

## Diferentes técnicas de desalación

Entendemos la desalación como el proceso físico de separación de sales de una disolución acuosa para utilizar el agua del mar en las zonas costeras con escasez de agua potable. El sistema físico de eliminación de las sales por destilaciones y condensaciones sucesivas ya era conocido desde la antigüedad. Pero necesitaba un consumo grande de energía que no lo hacía relevante. Tras el transcurso de los años se mejoraron los procesos que implicaban un menor consumo de energía, utilizándose a la tecnología de la osmosis inversa que es la más utilizada actualmente.

Aunque existen diversos criterios para clasificar los diferentes procesos de desalación, un modo útil y claro de clasificarlos es dividirlos en dos grupos:

1) procesos que implican un cambio de fase en el agua.

Como son: destilación súbita (flash), destilación de múltiple efecto, termo compresión de vapor, destilación solar, congelación, formación de hidratos, destilación con membranas y compresión mecánica de vapor.

2) procesos que funcionan sin cambio de fases.

Los procesos que no realizan un cambio de fases incluyen: Osmosis Inversa, Electro diálisis e intercambio iónico.

De los cuales se da una breve descripción.

**Los principales procesos que existen de desalación en la actualidad son los siguientes:**

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (Flash)
			Destilación multiefecto
			Termo compresión de vapor
			Destilación solar
		Cristalización	Congelación
			Formación de hidratos
		Filtración y evaporación	Destilación con membranas
	Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica vapor
		Filtración	Osmosis Inversa
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electro diálisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

### Destilación súbita por efecto flash (MSF).

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300° C): el vapor se condensa posteriormente en el interior ó exterior de los tubos de la instalación. Los sistemas desaladores suelen funcionar por debajo de la presión atmosférica, por lo que necesitan un sistema de vacío (bombas ó eyectores),

además de extracción del aire y gases no condensables. La utilización de una cámara flash permite una evaporación súbita (y por lo tanto de carácter irreversible) previa a su posterior condensación. Generalmente, la cámara flash se sitúa en la parte baja de un condensador de dicho vapor generado en la cámara inferior. Por lo tanto, la recuperación de calor necesario para la evaporación se obtiene gracias a la unión sucesiva de etapas en cascada a diferente presión, y es necesario el aporte mínimo de la condensación de un vapor de baja o media calidad proveniente de una planta de generación eléctrica. Este es el proceso evaporativo más ampliamente utilizado en el mundo, de implantación masiva sobre todo en Oriente Medio. Ello se debe a varias razones:

- Es especialmente válido cuando la calidad del agua bruta no es buena (alta salinidad, temperatura y contaminación del agua aportada).
- Su acoplamiento con plantas de potencia para formar sistemas de cogeneración es muy fácil y permite una gran variabilidad de rangos de operación en ambas plantas.
- Su robustez en la operación diaria frente a otros procesos de destilación es notoria.
- La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación. Sin embargo, las plantas MSF tienen un grave inconveniente. Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir 1 m<sup>3</sup> de agua desalada, es de los más altos de los procesos estudiados. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta. Además de su alto costo de operación, su costo de instalación no es más bajo que otros procesos de desalación.

### **Destilación por múltiple efecto (MED).**

Al contrario que en el proceso MSF por efecto flash, en la destilación por múltiple efecto (MED) la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo. Una planta MED (Multi-Effect Distillation) tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, dichos efectos sucesivos tienen cada vez un punto de ebullición más bajo por el efectos de dicha presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto. El agua salada se transfiere luego al efecto siguiente para sufrir una evaporación y el ciclo se repite, utilizando el vapor generado en cada efecto. Normalmente también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa al siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación. La primera etapa se nutre de vapor externo de un sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (ó extracción de una de condensación). Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema. Por lo tanto las plantas MED también conforman sistemas de cogeneración al igual que las MSF consumiendo una porción de energía destinada a la producción eléctrica. La destilación por múltiple efecto no es un proceso solamente utilizado para la desalación. La capacidad de este tipo de plantas suele ser más reducida que las MSF (nunca suele superar los 15.000 m<sup>3</sup>/día) aunque ello se debe más a razones de índole política que operativa: las MSF más grandes se instalan en Oriente Medio y las mayores MED están instaladas en las islas del Caribe para abastecer de agua estas zonas de gran presión turística.

### **Compresión térmica de vapor (TVC)**

La compresión térmica de vapor (TVC, Termal Vapor Compression) obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto (MED), pero utiliza una fuente de energía térmica diferente: son los llamados compresores térmicos (o termocompresores), que consumen vapor de media presión proveniente de la planta de producción eléctrica (si tenemos una planta dual, sino sería de un vapor de proceso obtenido expresamente para ello) y que succiona parte del

vapor generado en la última etapa a muy baja presión, comprimiéndose y dando lugar a un vapor de presión intermedia a las anteriores adecuado para aportarse a la 1ª etapa, que es la única que consume energía en el proceso. El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. Muchas veces se las considera el mismo proceso, pero aquí se tratarán individualmente ya que el consumo de energía de la planta se realiza por un equipo diferente.

### **Destilación solar.**

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce.

### **Congelación.**

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso muy sencillo tiene problemas de adaptación para su implantación a escala industrial, ya que el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo deben mejorarse, así como adaptar la tecnología a intercambiadores de frío. El proceso de congelación es un fenómeno natural que se contempla con mucha facilidad en nuestro Planeta, alrededor del 70% del agua dulce está contenida en los polos terrestres. La utilización de hielo de los polos para el consumo humano es muy poco conveniente para la conservación del equilibrio térmico del Planeta.

### **Formación de hidratos.**

Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el anterior proceso, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial.

### **Destilación por membranas.**

Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua (membrana hidrófoba). Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie más fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida.

### **Compresión mecánica de vapor (CV).**

En la compresión mecánica de vapor (CV) evapora un líquido, en este caso el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación

de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura. Simplificando todos los elementos auxiliares podemos ver que el vapor interior de los tubos es comprimido a presión atmosférica en torno a 0.2 bares en un compresor volumétrico especial para trasegar vapor. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa en el exterior de los tubos del intercambiador, siendo recogido por una bomba en su parte inferior. Como puede observarse, si el proceso fuera ideal sólo deberíamos vencer la elevación del punto de ebullición del agua salada para mantener el proceso, aunque no es posible realmente; en todo caso el consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: normalmente el consumo eléctrico equivalente está sobre los 10 kWh/m<sup>3</sup> (la mitad que una planta MSF).

Aunque su consumo específico es con mucho el menor de las instalaciones de destilación, tiene un gran inconveniente: la inexistencia de compresores volumétricos de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así no se conocen unidades CV mayores de 5.000 m<sup>3</sup>/día, y estos compresores sólo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada. Normalmente existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada al mar (como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera), ayudados por una resistencia eléctrica en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores al proceso de destilación.

### Osmosis inversa

El principal componente del mar, aparte de la vida marina, es el agua, la cual está constituida por dos elementos: hidrógeno y oxígeno.

En el planeta tierra existen aproximadamente 1,370 millones de kilómetros cúbicos de agua (un kilómetro cúbico es igual a 1000 millones de metros cúbicos). La mayor parte se encuentra en los océanos y el resto en los continentes.

El agua, principalmente la de mar, no se encuentra pura, pues contiene en solución gran cantidad de elementos y compuestos químicos llamados sales, que se hallan en una proporción de 3.5% y el restante 96.5% es agua.

El agua de mar también contiene gases en disolución. Casi todos los gases de la atmósfera están presentes en el agua de mar, y abundan el nitrógeno, el oxígeno y el bióxido de carbono. Este último se encuentra como carbonato y bicarbonato, dado que reacciona químicamente con el agua. La composición general varía y se presentan otros compuestos, dependiendo del lugar o ubicación de las aguas marinas.

El mar a través de la historia, ha sido aprovechado por la humanidad para proveerse de alimentos y como medio de navegación y, en algunos casos, con fines industriales. Sin embargo, en ciertas regiones del mundo, debido a la escasez de agua dulce o potable, algunas comunidades experimentan un deterioro en sus actividades cotidianas, lo cual afecta los aspectos económicos y, por lo tanto pone en peligro la calidad de vida o la disminuye en otros casos.

Composición líquida del mar

Cloruro de Magnesio	5.000
Sulfato neutro de sodio	4.000
Compuesto	Gramos / litro
Cloruro de calcio	1.100
Cloruro de sodio	24.000
Cloruro de potasio	0.700

Bicarbonato de sodio	0.200
Bromuro de sodio	0.096
Ácido bórico	0.026
Cloruro de estroncio	0.024
Fluoruro de sodio	0.003

La ausencia de agua, principalmente para consumo humano, originó el desarrollo tecnológico con respecto al tratamiento de aguas, ya sean esta agua grises, negras y de mar, como se les clasifica comúnmente.

Entre las tecnologías utilizadas para obtener agua potable, se encuentra la desalinización de agua de mar, y se tienen como métodos ya probados los siguientes:

#### 1.- Destilación

- De tubo largo o vertical
- De etapa simple
- Por película descendente
- Por compresión de vapor
- Solar

#### 2.- Membranas

- Electro diálisis
- Eliminación por transporte
- Ósmosis inversa

#### 3.- Humidificación

- Por difusión
- Des humidificación

#### 4.- congelación

- Directa
- Secundaria por refrigeración

#### 5.- Químicos

- Intercambio de iones
- Hidratación

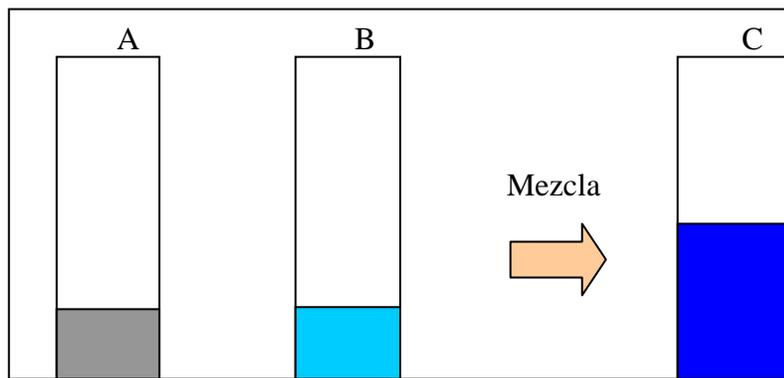
En la actualidad, el método más utilizado es el de ósmosis inversa, primero porque es sencillo y requiere relativamente poca energía eléctrica (que se transforma en mecánica) y no necesita de energía calorífica. Gran parte de las plantas que operan a nivel mundial (7,000 aproximadamente) emplean este método. Hasta la fecha se han obtenido buenos resultados en cuanto a la calidad del agua como producto. Sin embargo, en algunas regiones con carencias económicas el costo es un factor que obstaculiza su uso común, y se han debido optimizar varios aspectos, como sería utilizar

energía no convencional, mezclar aguas municipales con agua desalada, mejorar la tecnología (uso adecuado de los equipos e innovación).

El fenómeno de la ósmosis inversa se conoce desde 1748, año en que se publicaron trabajos sobre la difusión de fluidos en membranas animales. La ósmosis es el paso de una sustancia a través de una pared o membrana, la cual naturalmente tiene que ser porosa. Sin embargo, la pregunta sería ¿qué es la ósmosis inversa? Con respecto a la anterior interrogante, se aclara que entre los años de 1953 y 1959, C. E. Reid y J. E. Breton intentaron desalar agua de mar por medio de ósmosis inversa, utilizando membranas sintéticas, las cuales, por un lado retenían las sales del agua marina, pero el paso de aguas con pocas o nada de sales resultaba en muy bajas cantidades. Por lo anterior y hasta la fecha, se realizan investigaciones relacionadas con los equipos y principalmente con la obtención de membranas más adecuadas.

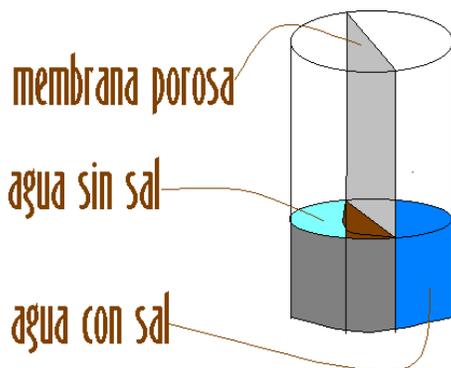
Retomando la pregunta sobre lo que es ósmosis inversa, supóngase un depósito con agua sin sal y otro con sal (agua salada simulando el agua de mar). Si se mezclan, el agua resultante será salada, pues, como se muestra en la Fig. 1 ocurre el fenómeno de la difusión.

Figura 1  
Mezcla de A + B para obtener C



Ahora, si en el depósito de agua salada se le coloca una membrana semipermeable en la parte central y en un compartimiento se vacía el agua sin sal y en el otro el agua con sal, ocurrirá lo siguiente (figura 2).

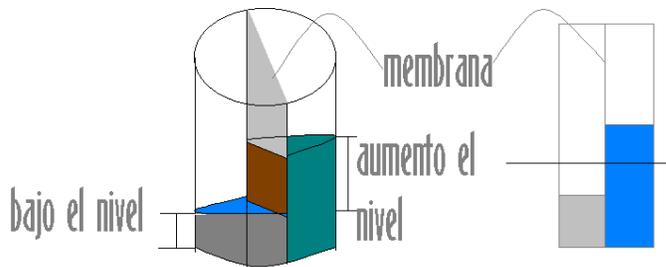
Figura 2  
Deposito con membrana



La sal que se encuentra diluida en el agua del compartimiento del agua salada tendera a difundirse hacia el compartimiento del agua sin sal, pero no lo puede hacer debido a la membrana. Por otra parte, el agua pura del compartimiento sin sal si se difundirá hacia la derecha y producirá un incremento en el nivel del compartimiento de agua salada o sea, la difusión del agua de la pura a la salada hace que se incremente el nivel en el compartimiento como se observa en la figura 3.

Figura 3

Difusión del agua



Se observará que el agua pura ya no pasara hacia la salada cuando exista un determinado aumento de nivel que contrarreste la difusión a través de la membrana semipermeable. A esto se le conoce como ósmosis. A la diferencia de alturas cuando se alcanza el equilibrio, se le llama presión osmótica. Una vez que uno de los fluidos aumento el nivel y se detiene el paso del otro fluido hacia este, se puede hacer lo siguiente, aplicando presión al fluido salado se obliga a que pase el agua hacia el fluido sin sal, es decir en sentido inverso, quedándose las sales sin poder atravesar la membrana (que dependerá, por supuesto del tamaño de los poros de la membrana). Se origina una mayor concentración de sales en el agua salada que no pasó, conociéndosele como agua de rechazo y al agua producto como permeado. A este fenómeno se le conoce como ósmosis inversa.

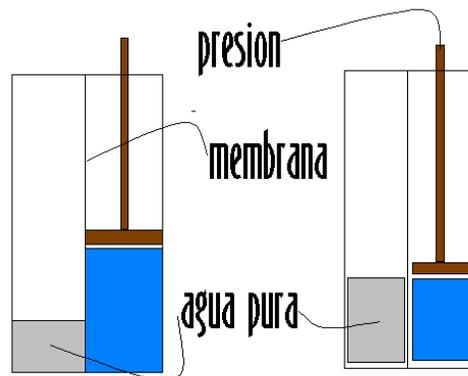
La difusión del agua de izquierda a derecha hace que se incremente el nivel en el compartimiento.

Por lo anterior, entonces, para lograr la desalinización del agua de mar por este método se requiere de membranas a través de las cuales, por un lado, se verterá agua de mar y esta se someterá a presiones para obtener, dependiendo de la permeabilidad, es decir, del tamaño del poro, la pureza de agua producto que se desee, con respecto al contenido de sales o sólidos en suspensión.

Las membranas que se fabrican en la actualidad se clasifican de acuerdo a diferentes aspectos o parámetros como son, entre otros, estructura, naturaleza, forma, composición química, carga superficial, morfología de la superficie, presión de trabajo y técnicas de fabricación. Las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa operan por medio de módulos, lo que significa agrupar un número determinado de membranas con cierta configuración, de tal forma que se integre una sección o unidad elemental para producir agua potable. Naturalmente que dichas unidades se consideraran buenas si se obtienen rendimientos adecuados de las membranas, facilidad para sustituirlas o limpiarlas y compactación del conjunto de secciones.

Figura 4

## Fenómeno de la ósmosis inversa



Los módulos más comunes son aquellos que están constituidos por un tubo perforado central, alrededor del cual y de manera concéntrica se colocan las membranas una sobre otra. A estos se les conoce como módulos espirales. El agua de mar se introduce por la parte externa de la membrana más exterior y se ejerce presión sobre ella, haciéndola que pase hacia el centro e introduciéndola en el tubo perforado, con lo cual se obtiene el agua producto o agua dulce. El agua rechazada y con sal se retira por un extremo.

El agua de mar entra a presión por un extremo y fluye hacia el tubo perforado de manera radial. Se rechazan las sales, de modo que el agua con mayor concentración pasa hacia el siguiente módulo. En cada uno de los módulos se obtiene agua dulce que se va recolectando en el tubo central, y por un costado de este se retira el agua con alta concentración de sales. Con el tiempo, las membranas se ensucian, lo cual es posible detectar al ver el porcentaje de sales que puede tener el producto, y se considera de cuidado un 15%. Otro aspecto es que la producción y la cantidad de agua rechazada varíe, y sea necesario incrementar la presión al agua de entrada; también cuando existen paros de la planta, ya sean de emergencia, parciales o totales.

La limpieza de las membranas puede hacerse de manera mecánica (usando cepillos o esponjas) o con agua producto u otra sustancia con características similares, es decir, que no contenga sólidos disueltos o en suspensión, o también se disuelven las incrustaciones con algunas sustancias químicas. Por ejemplo, si las membranas son de acetato de celulosa y el ensuciamiento es ocasionado por sulfatos de calcio y bario, carbonato de calcio u óxidos metálicos, se utiliza como limpiador ácido nítrico al 2% si existen compuestos orgánicos, se utiliza cloro.

Los equipos empleados para imprimirle presión al agua de mar y hacer que pase cierta porción a través de las membranas consisten en bombas de alta presión. Prácticamente estos equipos, junto con los módulos de membranas, forman la unidad fundamental del proceso. Por lo general, se utilizan dos tipos de bombas, que son las de desplazamiento positivo y las centrífugas. Es importante considerar que el agua de mar, dependiendo de su calidad, se le tiene que dar un pretratamiento con algunos productos químicos para desinfectarla, eliminar la materia orgánica que contenga o la presencia de actividad biológica, reducir la incrustación, eliminación de cloro residual. Los químicos más utilizados son el hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico, coagulantes y dispersantes, bisulfito sódico, etc. De igual forma, al agua producto se le trata con hidróxido cálcico, hipoclorito sódico, anhídrido carbónico, entre otros, para el control del pH y calcificación, carbonatación, así como para desinfectar.

De manera general, se puede concluir que una planta desalinizadora que utiliza el método de ósmosis inversa está constituida por las siguientes secciones:

- 1.- el agua de alimentación, en lo referente a la forma en que se obtiene, es decir, de pozos cerca del mar o directamente de este, o de pozos perforados en el mar, el sistema de bombeo y la red de tubería hasta la planta de proceso
- 2.- un pretratamiento al agua de mar por métodos fisicoquímicos.
- 3.- el sistema de ósmosis inversa o unidad fundamental del proceso.
- 4.- potabilización o tratamiento complementario al agua producto, para los requerimientos del consumo humano.

### **Electrodiálisis (ED).**

Este proceso permite la desmineralización de aguas salobres haciendo que los iones de diferente signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permitan sólo el paso de los iones en una solución electrolítica como es el agua salada. Los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas el agua pura y en el resto el agua salada más concentrada. Es un proceso que sólo puede separar sustancias que están ionizadas y por lo tanto su utilidad y rentabilidad está sólo especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres ó reutilización de aguas residuales, con un consumo específico y de mantenimiento comparable en muchos casos a la ósmosis inversa. En algunas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas selectivas al paso de dichos iones. En este caso se habla de electrodiálisis reversible (EDR).

### **Intercambio iónico**

Las resinas de intercambio iónico son sustancias insolubles, que cuentan con la propiedad de que intercambian iones con la sal disuelta si se ponen en contacto. Hay dos tipos de resinas: aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones OH<sup>-</sup> (permutación básica), y resinas catiónicas que sustituyen cationes por iones H<sup>+</sup> (permutación ácida). La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr/l. Por lo tanto se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamiento de afino. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un coste difícilmente asumible para aguas de mar y aguas salobres.

### **Resumen de las tecnologías utilizadas en desalación**

Tras la comparación de los tratamientos de desalación actualmente existentes, encontramos solo algunos procesos tecnológicamente viables actualmente a escala industrial: Evaporación súbita por efecto flash, destilación múltiple efecto, termo compresión de vapor y compresión de vapor mecánica, ósmosis inversa y electrodiálisis.

### **Elección del proceso económico de desalación**

Cada uno de los procesos mediante los cuales se puede desalar el agua, tiene sus propias características diferenciadores, que lo hace más o menos adecuado para cada caso. Todos tienen ventajas e inconvenientes, por ello es necesario hacer un cuidadoso análisis de todos los factores antes de tomar una decisión.

Entre los factores que hay que considerar cabe destacar los siguientes: salinidad del agua a tratar, precio del dinero (intereses de los préstamos bancarios), disponibilidad de mano de obra cualificada para la operación de la planta, precio de la energía térmica y eléctrica, disponibilidad de calor residual a baja temperatura, etc.

Como característica general, se tiene que el consumo energético de los procesos de desalación mediante cambio de fases no depende de la salinidad del agua a tratar. La cantidad de energía térmica (calor) necesaria para obtener un Kg de agua destilada es prácticamente independiente de la salinidad inicial del agua. En cambio, los procesos sin cambio de fase (Osmosis Inversa y Electro diálisis) consumen mayor cantidad energía cuanto mayor es la salinidad del agua de partida. Este es el motivo por el que estos procesos resultan más ventajosos cuando se trabaja con aguas salobres del subsuelo, cuya salinidad es muy inferior a la del agua del mar (35.000 ppm).

Características	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo energía	térmica	térmica	eléctrica	eléctrica	eléctrica
Consumo energético primario (Kj/Kg)	alto (>200)	alto/medio (150-200)	medio (100-150)	bajo (<80)	bajo (<30)
Coste instalaciones	Alto	alto/medio	alto	medio	medio
Capacidad producción (m <sup>3</sup> /día)	alta (>50000)	media (<20000)	baja (<5000)	alta (>50000)	media (<30000)
Posibilidad ampliación	difícil	difícil	difícil	fácil	fácil
Fiabilidad de operación	Alta	media	baja	alta	alta
Desalación agua de mar	Si	si	si	si	no
Calidad agua desalada (ppm)	alta (<50)	alta (<50)	alta (<50)	media (300-500)	media (<300)
Superficie terreno requerida de instalación	mucha	media	poca	poca	Poca

MSF: destilación súbita por efecto flash

MED: destilación por múltiple efecto

TVC: compresión térmica de vapor

OI: osmosis inversa

ED: electrodiálisis

IO: intercambio iónico

Otra característica de los procesos sin cambio de fases es que requieren un cuidadoso pre tratamiento del agua de proceso, ya que en caso contrario se vería gravemente amenazada la vida útil de las membranas de Osmosis o Electro diálisis. Hay que tener presente que el coste de las membranas constituye una parte importante (20% aproximadamente) del costo total de la planta. Este es el motivo por el que estas plantas requieren mano de obra de cierta calificación para operarlas adecuadamente. Unos intereses bancarios elevados penalizan la implementación de plantas de destilación, ya que el costo inicial de la inversión es superior al de otros tipos de plantas. Pero tienen la ventaja de que pueden utilizar energía residual a baja temperatura, como la que se

tiene en los circuitos de refrigeración de las máquinas alternativas. Esto hace que las plantas MED y MSF sean las más adecuadas para plantas de cogeneración.

En resumen, hay una diversidad de factores que hay que tener presentes antes de elegir el proceso más adecuado a nuestras necesidades y particularidades. No existe un proceso absolutamente mejor que los demás, siendo este el motivo de que no exista un proceso que haya desplazado del mercado a los demás.

### **Comparación De Los Procesos De Desalación**

A finales del año 1993, el 52% de la capacidad instalada mundial correspondía a plantas del tipo MSF, mientras que las plantas de Osmosis Inversa suponían un 34%. Las plantas de Electro diálisis, Compresión de Vapor y MED abarcaban el 14% restante. No obstante, debe indicarse aquí que la mayor parte de las plantas de Osmosis correspondía al tratamiento de aguas salobres y de río, mientras que casi la totalidad de las plantas de Electro diálisis estaban destinadas al tratamiento de este tipo de aguas. Por el contrario, las plantas MED estaban dedicadas casi exclusivamente a la desalación de agua de mar, ya que es para aguas con alta salinidad donde este tipo de plantas resulta más competitivo si se comparan con las demás tecnologías.

De las cuatro tecnologías mencionadas (MSF, Osmosis, MED y Electro diálisis), cada una tiene su propia cuota de mercado. Esto se debe a que para cada caso concreto hay que evaluar muy cuidadosamente todas las ventajas e inconvenientes de cada uno de los procesos si se quiere elegir el proceso más adecuado, ocurriendo que lo que en un caso concreto puede ser considerado un inconveniente, resulta ser una ventaja bajo otras circunstancias. Por consiguiente, como ya se ha explicado, hay que analizar cuidadosamente todos los factores antes de poder decidir cuál es el proceso óptimo para cada caso concreto.

Dentro de los procesos evaporativos (con cambio de fase), se puede decir que, actualmente, las plantas de compresión de vapor están claramente enfocadas al mercado de plantas con una capacidad inferior a los 4.000 m<sup>3</sup>/día, mientras que para plantas de gran capacidad que trabajan con agua de mar, solo se instalan plantas MSF y MED. Los problemas técnicos que presentaban las plantas MED al principio han sido solucionados y en la actualidad las plantas MED están avanzando en el mercado frente a las plantas MSF. Esto se debe a las ventajas energéticas de las plantas MED, ya que aunque el consumo de energía térmica es similar en ambas plantas, la energía equivalente derivada del consumo de vapor a menor temperatura en una planta MED es prácticamente del 50%. Solo en los países árabes, donde no existe problema energético alguno, se siguen instalando grandes plantas MSF. Otra ventaja adicional de las plantas MED frente a las MSF son sus menores costos de operación y mantenimiento (derivados de la menor temperatura de operación).

En lo que respecta a las plantas de Osmosis, están teniendo un rápido crecimiento en los últimos años para el tratamiento de aguas con baja salinidad, ya que su consumo energético resulta muy pequeño en estos casos. Puesto que no puede decirse de forma general que un proceso es mejor que otro, a continuación se exponen algunas nociones básicas que pueden ser útiles a la hora de elegir el proceso óptimo para un caso determinado.

**Tabla III:** Comparación de los cuatro procesos principales

	<b>MSF</b>	<b>MED</b>	<b>CV</b>	<b>Osm. Inv.</b>
<b>Estado comercial</b>	Desarrollado	Desarrollado	En desarrollo	Desarrollado
<b>Capacidad mundial</b>	8 MM m <sup>3</sup> /d	0,8 MM m <sup>3</sup> /d	0,6 MM m <sup>3</sup> /d	5 MM m <sup>3</sup> /d
<b>Planta de mayor tamaño</b>	45.000 m <sup>3</sup> /d	18.000 m <sup>3</sup> /d	3.000 m <sup>3</sup> /d	9.000 m <sup>3</sup> /d
<b>Fabricantes</b>	muchos	pocos	pocos	muchos
<b>Consumo energía:</b>				
- Vapor	125°C	70°C	--	--
- Electricidad	3-6 kWh/m <sup>3</sup>	1.5-2.5 kWh/m <sup>3</sup>	8-12 kWh/m <sup>3</sup>	6-7 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Temp. Máxima</b>	120°C	75°C	75°C	--
<b>Conversión (producto / agua mar bombeada)</b>	10-25%	25-40%	40-50%	35-45%
<b>Flexibilidad operación</b>	60-100%	30-100%	--	modular
<b>Mantenimiento (limpiezas / año)</b>	2-4	0,5-2	0,5-2	1-2
<b>Pretratamiento</b>	Moderado	Muy simple	Muy simple	Exigente
<b>Requerimientos de operación</b>	Medio	Bajo	Bajo	Muy alto

Desde el punto de vista de la interdependencia, la osmosis inversa presenta una clara ventaja al acoplarse con una central eléctrica, ya que pueden ser bastante independientes las ofertas y demandas externas de agua y electricidad, porque la energía eléctrica que necesita la planta de Osmosis Inversa puede ser suministrada por una fuente externa. Esta ventaja ayuda a compensar los inconvenientes derivados de un mayor consumo energético cuando se compara con la variante de planta MED, y el problema de la incertidumbre que presenta el componente clave de la planta desaladora: las membranas de osmosis.