estimado que los costos de inversión para tratar agua salobre varían entre USD 380 y USD 562/m³/día, y entre USD 1,341 y USD 2,379/m³/día, para desalar agua de mar.

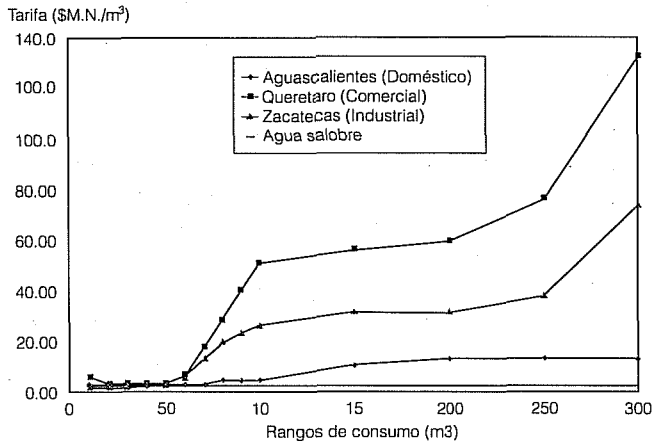
*Comparación de tarifas de fuentes convencionales y agua desalada en México*

Con objeto de hacer un análisis comparativo cualitativo de las tarifas en algunas ciudades del país con los costos internacionales de agua desalinizada, se han tomado los datos proporcionados por la CNA en el documento *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento a diciembre de 1995*, para aquellos casos en que se pudiera utilizar agua salobre y agua de mar para diferentes usos.

**18. Costos de inversión en función de la capacidad de las plantas. Fuente K.E. Thomas**



**19. Tarifas del agua en función de los rangos de consumo, incluida el agua salobre tratada**



En la ilustración 19 se presentan las tarifas por rangos de consumo para las ciudades de Aguascalientes (uso doméstico), Querétaro (uso comercial) y Zacatecas (uso industrial), y el costo de tratar agua salobre (USD 0.35/m³). Puede observarse que para los usos comercial e industrial, para consumos superiores a 50 m³, el agua desalinizada compite con las fuentes convencionales utilizadas en las ciudades que se anotan. En la medida en que los consumos aumentan, se incrementa la ventaja del costo del agua desalinizada, y aun en el caso del consumo doméstico es competitiva el agua salobre tratada.

Por otro lado, en la ilustración 20 se hace un ejercicio similar, pero ahora con agua de mar desalinizada. Puede notarse que en ciudades como Cancún, Chetumal y Cozumel, el agua desalinizada es una opción para los usos comercial e industrial.

**Impacto ambiental de las plantas desalinizadoras**

La construcción de una planta desalinizadora implica la necesidad de elaborar los estudios de impacto ambiental correspondientes, y proponer las medidas de mitigación de acuerdo con la normatividad mexicana. A continuación se analizan los principales factores que pueden impactar el medio ambiente y las medidas de mitigación a considerar durante la construcción y la operación de las plantas. Se citan en forma conjunta los impactos para plantas de agua salobre y de mar, pues los conceptos pueden aplicarse a un tipo o al otro, dependiendo de cada caso particular. Por ejemplo, puede haber plantas ubicadas en la playa que desalinicen agua salobre, y que por lo tanto afecten la zona costera, o bien plantas que desalinicen agua de

mar que requieran largas líneas de conducción y que, por ello, afecten tierras alejadas del mar.

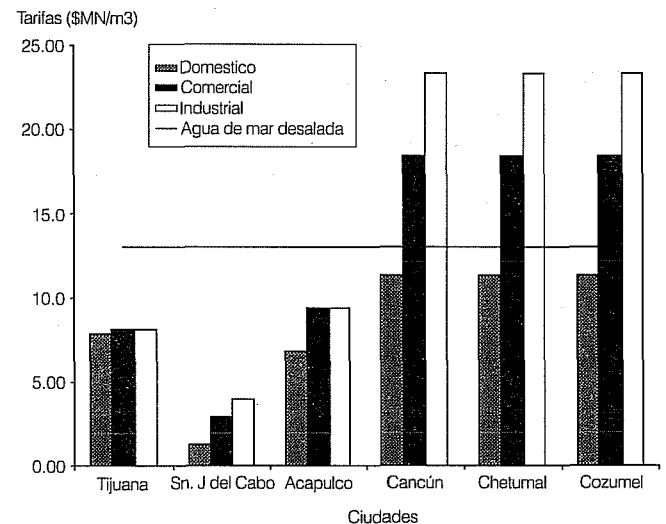
*Calidad del agua de las descargas de desechos de las plantas potabilizadoras*

Los residuos de una planta desalinizadora dependen de la tecnología utilizada, de la calidad del influente y del agua producida, del sistema de pretratamiento, y de los métodos de limpieza utilizados en la planta. La mayoría de ellas utilizan cloro o sus derivados para limpiar las tuberías y algunas partes del equipo, o incluso en los procesos del pretratamiento. Estos elementos son altamente tóxicos para la vida marina.

Una descarga de una planta desalinizadora puede tener las siguientes características:

- a) Concentraciones de sal que varían entre 46,000 y 80,000 ppm, para plantas que desalinizan agua de mar.
- b) Incremento de 15°C, sobre la temperatura del agua del mar.
- c) Niveles de turbiedad superiores a los del influente.
- d) Niveles de oxígeno por debajo del influente, sobre todo en plantas destiladoras.
- e) Compuestos químicos del proceso de pretratamiento como cloruro férrico, dióxido de sulfuro, dióxido de carbono, polielectrolitos, bisulfuros de sodio y polímeros.
- f) Compuestos químicos de los procesos de lavado de las tuberías y limpieza de las membranas de ósmosis inversa, como compuestos de sodio, ácido

**20. Tarifas del agua en función de los consumos, incluida el agua de mar desalada**



hidroclorhídrico, ácido cítrico, polifosfatos y sulfato de cobre.

- g) Compuestos orgánicos y metales que pudieran estar contenidos en el influente y concentrados en el proceso de desalinización.

#### *Descarga de los residuos de plantas desaladoras en tierra firme*

Los dos métodos más comunes para disponer de la salmuera en tierra firme son las lagunas de evaporación y la inyección en pozos profundos. Las lagunas de evaporación son recomendables en zonas donde las láminas de evaporación son mayores que las de la precipitación, y donde la tierra es barata. Debido a que la salmuera es potencialmente contaminante, deberá prestarse especial atención a los recubrimientos de las lagunas con objeto de evitar filtraciones a los acuíferos.

Los pozos profundos (pueden llegar a ser de varios cientos de metros) utilizados para la disposición de la salmuera son clasificados por la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) como pozos Clase V; es decir, pozos para residuos no peligrosos. En todo caso será recomendable hacer siempre un estudio hidrogeoquímico, con objeto de evitar que no se contaminen los acuíferos que contienen agua dulce.

#### *Descarga de los residuos de plantas desalinizadoras en el mar*

Debido a que la salmuera es más densa que el agua de mar, puede depositarse en el mismo lugar donde es descargada, y afectar la ecología local dependiendo de las condiciones físicas del lugar (básicamente corrientes marinas y oleaje). Si se desea evitar este problema las descargas de las plantas desalinizadoras pueden arrojarse al mar combinadas con el agua de los sistemas de enfriamiento de las plantas generadoras de energía eléctrica, o con las descargas del pretratamiento o de la operación de la planta (producto del lavado de tuberías o equipo).

La mezcla de la descarga tiene dos efectos: diluir la concentración de sales y otros compuestos químicos y disminuir la temperatura de la salmuera. Por otro lado deberá considerarse que la adición de sales a la descarga del pretratamiento reducirá la demanda bioquímica de oxígeno.

#### *Impactos durante la construcción*

Cuando se habla de construcción de plantas desalinizadoras debe considerarse que junto con ellas, nor-

malmente, pueden construirse sistemas de pretratamiento o aun de coenergación energética. Los impactos pueden ser la emisión de humos y polvos, el ruido, las afectaciones a la playa y a la ecología marina, incluyendo aves, mamíferos, peces y flora, así como sus correspondientes hábitat; la erosión que genera toda obra nueva, la interferencia con los accesos a las playas para fines recreativos o productivos, y la obstrucción misma de las obras a las actividades costeras.

Debe prestarse especial atención a las líneas de conducción de agua del mar a la planta desalinizadora, y de ésta a la zona de aprovechamiento, así como las líneas de conducción de energía eléctrica, incluyendo zonas federales y accesos. Consideraciones similares deberán hacerse para plantas ubicadas tierra adentro (para aguas salobres).

#### *Medidas de mitigación durante la construcción*

Se considerarán los lineamientos establecidos en los reglamentos de construcción estatales o municipales, como las cercas, los eliminadores de ruidos y humos, la protección a zonas habitacionales, hoteleras o recreacionales y sus correspondientes accesos. Minimizar las longitudes y el número de líneas de conducción de agua y eléctricas. Seleccionar el sitio de ubicación de la planta de tal manera que afecte lo menos posible las actividades productivas, se recomienda de ser posible aprovechar zonas donde ya existan líneas de abastecimiento de agua y energía, y los accesos correspondientes como: termoeléctricas, hidroeléctricas, puertos o terminales marítimas.

#### *Impacto por el incremento en el uso de la energía*

La demanda de energía de las plantas desalinizadoras, normalmente es alta, y esto es un impacto que debe evaluarse en conjunto con los efectos secundarios del incremento del uso de la energía como puede ser el transporte de petróleo o gas, el incremento de la temperatura del mar provocado por los sistemas de enfriamiento de las termoeléctricas, o el atrapamiento de peces en las obras de toma de las plantas generadoras.

#### *Medidas de mitigación para el uso de la energía*

Sin duda alguna la mejor medida es el uso eficiente de la energía. Se deberá considerar siempre que cualquier proyecto de plantas desaladoras incluya acciones de conservación de la energía o reducción del consumo.

En las plantas será siempre una opción ventajosa la coogeneración, término utilizado para describir el acoplamiento de otros procesos a los de generación de energía eléctrica, como puede ser el aprovechamiento del vapor en los sistemas de desalación de pasos múltiples y aún en los de ósmosis inversa. Debe considerarse siempre que una planta de coogeneración debe diseñarse específicamente para ese uso. Se deberán considerar otras opciones, que de hecho ya se usan en los procesos de desalinización, como es el empleo de la energía remanente en pasos subsecuentes, para calentamiento o incremento de presión.

Otra opción es el empleo de la energía solar, de manera directa o secundaria como es el aprovechamiento de la energía eólica, sobre todo para tratar pequeñas cantidades de agua, y aún la generación de energía por medio de la conversión térmica de la energía marítima o el empleo de las mareas.

#### *Impacto en la calidad del aire*

Las emisiones de las plantas desalinizadoras se reducen a descargas de nitrógeno y oxígeno, en aquellas que utilizan procesos de aireación para reducir la corrosión, o la descarga de los desgasificadores de las plantas de ósmosis inversa. En el caso de sistemas de cogeneración, deberán considerarse las emisiones de una planta termoeléctrica normal.

#### *Medidas de mitigación de las emisiones al aire*

Como en el caso anterior, se recomienda el uso eficiente de la energía, y el empleo de fuentes alternas de energía como la solar directa, la eólica o las mareas.

#### *Impacto de las descargas y obras de toma en el ambiente marino*

##### *Descargas*

Los recursos marinos en las zonas próximas a las plantas desalinizadoras pueden ser afectados por la cantidad y calidad de la salmuera, por los métodos de disposición de la misma y por la dilución que se haya hecho de la misma.

Las altas concentraciones de sal pueden afectar o incluso matar a los organismos que se encuentren cerca de las obras de descarga, otro factor que puede afectar a las especies marinas es la fluctuación en la concentración o la temperatura.

Otro riesgo es que la salmuera se deposite en el fondo de mar y afecte a las comunidades bentónicas,

si por alguna razón la descarga contuviera metales pesados, estos se pueden depositar en las capas superficiales del fondo del mar y afectar los huevos de los peces, el plancton y las larvas de diversas especies. Si la descarga lleva material fino en suspensión, que por su tamaño permanezca en esta misma condición en el mar, podría interferir el paso de la luz solar y disminuir la productividad marina y afectar al fitoplancton.

Otro efecto que pueden tener los cambios de salinidad y temperatura es sobre las rutas de migración de los peces a lo largo de la costa. Algunas especies muy sensibles a estos efectos podrían tratar de evitar el área de influencia de la descarga y alejarse de la costa, incrementando su exposición a depredadores.

##### *Obras de toma*

Los dos principales impactos de las obras de toma son: el atrapamiento de las especies marinas en las rejillas y la inclusión de las mismas a los procesos donde en la mayoría de los casos mueren. En el caso de plantas grandes la toma podría alterar las corrientes naturales.

#### *Medidas de mitigación de los impactos marinos*

- a) Ubicar las obras de toma y de descarga en zonas que no afecten comunidades ecológicas críticas.
- b) Propiciar bajas velocidades en los canales de llamada de las obras de toma para reducir la incrustación de especies marinas en las rejillas y su paso a los procesos, lo que tendrá como ventaja adicional evitar problemas de operación.
- c) Usar pozos playeros o galerías filtrantes para reducir la entrada a la planta de especies marinas.
- d) Asegurar una adecuada dilución de las descargas para reducir los impactos en las especies marinas.
- e) Utilizar pretratamientos para reducir en lo posible el uso de sustancias peligrosas en los procesos de las desalinizadoras.
- f) Remover sustancias peligrosas de la salmuera antes de descargar ésta al mar.
- g) Hacer un análisis comparativo del sitio más adecuado para la descarga, considerando los sitios ubicados tierra adentro.
- h) Usar materiales en los tubos y en la planta misma que reduzcan los riesgos de corrosión, y en consecuencia limiten el empleo de sustancias anticorrosivas.
- i) Programar las descargas para que se produzcan en los tiempos que afecten menos a las comunidades marinas.

### *Impactos sobre el crecimiento poblacional*

La construcción de plantas desalinizadoras inducen asentamientos humanos que pueden impactar zonas no previstas para ello. Las nuevas comunidades podrían afectar planes de desarrollo regional a largo plazo.

#### *Medidas de mitigación para minimizar los impactos de la inducción del crecimiento poblacional*

- a) Ubicar los proyectos dentro de los planes de desarrollo regional.
- b) Establecer las dimensiones de la planta para las necesidades específicas, y para el nivel de desarrollo establecido en la zona de influencia.
- c) Ubicar la planta cerca de las fuentes de energía y las redes de distribución.
- d) Situar la planta en las cercanías de obras de toma existentes.

#### *Otros impactos a las zonas costeras*

- a) Impactos al ambiente marino por derrames accidentales de sustancias peligrosas.
- b) Impactos a la pesca comercial y navegación durante la construcción y operación de las obras de toma y de descarga.
- c) Interferencias a zonas recreativas de las plantas, pozos, y líneas de alimentación y distribución.
- d) Impactos visuales, sobre todo en zonas hoteleras.
- e) Ruido de las bombas durante la operación.
- f) Impactos en el proceso de desalación de sustancias como grasas y aceites.

#### *Medidas de mitigación para los impactos citados anteriormente*

- a) Capacitar al personal operador, establecer sistemas de aseguramiento de calidad y sistemas de seguridad como detectores de fugas y alarmas, entre otros.
- b) Ubicación de boyas, que eviten riesgos en las zonas cercanas a las tomas y a las descargas.
- c) Colocar cercas, anuncios, vías alternas de acceso a zonas recreacionales durante la construcción.
- d) Hacer un diseño arquitectónico adecuado para evitar impactos visuales en zonas hoteleras.
- e) Utilizar equipo para reducir ruido durante la construcción y la operación de las plantas.
- f) Evitar sustancias contaminantes como grasas y aceites cerca de las obras de toma.
- g) Reciclar o reusar los residuos sólidos.

### **Conclusiones**

La desalinización de agua salobre o de mar es una opción real que se utiliza en muchos países del mundo, produciendo agua para consumo humano o procesos industriales, y para cultivos de alto valor comercial en invernaderos.

Los procesos de destilación y de membranas, en particular la tecnología de múltiples efectos, súbita en múltiples etapas, la compresión de vapor y la solar en el primer caso, y la electrodiálisis y la ósmosis inversa en el segundo, son los más utilizados y se encuentran en etapa comercial. Es fácil encontrar empresas que diseñan y construyen plantas de gran capacidad, o que venden plantas paquete para caudales de entre 100 y 400 m<sup>3</sup>/día. El aprovechamiento de la energía solar directa para desalinizar agua es una opción para comunidades rurales o con baja población.

Siendo la energía el factor que más influye en el costo del agua desalinizada, se han hecho grandes esfuerzos por utilizar fuentes de energía no convencionales como la solar directa o el viento, en forma aislada o combinada con fuentes tradicionales como el Diesel o la electricidad. Existen actualmente muchas plantas piloto.

En el otro extremo, existen plantas desalinizadoras alimentadas con energía nuclear en países como Japón y Kazakstan y proyectos para utilizar esta tecnología en China, La India, Corea, Marruecos y Rusia. El uso de superconductores para desalar agua también se encuentra en etapa de investigación.

Otra opción utilizada (en México se hace) es el acoplamiento de desalinizadoras a plantas de generación de energía eléctrica; sin embargo, tiene algunas limitaciones como pueden ser las demandas de energía y agua en tiempos diferentes, o la afectación de un proceso sobre el otro en caso de reparación. Así, el proyecto deberá considerarse en conjunto desde la etapa de planeación. Acoplar una desalinizadora a una generadora ya construida puede ser muy problemático.

En México existen plantas desalinizadoras pequeñas de 1 m<sup>3</sup>/día a 1,000 m<sup>3</sup>/día, en industrias y hoteles y algunas en pequeñas comunidades.

Los factores que afectan los costos de la desalinización son la calidad del agua de la fuente, la calidad del agua demandada, las condiciones del sitio de la instalación, los costos de la energía, el proceso de desalinización utilizado y la operación y mantenimiento.

El costo promedio de desalinización de agua salobre es de USD 0.35/m<sup>3</sup> y el de agua de mar USD 1.54/m<sup>3</sup>. El costo de desalinizar agua con una planta paquete de hasta 1900 m<sup>3</sup>/día, es de USD 2.64/m<sup>3</sup>, cuando la energía eléctrica cuesta del orden de USD

0.12/kWh. El costo de desalar agua de mar es decreciente con el aumento de la capacidad de producción de la planta, no sucede lo mismo con el agua salobre. El consumo de energía decrece también con el incremento de la producción. En México, la CFE está desalinizando agua en un sistema acoplado en Rosarito, B.C., a un costo de \$ 7.00/m<sup>3</sup> M.N.

Los costos de inversión para tratar agua salobre varían entre USD 380 y USD 562 /m<sup>3</sup>/día y entre USD 1,341 y USD 2,379/m<sup>3</sup>/día, para desalar agua de mar.

Para usos comerciales e industriales en ciudades como Querétaro y Zacatecas, el costo de producir agua a partir de agua salobre, es menor para consumos mayores a 50 m<sup>3</sup> que con las tarifas vigentes con fuentes de abastecimiento comerciales. En el caso de ciudades como Cancún, Chetumal y Cozumel, la desalinización de agua de mar para usos comerciales e industriales (se incluye hotelería) compite con ventajas con las tarifas actuales.

Los principales impactos ambientales de las plantas desalinizadoras se presentan durante la construcción debido a la emisión de humo, polvo, ruido, afectaciones a la playa y a la ecología marina incluyendo aves, peces y flora; la erosión y la interferencia de actividades recreativas o productivas. Otros impactos son causados por el incremento en el uso de la energía, por la emisión de gases como nitrógeno y oxígeno, por las descargas de salmuera, por la acción de las obras de toma y por la posibilidad de que se fomente el crecimiento poblacional en torno a la planta.

En todos los proyectos de plantas desalinizadoras se deberán hacer los estudios de impacto ambiental correspondientes y establecer las medidas de mitigación necesarias.

Para las comunidades rurales o poblaciones pequeñas, el aprovechamiento de la energía solar directa es una opción para el abastecimiento de agua.

Recibido: 19/I/99  
Aprobado: 12/V/99

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo del doctor Gustavo A. Paz Soldán, gerente de Estudios para el Desarrollo Hidráulico Integral, y del ingeniero César Herrera Toledo, subdirector general de Programación de la Comisión Nacional del Agua, para la realización del proyecto "Estado del arte de la desalinización del agua y eliminación de sales y desinfección de agua para consumo humano en zonas rurales, utilizando energía solar", el cual sirvió como base para la realización de este artículo; asimismo, a la M. en I. Patricia Hansen Rodríguez, por el trabajo de investigación bibliográfica realizado.

## Referencias

- Blanco F.J.A. 1997. *Desalación de Agua para Consumo Humano*, México, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Block D. L. 1989. *Solar Desalination of Water*, EUA, Florida Solar Energy Center.
- Comisión Nacional del Agua. 1993. *Informe 1989-1993*, México.
- Cormier M, Foster R, Cisneros G. 1995. *Solar Still Construction and Operation Manual*, El Paso, EPSEA.
- Custodio E, Llamas M. R. 1976. *Hidrología Subterránea*, Barcelona, Universidad Politécnica de Barcelona.
- Fernández Z. J. L. y Chargoy V. N. 1997. Destiladores solares de agua para el consumo humano, *Vector de la Ingeniería Civil*, Núm. 3, Julio de 1997. México, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Gordon F. Leitner. 1992. Water Desalination, What Are Today's Cost, *Arab Water World*, Vol. 16, Marzo. Beirut.
- Porta GMA, Fernández Z.J.L., Chargoy del VN. 1997. La Experiencia Mexicana en el Diseño y Operación de Destiladores Solares, *Vector de la Ingeniería Civil*, México, UNAM.
- Thomas K. E. 1997. *Overview of Village Scale, Renewable Energy Powered Desalination*, Colorado, National Renewable Energy Laboratory.
- Samir Et Sadek and Dadr Mabrouk. 1993. Tourism Development and Desalination Systems, *Arab Water World*, Vol 17, Núm. 2/3. Beirut.
- Velasco M. H. A. 1995. Fuentes de Agua para Consumo Humano en el Medio Rural de los Semidesiertos Mexicanos, *Terra*, Vol. 13, Núm. 4. México.

**Abstract**

Arreguin Cortes, Felipe I. & A. Martin Dominguez. "Water desalination". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XV, núm. 1, pages. 27-49, january-april, 2000.

Mexico faces serious water supply problems in many regions as a result of poor natural spatial and temporal distribution. Desalination of brackish or salty water is an option used in many countries to produce water for human consumption, industrial processes and high-market value crops in greenhouses. The principal desalination processes are reviewed and the factors affecting costs are analyzed in this paper. The average cost of desalinating brackish water is USD 0.35/m<sup>3</sup> and seawater is 1.54/m<sup>3</sup>. The cost of treating water with a package plant with a yield of 1,900m<sup>3</sup>/day is USD 2.65 /m<sup>3</sup> when the electricity rate is approximately USD 0.12/kWh. The principal environmental effects of a desalinating plant are seen during construction. The increase in electricity consumption, the emission of nitrogen-containing compounds and oxygen, the formation of brine, the action of the intaker and the possible population increase around the plant may also have an environmental impact.

**Key words:** desalination, brackish water, seawater, distillation, reverse osmosis, membranes, desalinating plants.

**Dirección institucional de autores:**

*Felipe I. Arreguín Cortés*  
*Alejandra Martín Domínguez*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532  
Col. Progreso  
Jiutepec, Mor., C.P. 62550  
Teléfono: 319 40 00, ext. 533