CAPITULO 2



INTRODUCCIÓN A LA ÓSMOSIS INVERSA

Proyecto fin de carrera: Desalación de agua de mar en planta termosolar de cilindroparabólico de 50 MW

Alumno: FERNANDO RUIZ RUIZ

Tutora: Dra. Lourdes García Rodríguez

ÍNDICE CAPÍTULO 2

1. INTRODUCCIÓN……61
1.1. La desalación del agua……61
2. TÉCNICAS DE DESALACIÓN……64
2.1. Destilación flash multietapa (MSF)……64
2.2. Destilación por múltiple efecto (MED)……65
2.3. Compresión de vapor (CV)……66
2.4. Electrodiálisis……67
2.5. Ósmosis inversa……68
2.5.1. Principios del proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa……69
2.6. Congelación……70
2.7. Destilación Solar……70
2.8. Destilación por membranas……71
2.9. Formación de hidratos……72
2.10. Intercambio iónico……72
3. INSTALACIÓN DESALADORA DE ÓSMOSIS INVERSA……72
3.1. Toma de agua de mar……74
3.2. Pretratamiento……75
3.3. Ósmosis Inversa……76
3.3.1. Membranas……77
3.3.1.1. Configuración de membranas de osmosis inversa……79
3.3.1.2. Ecuaciones fundamentales……84
3.3.2. Bomba de alta presión……88
3.3.3. Cámaras de Intercambio de Presión (CIP) ……88
3.4. Operaciones de tratamiento post ósmosis inversa……90
3.5. Vertido de salmuera……91
4. LOS COSTES DE LA DESALINIZACIÓN……91
5. REFERENCIAS……92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Proporciones de agua en la tierra. ……61
Figura 2.2. Esquema de un proceso de desalación…… ……62
Figura 2.3. Diagrama de una planta de evaporación súbita. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual……65
Figura 2.4. Diagrama de una planta multiefecto. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual..66
Figura 2.5. Diagrama de una unidad de compresión mecánica de vapor. Fuente: U.S.A.I.D.

Desalination Manual……..……67
Figura 2.6. Movimiento de iones en el proceso de electrodiálisis. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual……..……68
Figura 2.7. Esquemas de fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa……..69
Figura 2.8. Esquema de una membrana de ósmosis inversa……..69
Figura 2.9. Esquema de sistema de evaporación solar……..71
Figura 2.10. Configuraciones de destilación por membranas. Fuente: Qtaishat and F-Banat, 2013……71
Figura 2.11. Diagrama simplificado de funcionamiento de una planta de ósmosis inversa……..73
Figura 2.12. Esquema de un sistema de pretratamiento de una planta de desalación…...76
Figura 2.13. Esquema de ósmosis inversa. Fuente: Adaptado de La desalinización en España. Cuadernos sectoriales. Enero de 2007……..76
Figura 2.14. Estructura de una membrana asimétrica integral……78
Figura 2.15. Estructura de una membrana asimétrica compuesta……78
Figura 2.16. Esquema de la configuración Plato-Marco. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano……81
Figura 2.17. Esquema de la configuración Fibra Hueca. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano……82
Figura 2.18. Componentes de un elemento de ósmosis inversa de arrollamiento en espiral. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano……83
Figura 2.19. Modelo de solución-difusión……85
Figura 2.20. Esquema de balance de materia……86
Figura 2.21. Intercambiador de presión, fases 1 y 2……89
Figura 2.22. Esquema de un proceso de OI con intercambiador de presión……89
Figura 2.23. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de presión rotatorio. Adaptado de MacHarg (2007)…… ……90
Figura 2.24. Distribución de los costes de desalación. Fuente: Adaptado de La desalinización en España. Cuadernos sectoriales. Enero de 2007……92

.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Composición y características típicas del agua de mar……63
Tabla 2.2. Tipos de captaciones para desalación. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano……74
Tabla 2.3. Comparativa de las configuraciones de membranas……84

1. INTRODUCCIÓN

Las reservas de agua en el planeta son inmensas. Estimaciones actualizadas calculan que la hidrosfera supone un volumen de cerca de 1386 millones de km^3, sin embargo -figura 2.1- los océanos, que representan las tres cuartas partes de la superficie terrestre y el 97,5% del total, tienen una salinidad media de más de un 3% en peso, lo que los hace inservibles para cualquier tipo de uso (agrícola, industrial o humano). Dentro de la proporción de agua dulce, en torno al 2,5% del total, el 68,9% de esta agua se encuentra en forma de hielo y nieve permanentes en las regiones polares y cadenas montañosas, por lo tanto de uso imposible debido al difícil acceso. El resto de agua dulce disponible, tan sólo el 29,9% (0,75% del total), se halla en forma de acuíferos subterráneos.

Así, el agua dulce superficial, que se encuentra básicamente en ríos y lagos, representa tan sólo el 0,3% del total del agua dulce, siendo ésta la única que puede ser utilizada sin limitaciones técnicas ni económicas.

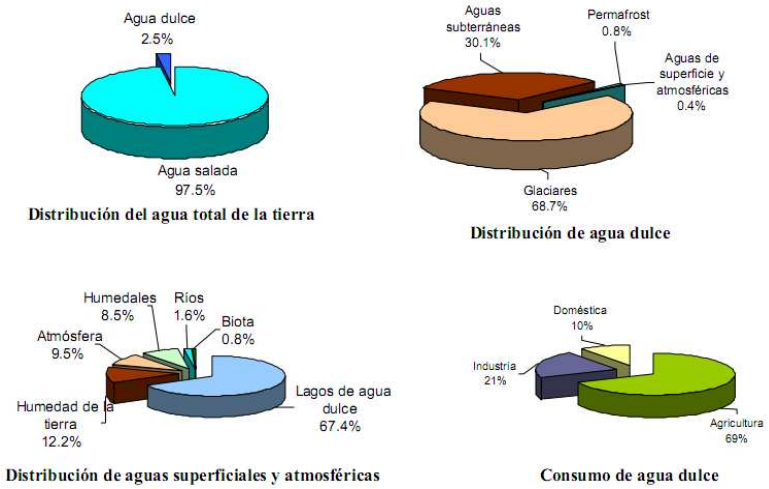


Figura 2.1.Proporciones de agua en la tierra

En este contexto, la desalación de agua de mar (o la menos extendida desalación de agua salobre y residual) podría ser una alternativa muy atractiva para la solución del problema de la falta de agua.

El desarrollo al que ha llegado la tecnología de desalación permite actualmente la producción masiva de agua a coste moderado, aportando soluciones flexibles y adaptadas a cada tipo de necesidad, aunque con ciertas limitaciones.

1.1. La desalación del agua

La desalación es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) y otras sustancias

indeseables contenidas en las aguas salobres o marinas, para convertirlas en agua adecuada para el consumo humano, agua apta para uso industrial o agrícola.

Las tecnologías más utilizadas a nivel mundial, son la desalación mediante plantas de membranas semipermeables en particular mediante ósmosis inversa, y la destilación.

En España, actualmente se utilizan mayoritariamente los sistemas de membranas semipermeables de ósmosis inversa (OI), no así en los países de oriente próximo, donde la técnica más utilizada sigue siendo la destilación (evaporación), mucho más costosa desde el punto energético.

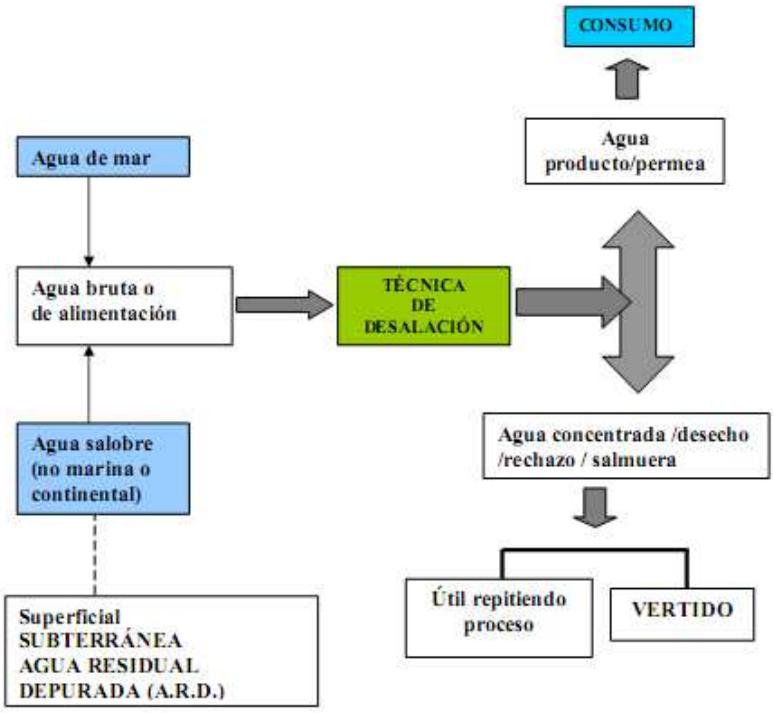


Figura 2.2. Esquema de un proceso de desalación.

La desalación se aplica tanto a aguas salobres como a las de mar - figura 2.2 - . Para producir agua desalada pueden considerarse los siguientes orígenes:

• Agua de mar.

La composición del agua del mar varía según su origen o según las características marinas, siendo de mayor concentración de sales en lugares cálidos con poca renovación como en el Mediterráneo, y menor en lugares semicerrados con abundantes aportes continentales como el mar Báltico

La tabla 2.1 resume las concentraciones medias de los constituyentes químicos mayoritarios del agua marina, comprobándose que se trata de una solución con una gran cantidad de sales disueltas, pero muy pobre en nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono).

Parámetro	Intervalos de referencia
Temperatura, °C	15 – 35
pH	7,9 – 8,1
Sales disueltas, mg/L	30.000 – 45.000
Conductividad, µS/cm (a 20 °C)	44.000 – 58.000
Bicarbonatos, mg/L	120 – 170
Sulfatos, mg/L	2.425 – 3.000
Cloruros, mg/L	17.500 – 21.000
Bromuros, mg/L	59 – 120
Nitratos, mg/L	0,001 – 4,0
Fluoruros, mg/L	1
Boro, mg/L	4 – 6
Amonio, mg/L	0,005 – 0,05
Sodio, mg/L	9.600 – 11.700
Potasio, mg/L	350 – 500
Calcio, mg/L	375 – 525
Magnesio, mg/L	1.025 – 1.400
Estroncio, mg/L	12 – 14
Sílice (SiO_2), mg/L	0,01 – 7,4
Carbono orgánico total, mg/L	1,2 – 3,0
Nitrógeno orgánico, mg/L	0,005 – 0,03

Tabla 2.1. Composición y características típicas del agua de mar.

Datos obtenidos de: Custodio, E.; Llamas, M.R. 1983. «Hidrología Subterránea». Editorial Omega, 2ª edición. Barcelona. y K. Grasshoff, K. Kremling, M. Ehrhardt. 1999. «Methods of Seawater Analysis». WILEY Verlag– VCH, third edition.

• Aguas salobres.

Se considera que el agua es salobre cuando su concentración de sales disueltas se encuentra en el intervalo de 1 a 10 g/l. Aunque el agua salobre puede ser de origen superficial, generalmente procede de acuíferos costeros en contacto directo con el mar. Los acuíferos de aguas salobres de origen fósil completamente aislados del mar, son también potencialmente útiles en la desalación.

• Aguas procedentes de EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) urbanas o industriales.

Hoy por hoy, las aguas residuales depuradas no se contemplan como fuente directa para producir agua potable; pero sí pueden ser regeneradas para otros usos.

2. TÉCNICAS DE DESALACIÓN

El proceso de desalinización de agua se realiza por medio de distintas tecnologías que en su conjunto han conseguido ponerse en práctica a lo largo de casi todas las zonas costeras y suministrar agua para un sinfín de necesidades. Desde el punto de vista de la tecnología, no existe alguna mejor que las otras y desde el punto de vista económico, cualquiera de las distintas opciones suele ser más cara que cualquiera de los medios habituales de suministro de agua (pozos, embalses, redes de distribución etc.).

Sin embargo, una parte de las actividades humanas se concentran en lugares donde no existe una alternativa a la desalinización lo que conlleva la aceptación del marco técnico económico de alguno de esos procesos.

Las principales técnicas de desalación las podemos clasificar en:

1) Procesos de entidad mayor

- Destilación Flash Multietapa (MSF)
- Destilación Múlti-Efecto (MED)
- Compresión de vapor (VC)
- Electrodiálisis
- Osmosis Inversa (OI)

2) Procesos de entidad menor

- Congelación
- Destilación por membranas
- Destilación solar
- Formación De hidratos
- Intercambio iónico

En los siguientes apartados, se va a dar una breve descripción de los procesos de desalación existentes actualmente, incidiendo de forma más detallada en aquellos más extendidos en la industria desaladora.

2.1. Destilación flash multietapa (MSF)

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma (y por lo tanto de carácter irreversible) - figura 2.3 -. Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra

mediante la operación de sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente. Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio de forma tal que se provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Debido a la naturaleza violenta y turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta beneficiándose así la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de mallas deshumidificadoras *("demisters")* donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor es condensado luego sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta. El agua de mar alimentada a la planta es precalentada también de esta forma con el calor cedido por el vapor durante la condensación del agua desalada producto.



Figura 2.3. Diagrama de una planta de evaporación súbita. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual

2.2. Destilación por múltiple efecto (MED)

La destilación de múltiple efecto (MED) utiliza el mismo principio que el proceso MSF – figura 2.4 -. La diferencia principal entre el proceso MED y el MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada (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), con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MSF donde se produce la evaporación súbita en forma directa.

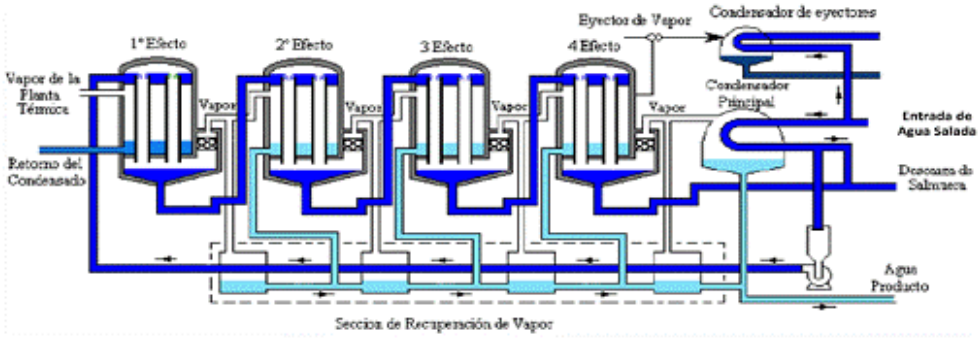


Figura 2.4. Diagrama de una planta multiefecto. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual

2.3. Compresión de vapor (CV)

El sistema de compresión de vapor – figura 3.5 - consiste en evaporar el agua del mar, aumentar la temperatura de condensación de vapores mediante un compresor y su posterior condensación en un intercambiador de calor, enfriado con el mismo agua evaporante.

Cuando el vapor se comprime, aumenta su temperatura de condensación y, al enfriar el condensador con el agua evaporante, se condensan los vapores y el agua dulce así obtenida se extrae del evaporador con la bomba de producto. Para mantener la salinidad constante en el interior del evaporador parte de la salmuera refrigerante se envía al mar. Para compensar la salmuera y producto extraídos hay que introducir agua de mar. Como el agua de mar es fría y la salmuera y producto están calientes, se les hace pasar por un intercambiador y así se recupera gran parte de su energía.

En la destilación con compresión de vapor (CV) el calor necesario para llevar el agua de mar a ebullición se obtiene directamente del vapor procedente del evaporador y reinyectado en la primera etapa luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La compresión del vapor puede ser efectuada por un compresor mecánico o por un termocompresor (plantas de CMV y de CTV respectivamente).

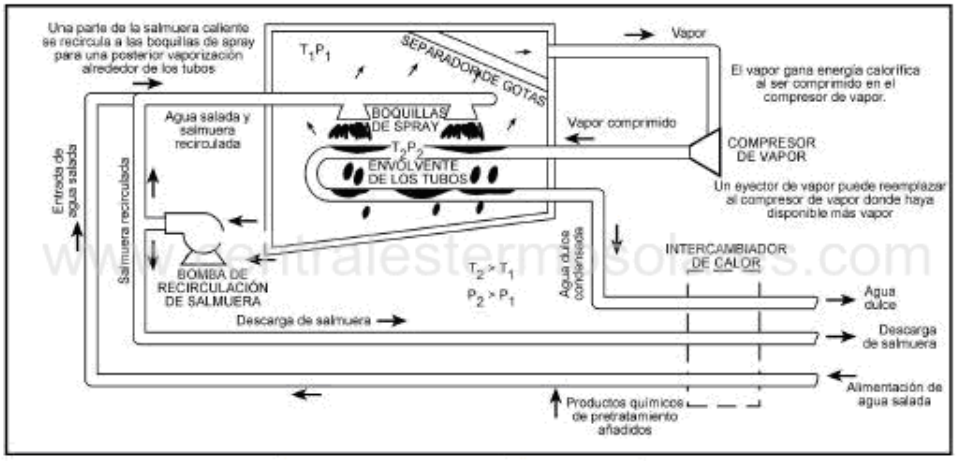


Figura 2.5. Diagrama de una unidad de compresión mecánica de vapor. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual

2.4. Electrodiálisis

La electrodiálisis (ED) es una técnica de separación basada en el conocido fenómeno mediante el cual, si se hace pasar una corriente eléctrica continua (c.c.) a través de una solución iónica, los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre ambos electrodos se colocan dos membranas semipermeables que permiten selectivamente solo el paso del Na+ o del Cl-, el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desaliniza progresivamente, obteniéndose agua dulce.

El proceso puede verse claramente en la figura 2.6, donde los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en compartimentos alternativos, celdas de dilución, el agua pura y en el resto, celdas de concentración, el agua salada más concentrada. Este producto de desecho, el cual debe ser eliminado debidamente puede llegar a ser hasta el 30 por ciento del total de agua de fuente tratada; 15 a 20 por ciento es un resultado más típico.

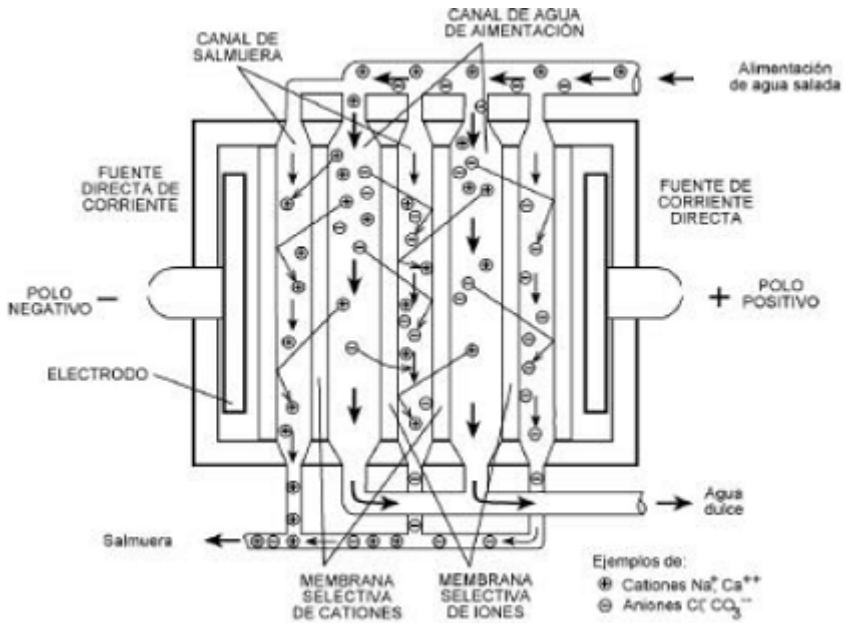


Figura 2.6. Movimiento de iones en el proceso de electrodiálisis. Fuente: U.S.A.I.D. Desalination Manual

El corazón del sistema, conocido como par de célula, está compuesto por dos membranas de intercambio iónico, que permiten de forma selectiva la transferencia de cationes y aniones, y los espaciadores que separan las membranas y permiten la distribución del agua sobre la superficie de las membranas. La acumulación en paralelo de hasta 600 pares de célula constituye lo que se conoce como pila de membranas (una pila típica de ED usada a nivel industrial puede tener entre 500 y 2000 pares de célula). El espaciador tipo malla genera una gran turbulencia, lo que facilita el transporte de los iones desde el agua de alimentación hasta la superficie de la membrana para su transferencia a la salmuera.

2.5. Ósmosis inversa

La ósmosis es un proceso espontáneo – figura 2.7 - por el cual las moléculas de disolvente atraviesan una membrana semipermeable de una solución de menor concentración de soluto hacia una solución con mayor concentración de soluto. La membrana semipermeable divide las soluciones. Las partículas del disolvente se mueven en ambos sentidos, pero con una mayor velocidad hacia el lado de la membrana de la solución más concentrada, proceso que finaliza cuando se igualan las velocidades. En este momento la presión que ejerce el disolvente es igual en ambos lados de la membrana por lo tanto no hay flujo de partículas del disolvente, la presión ejercida por las partículas se denomina *presión osmótica*.

A fin de invertir el proceso aplicamos una presión en el tubo de la solución más concentrada (a

través de una bomba), el movimiento se produce de la solución más concentrada a la solución más diluida. Este proceso es lo que constituye la ósmosis inversa**.** La altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio es función de la presión que se aplica, de las características de las membranas y de las concentraciones de ambas soluciones.

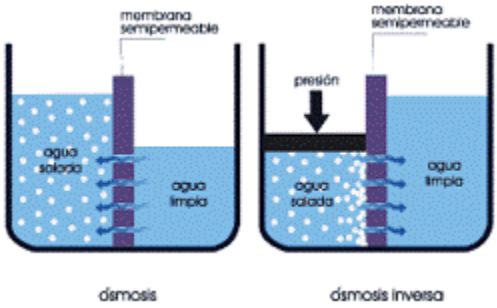


Figura 2.7. Esquemas de fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa.

2.5.1. Principios del proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa

En consecuencia, para desalar por ósmosis inversa es preciso disponer de una membrana semipermeable y de una fuerza exterior que impulse el agua a través de la membrana, generando una diferencia de presiones entre ambos lados de la membrana superior a la presión osmótica – figura 2.8 -.

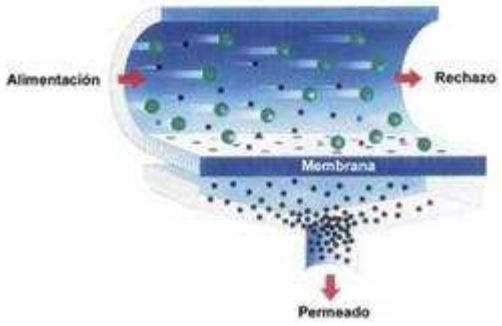


Figura 2.8. Esquema de una membrana de ósmosis inversa.

En comparación con la destilación y la electrodiálisis, la osmosis inversa es un proceso relativamente nuevo, ya que la comercialización con éxito de aplicaciones en agua salobre fue a principios de los años 70 del siglo pasado, y para agua de mar a finales de esa misma década.

La OI utiliza la presión para forzar el agua a través de una membrana especial, dejando atrás las sales disueltas en el lado de alimentación de la membrana. En este proceso de separación no se necesita calentamiento ni cambio de fase (líquido a vapor). La mayoría de la energía se

requiere para la presurización del agua de alimentación. Los sistemas de OI se comercializan en cuatro configuraciones: placa plana, tubulares, fibra hueca y arrollamiento en espiral siendo estas últimas las empleadas actualmente en la mayoría de las instalaciones de desalación. Las presiones de operación necesaria y la pureza del producto varían con la concentración salina del agua a tratar y las membranas empleadas.

2.6. 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 para que este proceso sea algún día competitivo, así como adaptar la tecnología a intercambiadores de frío. No se ofrecen datos del consumo específico de este proceso porque sólo existen experimentos de pequeña escala de difícil extrapolación.

2.7. Destilación Solar Directa

Los sistemas de destilación solar directa integran en el mismo dispositivo la captación solar y el sistema de destilación – figura 2.9 -. Constituyen el sistema más antiguo de desalinización y el principio básico en que se fundamenta es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes ó espejos (parabólicos ó lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor coste económico. El proceso no recupera calor y necesita un aporte masivo de energía, que cuando es solar se puede considerar gratis, excepto por la consideración que hay que hacer al equipo. La energía es gratis pero no el equipo ni el terreno necesario para ubicar los colectores.

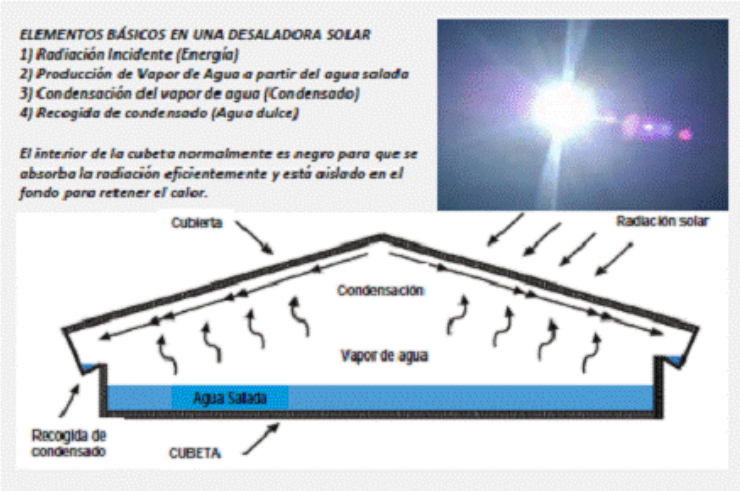


Figura 2.9. Esquema de sistema de evaporación solar.

2.8. Destilación por membranas (MD)

La destilación por membranas (MD) es un proceso de evaporación en el cual la membrana debe ser microporosa, hidrófoba y con elevada porosidad. Debido a la hidrofobicidad, el agua no puede penetrar en los poros, creándose de este modo en cada extremo de éstos una interfase líquido-vapor. La fuerza motriz en MD es una diferencia de presiones de vapor entre ambos extremos de los poros. Esta fuerza puede producirse por una diferencia de temperaturas y/o concentraciones, o bien aplicando vacío en un lado de la membrana mientras el otro lado se mantiene en contacto con la solución a tratar. La siguiente figura representa las cuatro configuraciones posibles:

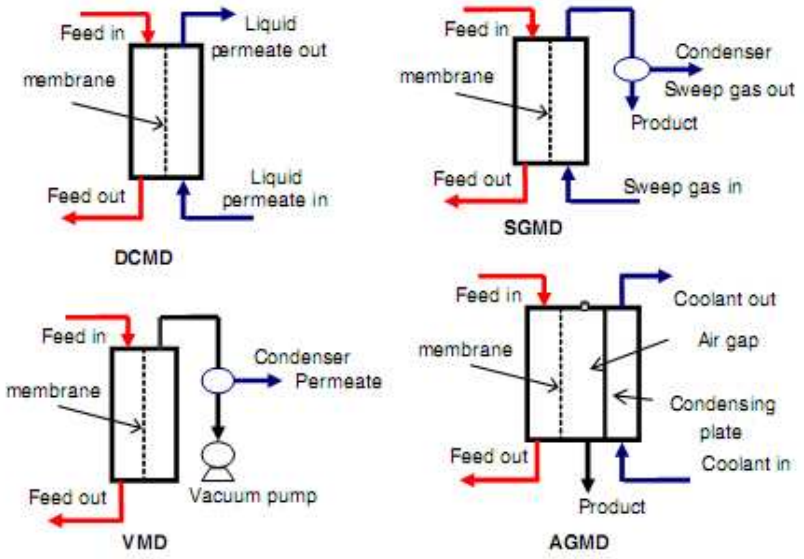


Figura 2.10. Configuraciones de destilación por membranas. Fuente: Qtaishat and F-Banat, 2013

2.9. 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 proceso de congelación, 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.

2.10. Intercambio iónico

El intercambio iónico también es un proceso que separa sales y se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias sólidas insolubles que son capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Las resinas liberarán iones H^+ y OH^- y fijarán los iones de electrolito. 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. Sólo es de aplicación en aguas poco concentradas y como tratamiento en procesos industriales.

3. INSTALACIÓN DESALADORA DE ÓSMOSIS INVERSA

La OI es un proceso donde el agua pasa a través de una membrana semipermeable impulsada por una bomba que eleva su presión hasta un valor superior al de su presión osmótica natural. Para este propósito se utiliza típicamente una bomba de alta presión, del orden de 5,4 a 8,2 MPa.

El proceso de ósmosis inversa es tan simple que a priori sólo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador. Pero una planta de OI es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas – figura 2.11 -, por ejemplo las membranas se ensucian muy fácilmente con la operación continuada y necesita un pretratamiento intensivo (mucho mayor que en los procesos de destilación).

Además, en las plantas de desalinización de agua de mar con membranas, generalmente se implementa una recuperación de energía de la corriente de salmuera que abandona la membrana a alta presión. Para ello se utilizan, entre otros, dispositivos tipo turbina Pelton, sistemas de intercambio de presión y los turbocharger. Los citados dispositivos permiten recuperaciones de energía del orden del 50 %.

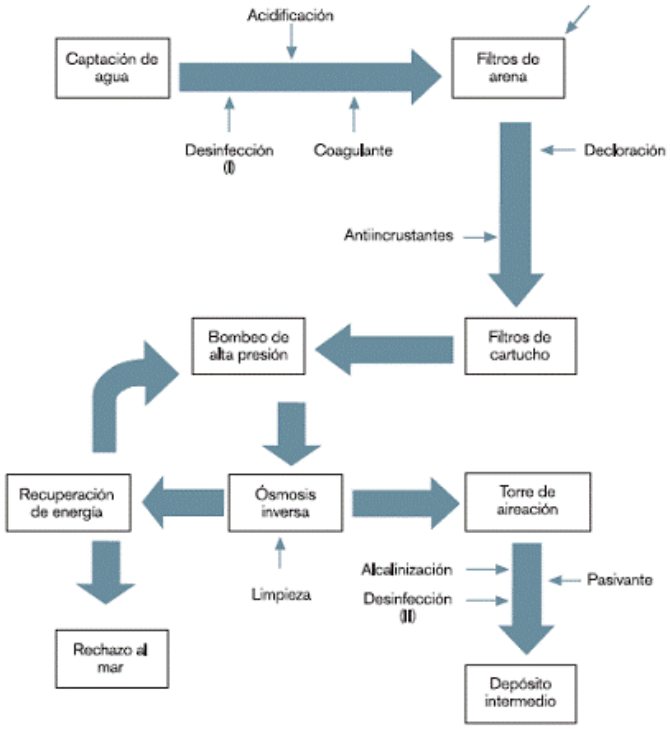


Figura 2.11. Diagrama simplificado de funcionamiento de una planta de Ósmosis Inversa.

En resumen, la desalación por ósmosis inversa (OI) emplea membranas que separan las sales del agua por hiperfiltración tangencial con alta presión, 55 a 69 bar (800 a 1000 psi). Este proceso es muy susceptible a la calidad del agua de mar. Antes de entrar en contacto con las membranas requiere un tratamiento de acondicionamiento físico y químico con el fin de reducir los riesgos de obturación por partículas en suspensión o por precipitación de sales poco solubles. El agua desalada requiere también de acondicionamiento para equilibrar su contenido de minerales y reducir su naturaleza corrosiva. En este caso la mayor parte de la energía se destina a presurizar el agua de mar y la eficiencia del proceso depende de las bombas de alta presión y de los equipos de recuperación que aprovechan la presión de salida de la salmuera. El consumo de energía oscila entre los 2,8 a 4,2 kWh/m^3, el porcentaje de rendimiento va de 30 a 50% y el factor de concentración de la salmuera va de 1,25 a 2.

Una instalación desaladora puede ser más o menos compleja según sea el tamaño y el tipo de agua a tratar y debe contemplar todos los elementos desde la toma de agua hasta el depósito final para el almacenamiento de permeado, para que responda a las prestaciones que deben exigirse a un sistema sofisticado y por tanto caro.

En dicha instalación pueden establecerse cuatro zonas o partes, dotadas de equipos que por su cometido e importancia son muy distintos. Dichas partes son:

- Captación o toma de agua → Suministro de agua de alimentación al proceso.
- Pretratamiento físico-químico → Orientado a prevenir los posibles daños que puedan

sufrir las membranas.

- Desalación → Separación del agua bruta en producto y salmuera.
- Post-tratamiento → Constituye la etapa final; ajuste de la calidad del agua.

A continuación, se detalla cada una de estas etapas:

3.1. Toma de agua de mar

La captación de agua de mar se puede hacer mediante dos procedimientos básicos de captación:

- Captación cerrada (pozos profundos, pozos playeros, drenes horizontales, cántaras...).
- Captación abierta (captación superficial, torres sumergidas, escollera...).

La tabla 2.2 resume las características de ambos procedimientos de captación.

Captación cerrada	Captación abierta
• Agua limpia como consecuencia de la acción filtrante del terreno. • Mínima actividad orgánica o biológica. • Baja concentración de oxígeno disuelto. • Temperaturas estables. • Posible presencia de importantes concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio. • Posible contaminación por nitratos y plaguicidas. • Composición química bastante estable aunque sujeta a variaciones temporales o estacionales por contacto con otros acuíferos.	• Contenido en sólidos en suspensión importante y variable. • Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica. • Mayor exposición a la contaminación. • Importante concentración de oxígeno disuelto. • Composición química muy variable. • Posible presencia de gran variedad de contaminantes. • Temperaturas más variables.

Tabla 2.2. Tipos de captaciones para desalación. Fuente: Guía de Desalación: Aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

Analizando la tabla, es fácil llegar a la conclusión de que las captaciones cerradas son preferibles a las abiertas. De hecho, estas últimas sólo se emplean cuando las primeras no son posibles de realizar.

Ahora bien, desde el punto de vista de la garantía de caudal, las ventajas son para la toma abierta, ya que la experiencia demuestra la dificultad de asegurar el caudal de producción en el agua de pozo por lo que, para plantas de gran tamaño se aconseja la toma abierta de agua de mar, aunque presente el inconveniente de una mayor complejidad en la etapa de

pretratamiento.

3.2. Pretratamiento

El objeto del pretratamiento en las plantas de desalación es adecuar las características físico-químicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos.

El pretratamiento es una parte fundamental del proceso de desalación, y su diseño condiciona de una manera muy importante los costes de mantenimiento y de explotación de la planta desaladora.

Un pretratamiento general consta de los siguientes procesos:

- Desbaste: eliminación de sólidos gruesos.

- Desinfección: se suele usar hipoclorito sódico para eliminar la actividad biológica de los organismos que pudiera tener el agua bruta, aunque se está tendiendo a no usarlo debido a que se producen compuestos orgánicos derivados clorados nocivos para la salud.

- Acidificación: su función es reducir el pH hasta valores comprendidos entre 5-6 para que se haga más efectiva la cloración y disminuir los depósitos calcáreos dañinos para las membranas. Suele utilizarse ácido sulfúrico.

- Coagulación y floculación: se añaden reactivos químicos que hacen que las partículas coloidales se agrupen y formen flóculos que sedimenten. El coagulante más usado es el cloruro férrico.

- Filtración: el agua se somete a un proceso de filtrado para retener los sólidos que lleve incorporados en su seno. El filtro más usado es el lecho de arena. Los filtros consisten en depósitos horizontales o verticales en cuyo interior se encuentra el medio filtrante.

- Decloración: en este proceso se elimina el cloro residual procedente de la desinfección para evitar la oxidación de la membrana, y por tanto su deterioro. Suele emplearse bisulfito sódico.

- Antiincrustante: evita que se produzcan incrustaciones de sales con baja solubilidad. Se utiliza hexametafosfato sódico (HMP) y polifosfatos.

- Microfiltración: se realiza para garantizar un filtrado mínimo del agua de 5 micras, que es el requerido por los fabricantes de membranas, de manera que al agua se le hace pasar a través de unos cartuchos filtrantes.

La siguiente figura muestra un esquema de los procesos a modo de resumen. Dependiendo de

la composición del agua bruta variará el número de etapas en el proceso global y por tanto el coste total.



Figura 2.12. Esquema de un sistema de pretratamiento de una planta de desalación.

3.3. Ósmosis Inversa

La unidad de ósmosis inversa es el núcleo y la parte fundamental de la instalación, ya que es en ella donde tiene lugar la desalación del agua previamente pretratada. Está compuesta por las membranas, la bomba de alta presión y el sistema de recuperación de energía. Un esquema simplificado de esta unidad se presenta a continuación:

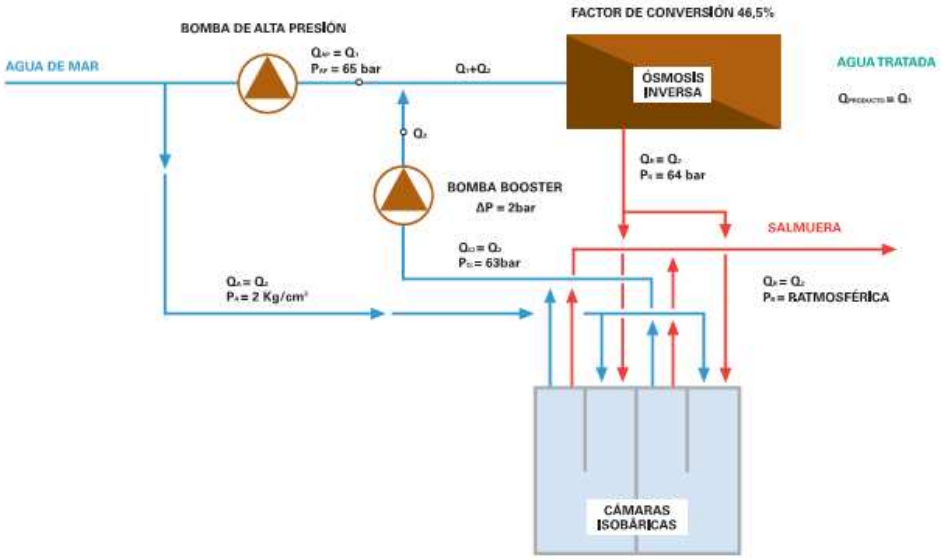


Figura 2.13. Esquema de ósmosis inversa. Fuente: Adaptado de La desalinización en España. Cuadernos sectoriales. Enero de 2007.

3.3.1. Membranas

Las membranas constituyen el corazón de la planta desalinizadora, puesto que en ella tiene lugar el proceso físico de ósmosis inversa.

Básicamente una membrana es una superficie con carácter selectivo que separa dos medios con distinto potencial químico y permite el paso a su través de determinados componentes y limita el de otros. El motor del transporte de componentes a su través es el gradiente de potencial químico.

Las principales características que deben tener las membranas para obtener un producto de calidad son las que siguen:

• Poseer un alto nivel de rechazo de sales.

• Tener una alta permeabilidad.

• Ser estables en un amplio rango de pH, temperatura, y agentes químicos.

• Ser capaces de poder soportar las altas presiones que proporcionan las bombas de alta presión.

Una de las principales clasificaciones de las membranas atiende a la estructura que presenta tras un corte transversal, según esto, pueden ser asimétricas o simétricas:

• Simétricas: la membrana posee la misma estructura porosa y las mismas propiedades físico-químicas en toda su estructura.

• Asimétricas: La estructura de la membrana es heterogénea y se pueden distinguir distintas partes: una fina capa polimérica, denominada capa activa y una capa subyacente porosa, de mayor espesor y que actúa como soporte de la anterior. La capa activa, es en la que tiene lugar el proceso de ósmosis y la que presenta el carácter selectivo.

A su vez, las membranas asimétricas, pueden estar formadas por el mismo material polimérico o no:

• Asimétricas Integrales: tanto la capa activa como su soporte están formadas por el mismo material polimérico dando lugar a una capa con un espesor comprendido entre 0,1 y 1 µm. Este tipo de membranas se elaboran por el proceso de inmersión de fases explicado posteriormente. Una membrana de este tipo presenta la siguiente estructura:

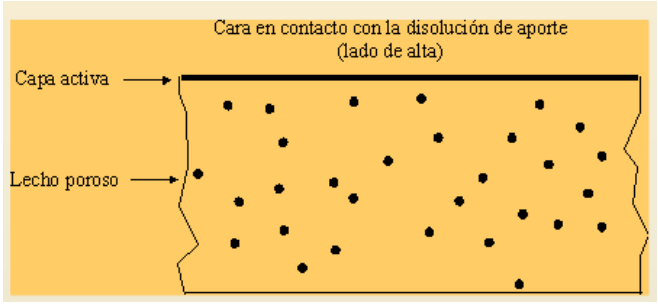


Figura 2.14. Estructura de una membrana asimétrica integral.

Asimétricas compuestas: La capa activa está compuesta por un material distinto al resto de membranas; Las membranas asimétricas compuestas se fabrican mediante el proceso de inmersión o mediante el proceso de polimerización "in situ", que también se explicará a más adelante. En general en estas membranas se distinguen las siguientes partes:

• Capa superior activa: permite el paso del disolvente, e impide el de las sales. Dicha capa suele tener, en este tipo de membranas un espesor de alrededor de 2000 Á.

• Capa intermedia: está formada por un material poroso y distinto al de la capa activa, actúa además como soporte de dicha capa.

• Capa inferior: es la capa de mayor espesor, siendo también porosa y proporcionando además resistencia mecánica.

Estas membranas tienen la siguiente sección transversal:

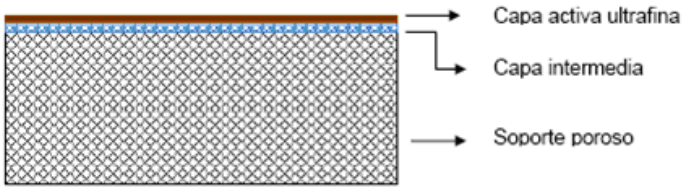


Figura 2.15. Estructura de una membrana asimétrica compuesta.

Las membranas más utilizadas en la Ósmosis Inversa son las asimétricas, ya que está demostrado que presentan mayor rechazo de sales además de una mayor permeabilidad al solvente, lo que les confieren una excelente selectividad.

Actualmente el desarrollo de membranas se está centrando en las asimétricas compuestas, ya que presenta las mejores características de filtración y selectividad.

Por otra parte, los principales materiales con los que se fabrican las membranas son el acetato de celulosa (AC) y los derivados de las poliamidas aromáticas (PA).

• Acetato de celulosa: las membranas de acetato de celulosa se fabrican en dos procesos; en

el primero de ellos, se une una capa muy fina, que es la capa activa, compuesta de acetato de celulosa en una disolución de acetona sobre una base de poliéster no entretejido, que constituye una base porosa y con alta permeabilidad. Posteriormente el conjunto se mete sobre un baño de agua a una temperatura de entre 60ºC y 90ºC. Esta última etapa es en la que se mejora la permeabilidad y la selectividad de la membrana.

• Poliamidas aromáticas: las membranas compuestas por poliamidas aromáticas también se fabrican en dos etapas; la primera etapa se una base de polisulfona con carácter no selectivo y con alta porosidad con una base de poliéster no entretejido, poroso y permeable. Tras esta etapa se añade sobre la base de polisulfona una fina película selectiva y permeable que constituye la capa activa. Esta última etapa se lleva a cabo mediante el proceso de polimerización interfacial.

Las membranas de poliamidas aromáticas presentan una mejor combinación de paso de solvente y rechazo de sales que las de acetato de celulosa. Por el contrario, las membranas de acetato de celulosa son más tolerantes al cloro libre, ya que sufren menor degradación de la que sufrirían las de poliamidas. Esto hace a las membrana de acetato más estables en aguas que tienen un alto grado de ensuciamiento, como pueden ser las aguas residuales o industriales.

A continuación vemos los métodos de preparación de la capa activa:

• Inversión de fase: en este método, una disolución de polímero, un disolvente y un no disolvente sufre dos procesos; el primero de ellos es una nucleación y crecimiento de poros, que formarán la capa subyacente porosa de las membranas asimétricas integrales. En el segundo de los procesos, las macromoléculas forman agregados para formar la capa activa.

Si a este conjunto se le añade una base porosa que confiera consistencia, se tendrá una membrana asimétrica compuesta.

• Polimerización interfacial: esta técnica se lleva a cabo mediante una policondensación de dos fases miscibles que dan lugar a dos capas: la capa activa y la capa intermedia. Este proceso de policondensación se realiza sobre una base porosa que confiera resistencia al conjunto.

3.3.1.1. Configuración de membranas de osmosis inversa

La membrana de ósmosis inversa está estructurada y empaquetada cuidadosamente para su integración en las unidades de proceso. Tanto el soporte como el empaquetado tienen como objetivo maximizar el flujo de agua a través de la membrana, minimizando el paso de sales.

Asimismo, el empaquetado debe reducir las pérdidas de carga, así como evitar en lo posible lo que se conoce como «polarización por concentración», que se deriva de la acumulación de

sales sobre la superficie de la membrana. Otro factor que se tiene en cuenta en el diseño mecánico, es el paso con suficiente libertad de coloides o partículas, de modo que se reduzcan en lo posible los ensuciamientos de la membrana que a la postre podrían provocar bajos flujos y alto paso de sal.

Comercialmente se consideran cuatro configuraciones básicas utilizadas a lo largo de la historia de aplicación de la desalación mediante ósmosis inversa, pero sólo la última se utiliza actualmente:

- **Plato y Marco.**
- **Tubular.**
- **Fibra hueca.**
- **Arrollamiento en espiral**

A) Configuración Plato-Marco y configuración tubular

Estas configuraciones corresponden a los inicios de la tecnología de la osmosis inversa. Son las configuraciones que se consideraron en los primeros momentos.

Ambas presentan menor densidad de empaquetado de membrana, con el consiguiente mayor coste económico, en comparación con las más modernas configuraciones de arrollamiento en espiral y fibra hueca.

La **configuración «Plato-Marco»**, que es la primera que se utilizó, usa una membrana plana que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte. Las membranas se disponen a ambos lados de un plato por el que se recoge el permeado producido, - figura 2.16 -.

La configuración tubular representa una alternativa a la de plato y marco.

La membrana va alojada dentro de un tubo, normalmente de PVC, que soporta la presión. El agua alimenta a la membrana por su interior y el permeado se obtiene por la parte exterior de la misma de manera que el tubo, así dispuesto, produce el permeado por su exterior que se recoge en el fondo del recipiente en el que va dispuesto dicho tubo.

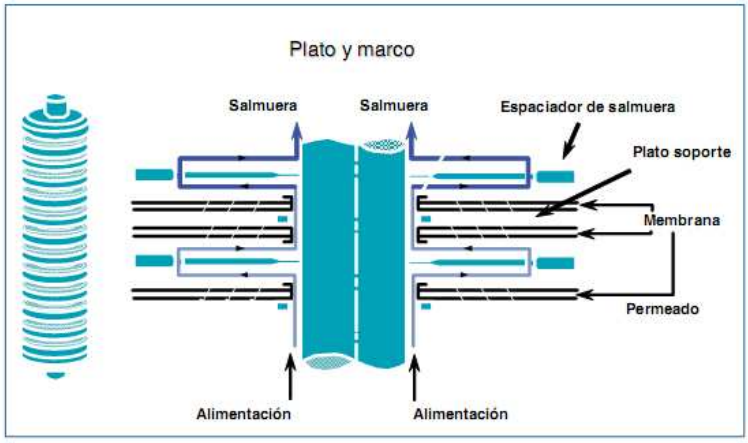


Figura 2.16. Esquema de la configuración Plato-Marco. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

B) Configuración Fibra hueca

La fibra hueca se produce con su propia estructura soporte. Estas fibras son tan finas como el tamaño de un cabello humano (84 µm).

Las fibras se agrupan como tubos en «U» con los extremos abiertos embebidos en una placa epoxy. El conjunto de fibras se encapsula dentro de un recipiente de presión con su punto de alimentación dispuesto en el centro de uno de los extremos.

El flujo dentro de la caja de presión se reparte de forma radial, a través del conjunto de fibras, de modo que el permeado penetra a través de las paredes de la fibra y fluye por el hueco recogiéndose a través del extremo opuesto de la caja de presión. El agua que no ha pasado a través de la membrana, arrastra las sales hacia la salida del concentrado dispuesto en el extremo opuesto.

Esta configuración representa la mayor densidad posible de empaquetado de membrana con la consiguiente mayor relación de producción de agua por volumen ocupado.

No obstante, esta alta densidad de empaquetado deja poco espacio entre las fibras, por ello en este caso las partículas o sólidos en suspensión fluyen con mayor dificultad a través de las fibras provocando problemas de ensuciamiento que son difíciles de solucionar y provocan la consiguiente disminución de rendimiento, - figura 2.17 -.

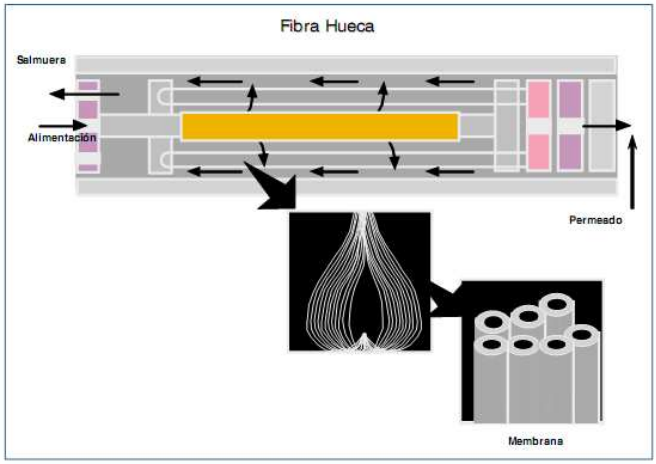


Figura 2.17. Esquema de la configuración Fibra Hueca. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

C) Configuración en arrollamiento en espiral

En la actualidad, los elementos de ósmosis inversa que se están instalando son los de configuración en espiral. Se fabrican en forma de lámina sobre un material soporte, que en el caso de las actuales membranas de multicapa delgada, T.F.C. (Thin Film Composite), suele ser un poliéster tejido-no tejido. Dos de estas láminas u hojas se agrupan entre si pero opuestas y separadas por un espaciador que actúa como canal para el flujo de permeado. Ambos lados y uno de los extremos de este conjunto, se sellan mediante unos cordones o líneas de pegamento para formar un conjunto de varias capas a modo de «sobre». El extremo abierto (no pegado) está conectado con el tubo encargado de recoger el permeado, alrededor del cual se arrolla el sobre para formar la espiral. Junto al sobre, se enrolla también una red plástica (espaciador), de modo que queden separadas las superficies de membrana y se mantenga de ese modo suficiente espacio libre para el flujo de agua de alimentación. El elemento así constituido se completa con unas piezas plásticas en los extremos para evitar un posible «efecto telescópico» («telescoping») y se cubre exteriormente con un recubrimiento a base de epoxy-fibra de vidrio que asegura el conjunto -figura 2.18-.

Por último, estos elementos se disponen en recipientes cilíndricos conocidos como cajas de presión, capaces de soportar las elevadas presiones de operación. La alimentación se sitúa en un extremo y fluye en paralelo a la dirección del tubo que recoge el permeado. Parte del agua fluye a través de la membrana, recorre un camino espiral y es recogida en el tubo de permeado. El agua que no pasa a través de la membrana circula a lo largo del elemento paralelamente al tubo de permeado, arrastrando las sales hacia la salida de concentrado situada en el extremo opuesto de la caja de presión.

El permeado recogido en el tubo central puede extraerse por cualquiera de los extremos según

necesidades del diseño.

En resumen, para esta configuración, los componentes de un elemento de ósmosis inversa son los siguientes:

- Membranas (capas).
- Espaciadores de salmuera.
- Espaciadores de permeado.
- Tubo de permeado.
- Tapas finales («anti-telescoping»).
- Envoltorio del elemento.
- Junta labiada de salmuera

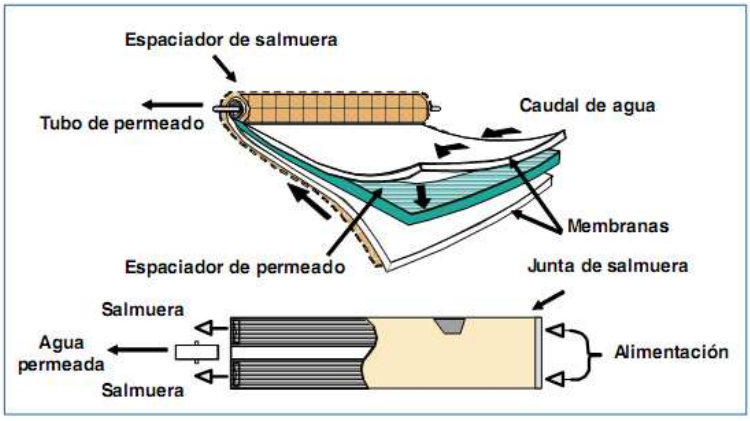


Figura 2.18. Componentes de un elemento de ósmosis inversa de arrollamiento en espiral. Fuente: Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

En la siguiente tabla se muestran una comparativa de las configuraciones anteriores:

CARACTERÍSTICA		DE PLACAS	TUBULAR	ESPIRAL	FIBRA HUECA
Superficie de membrana por módulo (m^2)		15-50	1,5-7	30-34	370-575
Volumen de cada módulo (m^3)		0,30-0,40	0,03-0,1	0,03	0,04-0,08
Caudal por módulo (m^3/d)		9-50	0,9-7	30-38	40-70
Grado de compactación (m^2 de membrana por m^3)		50-125	50-70	1.000-1.100	5.000-14.000
Productividad por unidad de superficie (m^3/d por m^2)		0,6-1	0,6-1	1-1,1	0,1-0,15
Productividad por unidad de volumen (m^3/d por m^3)		30-125	30-70	1.000-1.250	900-1.500
Conversión de trabajo por módulo (%)		10	10	10-50	30-50
Pérdida de carga por tubo de presión (bar)		2-4	2-3	1-2	1-2
Intercambiabilidad por otra marca		Nula	Nula	Total	Nula
Tolerancia frente a las sustancias coloidales		Mala	Buena	Mala	Mala
Tolerancia frente a las sustancias en suspensión		Mala	Buena	Mala	Muymala
Comportamiento frente a la limpieza	Mecánica	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Químicas	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Pretratamiento necesario		Coagulación + filtración a 5 micras	Filtración	Coagulación + filtración a 5 micras	Coagulación + filtración a 1 micra
Aplicaciones		Alimentación	Alimentación	Desalación de aguas salobres y de mar	Desalación de aguas salobres y de mar
		Líquidos poco cargados	Aguas residuales y líquidos cargados	Obtención de aguas de alta pureza	Obtención de aguas de alta pureza
		Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias	Aguas residuales y líquidos poco cargados. Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias

Tabla 2.3. Comparativa de las configuraciones de membranas.

3.3.1.2. Ecuaciones fundamentales

Las siguientes expresiones ayudan a comprender los fenómenos relacionados con la ósmosis inversa.

- *Modelo de solución – difusión*

Las fórmulas usadas en los cálculos de ósmosis inversa están basadas en el modelo de solución-difusión a través de la membrana, en donde habrá un paso de un flujo de sales, Js, y un flujo de agua, Jw.

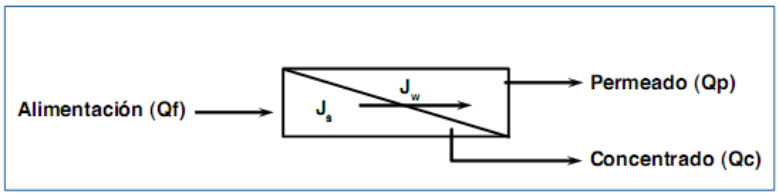


Figura 2.19. Modelo de solución-difusión.

La ecuación de difusión del flujo de agua, o solvente, es la siguiente:

$$J_w = A \times (\Delta P - \Delta\pi) \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde

J_w = Flujo de agua en l/m^2/h

A = Coeficiente de permeabilidad de la membrana en l/m^2/bar

ΔP = Presión diferencial transmembrana, bar.

Δπ = Presión osmótica diferencial, bar.

El factor A es característico de cada membrana y depende de varios factores como son: el espesor y material de la membrana, la temperatura, la presión, el pH, el factor de conversión y la concentración salina de la solución.

El término entre paréntesis de esta fórmula es lo que se conoce como Presión Neta de Trabajo, «Net Driving Pressure» (NDP).

De esta fórmula se deduce que en cuanto mayor sea la presión neta de trabajo, mayor será la productividad de la membrana.

La ecuación del transporte de sales es la siguiente:

$$J_S = B \times \Delta C \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

Donde

J_s = Flujo de sales, en kg/m^2/s.

B = Coeficiente de transferencia de masa de sales, en m/s.

ΔC = Concentración media diferencial transmembrana kg/m^3.

Los factores A y B dependen de las características de la membrana y de la temperatura, la presión, el pH, el factor de conversión y la concentración salina de la solución.

De esta fórmula se desprende que cuanto mayor sea la concentración salina en el lado de

alimentación, mayor será el paso de sales, con lo que aumentará la salinidad del permeado.

Por otra parte, fenómenos como la «polarización» de las membranas, hacen que la concentración de sales en el permeado sea mayor de lo teóricamente previsto.

- *Balance de Materia* - *figura 2.20* -

Balance del solvente: $Q_f = Q_p + Q_c$ (Ec. 2.3)

Balance del soluto: $Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$ (Ec. 2.4)

Donde:

Q_f = Caudal de alimentación, m^3/h

Q_p = Caudal de permeado, m^3/h

Q_c = Caudal de concentrado o rechazo, m^3/h

c_f = Concentración de soluto en la alimentación, kg/m^3

c_p = Concentración de soluto en el permeado, kg/m^3

c_c = Concentración de soluto en el concentrado o rechazo, kg/m^3

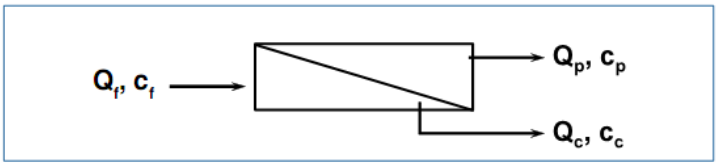


Figura 2.20. Esquema de balance de materia.

- *Factor de conversión y factor de concentración*

El **factor de conversión o recuperación** («recovery»), es el porcentaje de permeado que se obtiene a partir de determinado caudal de alimentación.

Es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} x100 = \left(1 - \frac{Q_c}{Q_f}\right) x100 \quad \text{(Ec. 2.5)}$$

Dónde:

Q_p = caudal de permeado, m^3/h

Q_f = caudal de alimentación, m^3/h

Q_c = caudal de concentrado o rechazo, m^3/h

La mayor conversión de un sistema implica, además, una mayor concentración en la salmuera. El factor de concentración de un sistema de ósmosis inversa está relacionado con el factor de conversión mediante la fórmula siguiente:

$$FC = \frac{1}{1-Y} \qquad \text{(Ec. 2.6)}$$

Dónde: FC = factor de concentración. Y = factor de conversión en tanto por uno.

Por ejemplo, un sistema de ósmosis inversa diseñado para un factor de conversión del 75 % tendría un factor de concentración de 4, es decir: la salinidad del concentrado es cuatro veces mayor que la salinidad de la alimentación.

- *Factor de Rechazo (R) y de Paso de Sales (SP)*

El rechazo de sales de las membranas y de un sistema de membranas, es el factor que determina la calidad final del permeado de un sistema de ósmosis inversa.

La fórmula que determina el rechazo de sales es:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} x100 \qquad \text{(Ec. 2.7)}$$

C_f = Concentración de sales en la alimentación kg/m^3

C_p = Concentración de sales en el permeado kg/m^3

R = Rechazo de sales, %.

Por tanto, el paso de sales en tanto por ciento, será:

$$SP(\%) = 100 - R \qquad \text{(Ec. 2.8)}$$

3.3.2. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión juega un importante papel en la plata desaladora ya que proporciona al agua, una vez pretratada, una presión (superior a la presión osmótica) adecuada para que se obtenga la producción deseada. Las presiones que suelen alcanzarse, están en torno a los 60-70 bar, aunque esta cifra varía según la bomba que se utilice y la producción que se requiera. Constituye además un consumo importante del total de la planta, de manera que la recuperación de energía, que veremos en el siguiente apartado, va encaminada a disminuir su consumo mediante la recuperación de la energía del rechazo.

El tipo de bomba que se utilice en la planta dependerá en gran medida del caudal de producción así como de la presión que deba proporcionar. Se suelen usar los siguientes tipos:

- Bombas de desplazamiento positivo de tipo pistón: son bombas muy robustas y con una alta eficiencia hidráulica 86-88 %. Sus caudales pueden ir llegar hasta unos 2400 m^3/día y pueden llegar a presiones de hasta 70 bar, por lo que se usa en plantas de capacidad intermedia. Presentan problemas de mantenimiento, y son además más caras.

- Bombas centrífugas: su eficiencia es algo más baja que la anterior pero su fiabilidad y mantenimiento mayor; es la solución más adoptada. Se usa en plantas de capacidad media y alta. Cada vez más, se está usando las bombas centrífugas de cámara partida y de segmentos.

3.3.3. Cámaras de Intercambio de Presión (CIP)

Las bombas de alta presión (60-70 bar) son los equipos que alimentan las membranas de ósmosis inversa a la presión adecuada para que pueda producirse la separación entre el perneado (agua desalada) y el rechazo (salmuera). El gran consumo de energía que se produce en esta fase del proceso ha provocado el desarrollo de diferentes sistemas de recuperación de energía que, desde las turbinas de contrapresión, han evolucionado a las turbinas tipo Pelton y a sistemas muy recientes de cámaras intercambiadoras de presión. De esta forma, se ha pasado de un consumo específico de 8-9 kWh/m³ en los años ochenta a 3-4 kWh/m³ en las plantas más modernas.

Los tipos de Cámaras de Intercambio de Presión (CIP) que existen en el mercado se pueden agrupar en dos grupos: *de desplazamiento y de rotación*.

Las CIP de desplazamiento transmiten la energía potencial (presión) que tiene la salmuera al agua de mar en unos cilindros mediante pistones, sin tener que transformar esta energía potencial en energía de rotación.. De forma resumida se puede decir que consisten en dos cilindros con pistones y un juego de válvulas - figura 2.21 -. En un lado de uno de los cilindros entra el agua de alimentación sin presión. Cuando se ha llenado se abre una válvula y comienza a entrar por el lado opuesto el rechazo con alta presión, comunicándole la misma al agua de alimentación. Cuando ha llegado al final de la carrera vuelve a repetirse el ciclo. En el otro cilindro se da el mismo ciclo pero invertido de forma que se tenga un caudal lo más estable posible.

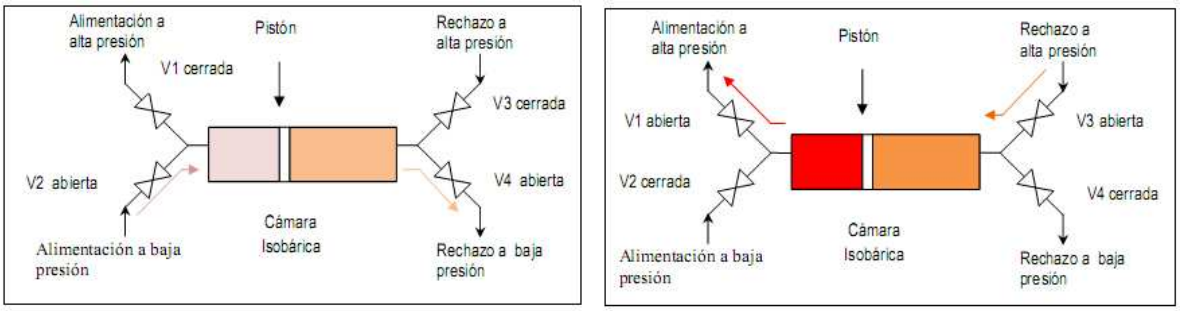


Figura 2.21. Intercambiador de presión, fases 1 y 2.

Las cámaras del tipo de rotación – figura 2.22 - se basan en el mismo principio que las anteriores, poner en contacto ambas corrientes. Lo que las diferencia es que en el caso anterior las partes móviles del equipo son los elementos, válvulas generalmente, que dan paso a una corriente u otra. En este caso el elemento que da paso no existe y lo que se mueve es la propia cámara. En este sistema el contacto entre los fluidos es directo, no existiendo ninguna separación física, ni pistón entre ambas corrientes.

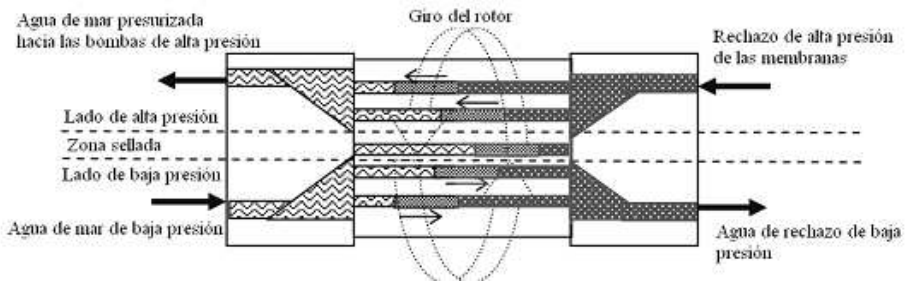


Figura 2.22. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de presión rotatorio. Adaptado de MacHarg (2007).

Como se puede deducir, al tener las cámaras de ambos tipos un volumen determinado y ser el

mismo para llenarlas de salmuera que de agua de mar, y como la frecuencia de los ciclos es, lógicamente, la misma para ambas corrientes, el caudal de agua de mar presurizada tiene que ser sensiblemente igual al de salmuera de alta presión. Por otra parte, la presión de salida de la salmuera es inferior a la de entrada del agua de mar a membranas, como ya hemos comentado. La presión de la salmuera entrando a las cámaras es aún menor que la de salida de las membranas, ya que hay que restarle las pérdidas de carga en tuberías y válvulas hasta llegar a las cámaras. Como además las cámaras tienen un rendimiento en la transmisión de presión al agua de mar, cuando ésta sale presurizada de las cámaras, requiere un incremento de presión para alcanzar la de entrada a las membranas. Es necesaria, por tanto, la instalación de una bomba *booster* – bomba de circulación -, entre la salida de las cámaras y la entrada a las membranas, que le proporcione dicho incremento. La siguiente figura muestra un diagrama esquemático.

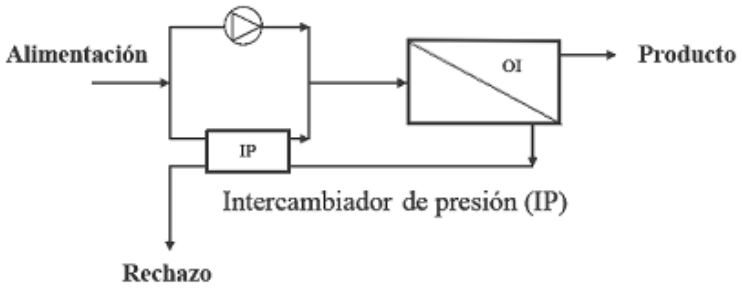


Figura 2.23. Esquema de un proceso de OI con intercambiador de presión. Fuente: García Rodríguez, 2008

Actualmente se fabrican intercambiadores de presión que superan el 96% de recuperación de energía de forma que la presión que ha de dar la bomba booster es de sólo unos pocos bar y un caudal igual al caudal de rechazo. Esta bomba también dispondrá de variador de frecuencia como método de regulación.

Para equilibrar los flujos es necesario colocar caudalímetros, tanto en la entrada de agua de alimentación a baja presión como en la salida de rechazo a alta presión. El sistema de control debe igualar ambos caudales.

3.4. Operaciones de postratamiento ósmosis inversa para el suministro de agua potable

En función de la calidad requerida del agua producto y/o de su aplicación, será necesario tratar el agua después del proceso de ósmosis inversa. A modo de ejemplo, para el suministro de agua potable, se llevará a cabo las siguientes operaciones:

- Una *desgasificación* para eliminar el H_2S y/o CO_2 que contiene el agua y que las

membranas no pueden retener.

- Una *alcalinización* con el fin de incrementar el pH añadiendo NaOH ó cal.
- Una *pasivación* para eliminar la acción corrosiva del agua frente a los metales.
- Una *cloración.*

3.5. Vertido de salmuera

Con los diseños y tecnologías actuales se pueden esperar factores de recuperación del orden del 50%, lo que significa que la concentración de sales en el rechazo es de 70-80 g/l. El vertido de las salmueras, si bien muy concentrado, representa un pequeño caudal relativo, por lo que no cabe esperar serias amenazas para el medio marino. Sin embargo, debe ser controlado para evitar daños en determinadas especies vegetales y, sobre todo, para estudiar la reacción de las posidonias oceánicas.

4. LOS COSTES DE LA DESALINIZACIÓN

El gran reto de la desalinización es conseguir que el coste del agua desalada sea competitivo con el de otros recursos.

Para conseguir un coste competitivo habrá que minimizar la influencia de la componente energética en dicho coste, tanto en lo que se refiere a costes fijos (término de potencia) como a los costes variables (término de energía).

Si se repercute la amortización de las instalaciones en el precio del agua, se estima que alrededor de 40% del coste total procede de la energía mientras que la amortización está comprendida entre un 30% y un 40%.

Si no se tiene en cuenta la amortización, entonces la energía representará prácticamente las tres cuartas partes del coste total del agua.

De ahí la importancia de seguir investigando en sistemas que reduzcan aún más el consumo específico del proceso de ósmosis inversa, cuyos últimos logros han permitido alcanzar altos niveles de capacidad de producción.

Los costes de la desalación oscilan ya entre 0,5 y 0,8 dólares/m³.

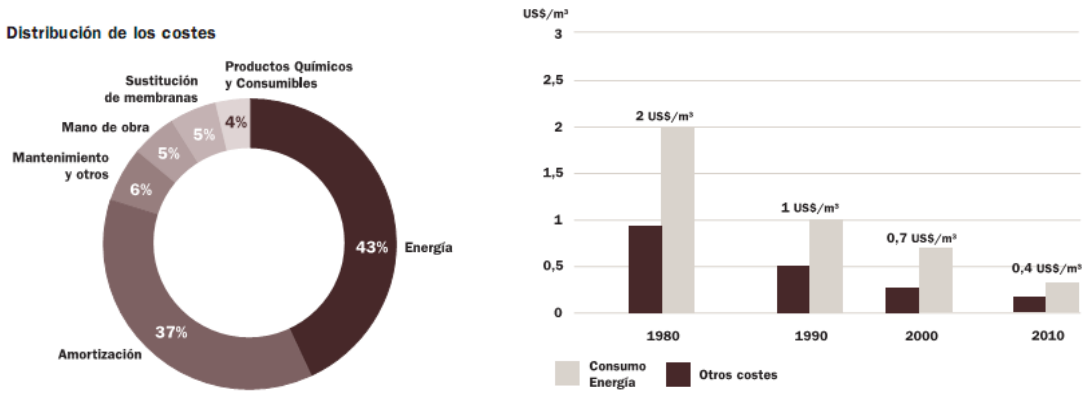


Figura 2.24. Distribución de los costes de desalación. Fuente: Adaptado de La desalinización en España. Cuadernos sectoriales. Enero de 2007.

5. REFERENCIAS

1. MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL. Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Disponible en http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/agencia_andaluza_del_agua/ciclo_integral_del_agua_urbana/desalacion/ministerio_sanidad_guia_desalacion.pdf (Acceso 23/03/2013)

2. INSTITUTO ESPAÑOL DE COMERCIO EXTERIOR. La desalinización en España. Cuadernos sectoriales. Enero de 2007. Disponible en http://www.acuamed.es/pdf/publicaciones/Icex/05Pr_La_desalinizacion_en_Espana.pdf (Acceso 23/03/2013)

3. González Pérez, Mari Cruz. "Análisis comparativo de permeadores en plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa: Recomendaciones sobre selección de diseños."
Proyecto fin de carrera, ETSI, 2010. Disponible en http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4909 (Acceso 23/03/2013)

4. Veza Iglesias, Jose Miguel. "Introducción a la Desalación de aguas", Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones de la ULPGC, España, 2002, ISBN 84-9579-298-2

5. Web http://www.emagister.com/curso-agua-desalacion-2-4 (Acceso 23/03/2013)

6. M. R. Qtaishat and F- Banat. Desalination by solar powered membrane distillation Systems.

Desalination 308 (2013) 186–197.

7. The USAID Desalination Manual. Englewood, N.J., U.S.A., IDEA Publications 1982. (Originally published by USAID/CH2M Hill)