

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo
Laboratorio Nacional de Aguas



Informe:
“Tecnologías para Desalación”



Preparado por:
Inga. Yuliana Solís Castro
Ing. Rodolfo Araya Álvarez

Aprobado por:
Ing. Eduardo Lezama Fernández

15 de junio de 2016



**Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo**



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL
REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, **Jorge Luis Zapata Arroyo**

N° Cédula: 2-0564-875

Dependencia: Gerencia General

Autorizo como Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital y Catálogo en línea (OPAC) la documentación incluida en la lista adjunta.

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: gerenciageneral@aya.go.cr **N° Teléfono:** 2242-5090

Firma: _____

Índice de Contenidos

<u>Abreviaturas</u>	6
<u>1 ANTECEDENTES</u>	7
<u>2 GENERALIDADES DE LA DESALACIÓN</u>	8
<u>2.1 Captación y fuente de las aguas destinadas a la desalación</u>	10
<u>2.1.1 Captación del agua</u>	10
<u>2.2 Tecnologías para desalación</u>	11
<u>2.2.1 Tecnologías por membranas</u>	11
<u>2.2.1.1 Ósmosis Inversa (OI)</u>	12
<u>2.2.1.2 Nanofiltración (NF)</u>	15
<u>2.2.1.3 Electrodiálisis (ED) y Electrodiálisis Reversible (EDR)</u>	15
<u>2.2.2 Evaporación térmica o destilación</u>	17
<u>2.2.2.1 Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa (MSF, Multistage Flash Distillation)</u>	17
<u>2.2.2.2 Proceso de Evaporación Multiefecto (MED, Multiple Effect Distillation)</u>	18
<u>2.2.2.3 Proceso de Compresión de Vapor</u>	20
<u>2.2.3 Tecnologías Novedosas en Desarrollo</u>	21
<u>2.2.3.1 Ósmosis Forzada (OF)</u>	21
<u>2.2.3.2 Destilación por membrana</u>	23
<u>2.2.3.3 Congelación/Descongelación</u>	24
<u>2.2.3.4 Desionización capacitiva (Capacitive Deionization, CDI)</u>	24
<u>2.2.3.5 Desalación Supercrítica (DSC)</u>	25
<u>3 CALIDAD DEL AGUA</u>	26
<u>3.1 Calidad del agua de mar</u>	26

<u>3.1.1 Turbiedad</u>	27
<u>3.1.2 Carbono Orgánico</u>	28
<u>3.1.3 Sólidos disueltos</u>	28
<u>3.1.4 Temperatura</u>	29
<u>3.1.5 Agua corrosiva</u>	29
<u>3.1.6 Boro</u>	30
<u>3.1.7 Bromo</u>	30
<u>3.1.8 Toxinas producidas por algas</u>	31
<u>3.2 Contaminación del agua de mar</u>	31
<u>3.3 Aspectos de calidad de agua importantes para los sistemas de desalación por membranas</u>	31
<u>3.3.1 Índice de densidad de sedimentos (SDI)</u>	32
<u>3.4 Análisis de calidad de agua cruda</u>	33
<u>3.4.1 Agua cruda</u>	33
<u>4 ENFOQUE DEL TRATAMIENTO</u>	35
<u>4.1 Pretratamiento</u>	35
<u>4.1.1 Pretratamientos para desalación por membranas</u>	35
<u>4.1.1.1 Dosificación de antiincrustantes y ácidos</u>	35
<u>4.1.1.2 Oxidación</u>	36
<u>4.1.1.3 Coagulación-floculación</u>	37
<u>4.1.1.4 Sedimentación</u>	37
<u>4.1.1.5 Flotación</u>	37
<u>4.1.1.6 Filtración</u>	37
<u>4.1.1.7 Adsorción</u>	38
<u>4.1.1.8 Desinfección</u>	38

<u>4.1.1.9 Reducción</u>	38
<u>4.1.1.10 Descarbonatación</u>	38
<u>4.1.1.11 Desgasificación</u>	39
<u>4.1.2 Ejemplo de pretratamientos para desalación por membranas</u>	39
<u>4.1.3 Pretratamientos para desalación por destilación o evaporación</u>	40
<u>4.1.3.1 Dosificación de antiincrustantes</u>	40
<u>4.1.3.2 Descarbonatación y desgasificación</u>	40
<u>4.1.3.3 Dosificación de antiespumantes</u>	40
<u>4.1.4 Pretratamientos mediante membranas</u>	40
<u>4.1.4.1 Microfiltración (MF)</u>	41
<u>4.1.4.2 Ultrafiltración (UF)</u>	41
<u>4.1.4.3 Nanofiltración (NF)</u>	42
<u>4.1.4.4 Constitución de los pretratamientos mediante membranas</u>	42
<u>4.2 Eliminación de patógenos</u>	43
<u>4.3 Desalación por Ósmosis Inversa</u>	43
<u>4.3.1 Configuración de las membranas</u>	43
<u>4.3.1.1 Módulo de membrana en espiral</u>	43
<u>4.3.1.2 Módulos de fibra hueca (HFF)</u>	44
<u>4.3.2 Estructura de la membrana</u>	45
<u>4.3.3 Material de las membranas</u>	45
<u>4.3.3.1 Membranas de Acetato de Celulosa (AC)</u>	46
<u>4.3.3.2 Membranas de poliamida (PA)</u>	46
<u>4.3.4 Capacidad de rechazo</u>	46
<u>4.3.5 Presión osmótica</u>	47
<u>4.3.5.1 Difusión y Ósmosis</u>	47

<u>4.3.5.2 Presión osmótica</u>	47
<u>4.3.6 Mecanismos para el rechazo de solutos</u>	47
<u>4.3.7 Ecuaciones para el flujo de agua y de solutos</u>	48
<u>4.3.8 Polarización de la concentración (PC)</u>	50
<u>4.4 Postratamientos</u>	51
<u>4.4.1 Mezcla de aguas para disminuir altas concentraciones de boro</u>	51
<u>4.4.2 Intercambio Iónico</u>	51
<u>4.4.3 Acondicionamiento del agua tratada</u>	52
<u>4.4.4 Desinfección</u>	54
<u>4.5 Recuperación de la Energía</u>	56
<u>4.6 Materiales de construcción</u>	56
<u>5 IMPACTOS AMBIENTALES Y MITIGACIÓN</u>	57
<u>5.1 Estudios ambientales</u>	57
<u>5.2 Acciones capaces de producir efectos sobre el medio ambiente en un proyecto de desalación</u>	57
<u>5.3 Vertido de la salmuera</u>	58
<u>5.4 Manejo de residuos</u>	59
<u>6 COSTOS DEL TRATAMIENTO</u>	60
<u>6.1 Costos de capital y de operación</u>	62
<u>6.1.1 Evolución de los costos de desalación</u>	62
<u>6.1.2 Costo del agua desalada con respecto a la naturaleza del agua de alimentación y la capacidad del sistema</u>	63
<u>6.1.3 Costos de desalación respecto a la fuente de energía</u>	64
<u>6.1.4 Costos de la desalación del agua respecto al tipo de tecnología de desalación</u>	65
<u>6.1.5 Desglose de los costos de desalación</u>	66

<u>6.1.6 Costo del Tratamiento - Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos</u>	67
<u>6.1.6.1 Costos de capital</u>	68
<u>7 NORMATIVA VIGENTE Y TRAMITOLOGÍA</u>	73
<u>7.1 Reglamento de Concesiones de Agua Marina para Desalinización, N° 35870-S-MINAET</u>	73
<u>7.2 Reglamento para la calidad de agua potable, Decreto Ejecutivo N° 38924-S</u>	74
<u>7.3 Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, Decreto N° 33601-S-MINAE</u>	74
<u>7.4 Trámites ante La Secretaría Técnica Nacional, SETENA</u>	74
<u>7.5 Trámites ante el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, CFIA</u>	75
<u>7.6 Especificación técnica para desalinización y potabilización de agua marina, AyA</u>	75
<u>8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	76
<u>9 REFERENCIAS</u>	79

Abreviaturas

AC	Acetato de Celulosa
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
ED	Electrodiálisis
EDR	Electrodiálisis Reversible
I+D	Investigación y Desarrollo
MF	Microfiltración
NF	Nanofiltración
OI	Ósmosis Inversa
OMS	Organización Mundial de la Salud
RCAP	Reglamento para la Calidad del Agua Potable
SAID	Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo (AyA)
TFC	Thin Film Composite (membrana delgada multicapa)
UEN	Unidad Estratégica de Negocios (dependencia de SAID)
UF	Ultrafiltración
VA	Valor Alerta
VMA	Valor Máximo Admisible

1 ANTECEDENTES

Según el Memorando N° GG-2016-00507, de la Subgerencia General, se solicita a la Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo (SAID) y a la UEN Investigación y Desarrollo (I+D) lo siguiente: “*Identificar y evaluar tecnologías de desalinización, conforme a la demanda*”. Por esta razón y los intereses de AyA en conocer con mayor detalle las tecnologías para desalación existentes y sus implicaciones, es que se procede a realizar este informe.

Es importante indicar que este documento pretende ser una guía sobre el proceso de desalación de agua marina y no responde a un problema o situación específica. Es responsabilidad de las áreas involucradas en la concepción específica de un proyecto de este tipo el realizar todos los estudios y actividades complementarias necesarias para el correcto desarrollo del mismo.

2 GENERALIDADES DE LA DESALACIÓN

Debido al crecimiento poblacional y a la alta demanda existente sobre las fuentes de agua dulce, la desalación se ha convertido en una importante alternativa para el abastecimiento de agua en las regiones costeras. Mientras tres cuartas partes del planeta están cubiertas por agua, menos del 0.3% se considera una fuente de agua dulce renovable (AWWA, 2011).

Con el pasar del tiempo, se han reducido los costos involucrados en los procesos de desalación, lo cual ha propiciado el uso de estas tecnologías para el abastecimiento municipal de agua. La capacidad de desalinización a nivel mundial se ha duplicó entre los años 2002 y 2010 (AWWA, 2011).

En los Estados Unidos, muchas de las plantas desaladoras existentes se utilizan de manera intermitente, debido a los altos costos de operación o a problemas que se han experimentado en su operación. Debido a lo anterior, los municipios han optado por considerar la implementación de sistemas de potabilización más grandes en los que se asegure que la construcción y operación de los sistemas sean eficientes sin impactar de manera negativa los frágiles ambientes marinos. Ejemplos de sistemas de este tipo se han desarrollado eficientemente en países como Australia, Singapur y España.

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 aguas adecuadas para el consumo humano, agua apta para uso industrial o agrícola (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Los procesos de desalación pueden dividirse en dos categorías principales: separación por membranas y evaporación térmica (destilación). Los procesos de desalación por membranas, típicamente requieren de presión mecánica, potencial eléctrico o un gradiente de concentración como la fuerza motora a través de una barrera semi-permeable (membrana) para lograr la separación física requerida. Los procesos térmicos para desalación, emplean calor para evaporar el agua de una solución salada para luego condensar y recuperar el vapor de agua (AWWA, 2011).

Las membranas de ósmosis inversa se desarrollaron en los inicios de los años 1960s, antes de esa fecha las tecnologías térmicas eran la única opción disponible para la desalación de agua de mar. Desde entonces, se ha mejorado el desarrollo de las membranas de ósmosis inversa (OI) y la eficiencia de las mismas ha mejorado mucho, al punto que se ha convertido en la tecnología más utilizada en la mayoría de las aplicaciones de desalación de agua de mar. El Oriente Medio es una excepción a esta regla, donde los bajos costos de la energía han permitido que la desalación térmica se mantenga relativamente competitiva.

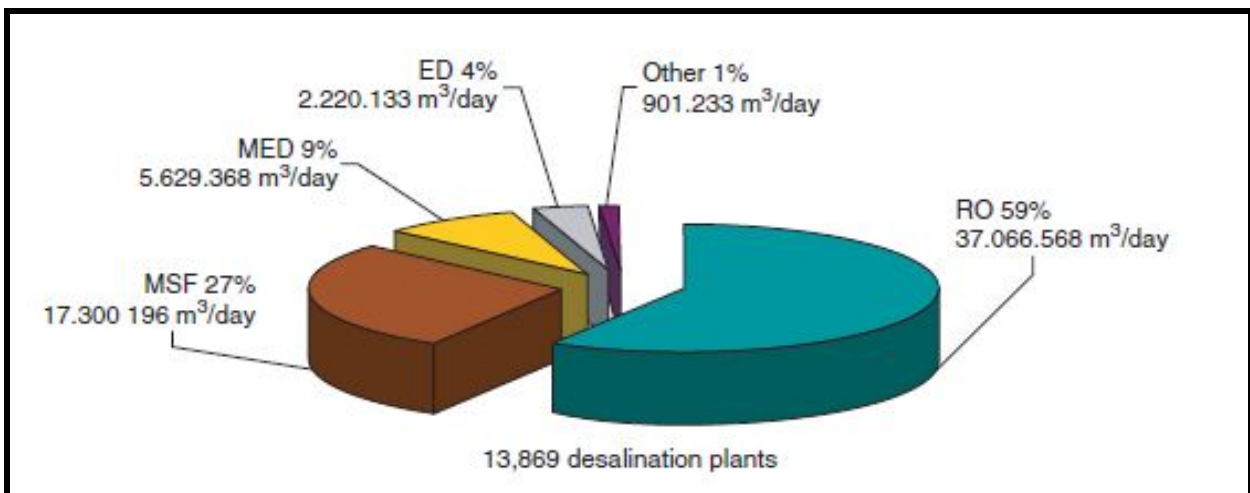
Existen algunas nuevas tecnologías que se encuentran activamente en investigación y desarrollo o están cerca de empezar a comercializarse.

Es importante prestar especial interés en las etapas de pretratamiento y postratamiento del agua desalada, en las que es preciso tratar el agua mediante procesos fisicoquímicos para modificar sus características y composición; lo anterior con el fin de adecuarla al proceso de desalación seleccionado o para su potabilización y distribución como agua para consumo.

La selección de la tecnología apropiada debe realizarse considerando varios factores. Las condiciones de sitio específicas como los costos de energía y de mano de obra, terreno disponible, costo y disponibilidad de la energía eléctrica, impacto del tratamiento y la disposición del concentrado, la salinidad del agua de alimentación y la calidad del agua desalada, son factores que afectan la selección de la tecnología.

Como puede observarse en la Figura 2.1, los procesos de desalación por ósmosis inversa (OI) y por evaporación instantánea multietapa (MSF) en conjunto y en la actualidad comprenden más del 85% de toda la capacidad instalada para desalación en el mundo (CRC Press, 2010).

Figura 2.1. Distribución de las tecnologías para desalación por capacidad instalada total (CRC Press, 2010)



2.1 Captación y fuente de las aguas destinadas a la desalación

La desalación se practica tanto para aguas salobres como para aguas de mar. Se pueden considerar las siguientes fuentes para la producción de agua desalada:

- Agua de mar
- Aguas continentales con exceso de algunos iones
- Aguas salobres
- Aguas procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales urbanas o industriales

2.1.1 Captación del agua

Se encuentra en la bibliografía dos procedimientos básicos de captación:

1. Captación cerrada. Incluye pozos profundos, pozos playeros, drenes horizontales, entre otras.
2. Captación abierta. Incluye la captación superficial, torres sumergidas, entre otras.

En el Cuadro 2.1, se resumen las características básicas de ambos procedimientos de captación (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Cuadro 2.1. Tipo de captaciones para desalación.

Captación cerrada	Captación abierta
Agua limpia como consecuencia de la acción filtrante del terreno	Contenido en sólidos en suspensión importante y variable
Mínima actividad orgánica o biológica	Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica
Baja concentración de oxígeno disuelto	Mayor exposición a la contaminación
Temperaturas estables	Importante concentración de oxígeno disuelto
Posible presencia de importantes concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio	Composición química muy variable

Cuadro 2.1 (continuación). Tipo de captaciones para desalación.

Captación cerrada	Captación abierta
Posible contaminación por nitratos y plaguicidas	Posible presencia de gran variedad de contaminantes
Composición química bastante estable aunque sujeta a variaciones temporales o estacionales por contacto con otros acuíferos	Temperaturas más variables

La captación de agua salada, es una obra sumamente importante y compleja de los procesos de desalación. La ubicación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de la misma debe involucrar la participación de distintas disciplinas de la ingeniería y disciplinas relacionadas con el medio ambiente, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema potabilizador.

2.2 Tecnologías para desalación

Después de las etapas de pretratamiento, el agua es desalada mediante diversos procesos. Como se mencionó anteriormente, los sistemas más empleados en la actualidad se dividen en dos grupos:

- Desalación mediante membranas y
- Desalación por destilación o evaporación (térmicos)

La tecnología más utilizada es la desalación mediante membranas, específicamente utilizando la ósmosis inversa (OI).

2.2.1 Tecnologías por membranas

Este tipo de tecnología supone un paso adelante en la filtración convencional aplicada tradicionalmente en la potabilización del agua. Estas tecnologías se han concebido utilizando las cualidades de membranas semi-permeables para que selectivamente se permita o minimice el paso de ciertos iones. Tres fuerzas fundamentales pueden ser utilizadas en los sistemas de desalación por membranas: presión, potencial eléctrico y gradiente de concentración. Los procesos de ósmosis inversa y de nanofiltración utilizan el concepto de presión. El proceso de Electrodiálisis (ED) y de Electrodiálisis Reversible (EDR) son procesos que utilizan el potencial eléctrico.

Los procesos de desalación de agua de mar por membranas, utilizan normalmente la tecnología de ósmosis inversa. Aunque ED/EDR y la NF son tecnologías maduras que se pueden utilizar para desalar, la ED/EDR no es típicamente competitiva respecto a costos para desalación de agua de mar; y la NF no es considerada para desalar agua de mar para consumo humano (AWWA, 2011).

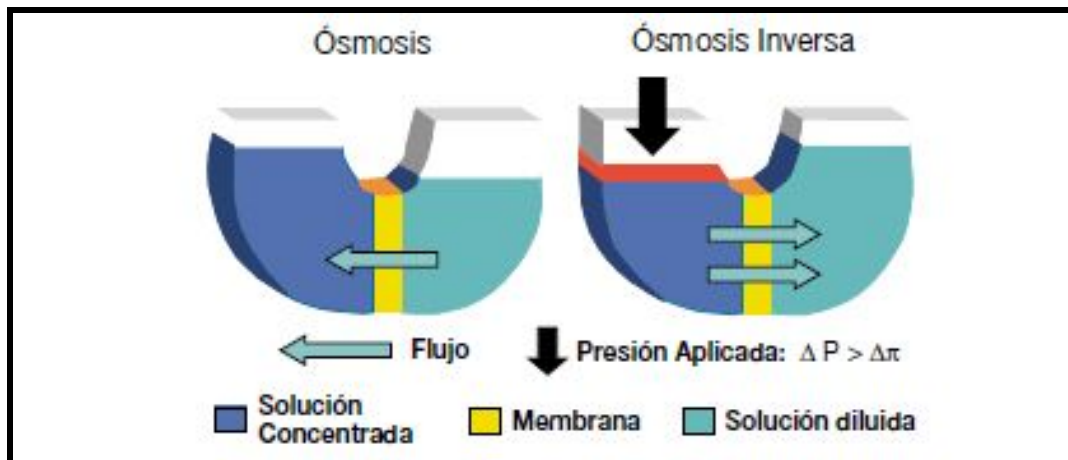
2.2.1.1 Ósmosis Inversa (OI)

La desalación por OI es una operación unitaria que actualmente representa la tecnología de punta para este tipo de aplicación (AWWA, 2011). Tiene la capacidad de rechazar una variedad importante de contaminantes, tiene un consumo energético menor y no produce impactos térmicos en la descarga de concentrados, en comparación con los procesos de desalación térmicos. Se han desarrollado mejoras importantes en las membranas y en los equipos recuperadores de energía que han mejorado la eficiencia del proceso y por ende reduciendo los costos asociados al tratamiento.

Para comprender el fenómeno de la ósmosis inversa, es necesario tener claro el concepto de ósmosis. Este último ocurre, cuando a través de una membrana semipermeable, el agua fluye desde la solución de menor concentración hasta otra con mayor concentración salina. Este sistema, intentará alcanzar un equilibrio, es decir, la misma concentración a ambos lados de la membrana y se detendrá cuando este equilibrio se alcance. La presión que provoca este flujo se conoce como presión osmótica y se relaciona directamente con la concentración de sales en ambas soluciones.

La ósmosis inversa consiste en invertir este proceso, aplicando una presión en el lado de la solución más concentrada que sea superior a la presión osmótica correspondiente; obteniéndose un flujo del agua de la solución más concentrada a la solución más diluida. En la Figura 2.2 se muestran ambos procesos.

Figura 2.2. Esquema de los fenómenos de ósmosis y ósmosis inversa (Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).



Las membranas de ósmosis inversa están diseñadas para retener sales y solutos de bajo peso molecular, permitiendo el paso del agua a través de la misma. Las membranas de Acetato de Celulosa (AC) utilizan una estructura asimétrica, mientras que las membranas de multicapa delgada (Thin Film Composite, TFC por sus siglas en inglés) como su nombre lo indica contienen múltiples capas hechas de distintos materiales. En la configuración asimétrica, la membrana consiste de un mismo material con una capa densa superior y una capa porosa inferior. En contraste, las membranas TFC consisten de una capa densa y delgada de un material sobre un soporte poroso de otro material.

Actualmente, existe una variedad importante de membranas modificadas y mejoradas de AC, disponibles en la industria de la desalación; estas membranas raramente se utilizan en desaladoras grandes. Las membranas de AC pueden tolerar una exposición continua a bajas concentraciones de cloro (0.1 a 0.5 mg/l a 25°C), lo que representa una ventaja para el control del atascamiento biológico en aplicaciones de desalación de agua de mar. Sin embargo, son susceptible a hidrolizarse, lo que compromete el desempeño de la membrana al rechazo de sales. La hidrólisis de la membranas de AC se acelera si el pH de operación es menor a 4 o superior a 7 y a temperaturas superiores a los 30°C (AWWA, 2011).

El desarrollo de las membranas TFC mejoró el rechazo de sales y la producción de agua por unidad de área de membrana. Estas membranas se construyen combinando una capa delgada y densa de membrana con un material poroso que se coloca por debajo de la misma y que sirve de soporte estructural. Esta capa delgada, generalmente consiste de poliamida aromática y la capa inferior es típicamente polisulfona. La mayoría del rechazo de solutos ocurre en la membrana delgada no porosa, y su pequeño espesor puede significativamente reducir la presión requerida para pasar el

agua a través de ella en comparación con las membranas de AC. Las membranas TFC son estables en un rango amplio de pH (2-11) y puede resistir a temperaturas tan altas como los 45°C. Sin embargo, a diferencia de las membranas de AC, son susceptibles a la degradación por oxidantes fuertes como el cloro libre. Aunque la tasa de degradación de la membrana causada por el cloro libre es función del pH, los materiales de la membranas generalmente se deterioran al contacto con el cloro (muchas veces de forma catastrófica).

La cantidad de agua recuperada utilizando las membranas de OI para agua de mar, fluctúa entre 35% y 60%, y las membranas comerciales de este tipo generalmente rechazan entre el 99.5% al 99.8% de los sólidos disueltos (SDT) en el agua de entrada al sistema. Sin embargo, la remoción de algunos solutos como el boro, es muchas veces no tan buena como la que se requiere. El diseño de un sistema de ósmosis inversa para agua de mar (SWRO, "Sea Water Reverse Osmosis", siglas en inglés) dependerá en la calidad de agua de ingreso, las condiciones de operación del sistema y los requerimientos de calidad de agua tratada.

Debido a que los procesos de membranas se basan en una separación física, no requieren por ende, energía térmica para vaporizar el agua. Como resultado, el consumo de energía para los componentes del tratamiento del agua en una planta de SWRO, típicamente se encuentra en el rango de 2.6 a 5.3 kWh/m³. En comparación, la energía total utilizada para los procesos de desalación térmica varía entre los 2.6 a 10.6 kWh/m³, dependiendo de los procesos unitarios (AWWA, 2011).

Los equipos recuperadores de energía, están siendo muy utilizados en los sistemas SWRO. Estos aparatos, permiten recuperar entre el 25% hasta el 45% de la energía de utilizada inicialmente.

Uno de los retos más grandes para los procesos de desalación por membranas, es el atascamiento e incrustación de las membranas. El atascamiento, puede ocurrir como resultado de un inadecuado pretratamiento o inadecuadas medidas para la reducción de materia particulada, coloidal u orgánica a niveles tolerables; o por el crecimiento biológico en los recipientes presurizados de las membranas. El incrustamiento resulta de la precipitación de sales poco solubles en el sistema y tiende a ser una preocupación menor en los sistemas de desalación de agua de mar que en los sistemas de agua salobre, lo cuales tienen mayores recuperaciones. Los compuestos como el carbonato de calcio, sulfato de calcio, silicatos, sulfato de bario y sulfato de estroncio presentes en el agua de entrada al sistema, pueden sin embargo, contribuir a limitar la recuperación de los procesos de OI. Ácidos o inhibidores de incrustación (antiincrustantes), pueden adicionarse para reducir la alcalinidad y prevenir la formación de incrustaciones, permitiendo mejorar la recuperación del sistema.

Debido a los altos niveles de sólidos particulados y el estado generalmente aeróbico del agua de mar, las plantas de SWRO requieren de un muy estudiado pretratamiento y acondicionamiento químico del agua de ingreso para poder lograr una operación exitosa del sistema.

2.2.1.2 Nanofiltración (NF)

La nanofiltración se utiliza típicamente para remover la dureza del agua y remover los precursores de los subproductos de la desinfección, como lo es la materia orgánica disuelta. La NF no se usa típicamente para la desalación de agua de mar, aunque algunas configuraciones con dos pasos de NF se han utilizado de manera efectiva para desalar agua de mar.

El proceso de NF utiliza membranas semipermeables y presión hidráulica. Este proceso remueve un alto porcentaje (90% a 98%) de iones divalentes pero la remoción de iones monovalentes es limitada (típicamente de 60% a 85%) (AWWA, 2011).

2.2.1.3 Electrodiálisis (ED) y Electrodiálisis Reversible (EDR)

Es un proceso electroquímico empleado para la desalación de aguas con alto contenido en sales disueltas. Mediante la aplicación de un campo eléctrico se promueve la transferencia de los iones disueltos desde el agua de ingreso o aportación, a otra solución donde se concentran. Lo anterior, mediante el uso de membranas selectivas al paso de cationes o aniones. Se obtiene entonces, un agua producto con una concentración de sales menor que el agua de alimentación y un residuo o rechazo, la salmuera, con una elevada concentración de sales. Las dos corrientes de agua se transportan en paralelo entre las membranas, el agua producto se desala progresivamente, mientras que la salmuera se va concentrando también progresivamente.

Este sistema funciona con un sistema de cátodo y ánodo. Los cationes del agua a tratar atraviesan la membrana catiónica atraídos por el cátodo y pasando a continuación a formar parte de la salmuera. De igual manera, los aniones del agua de alimentación, atraviesan la membrana aniónica atraídos por el ánodo, pasando después a la salmuera. Por estas razones, en el proceso de electrodiálisis sólo se mueven a través de las membranas los sólidos disueltos pero no el solvente (agua).

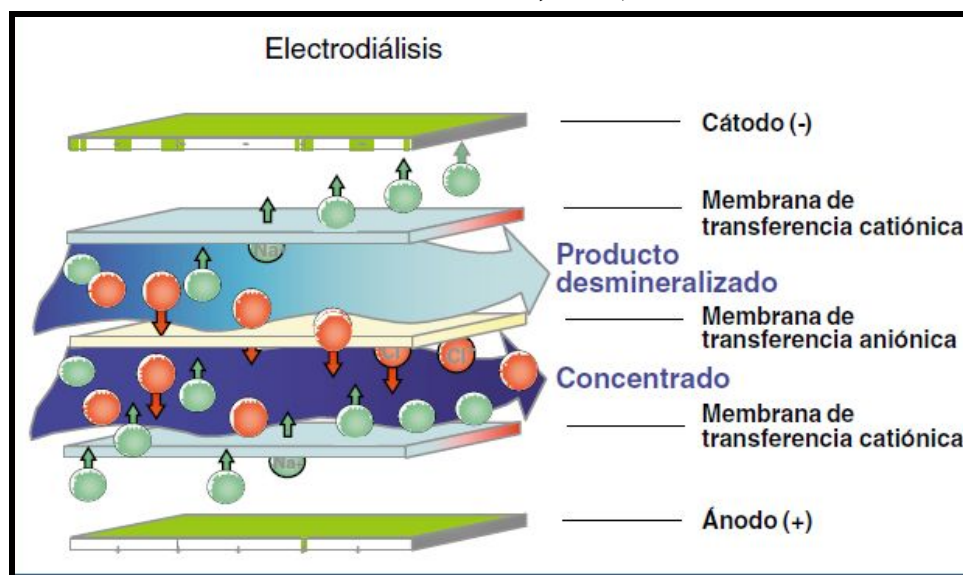
El sentido y la tasa del transporte de cada ion, depende de su carga y su movilidad, de la conductividad de la solución, de las concentraciones relativas, de la intensidad del campo eléctrico aplicado y está estrechamente relacionado con las características de la membrana de intercambio iónico. La capacidad de eliminación puede aumentarse

mediante la unión en serie de varias pilas, aunque no es competitiva frente a la OI en la desalación de aguas de mar (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Una fracción de la salmuera, puede ser recirculada para reducir la cantidad de agua desechada. Esta práctica aumenta mucho la concentración del rechazo por lo que podría requerirse la adición de ácido u otros reactivos como los antiincrustantes al bucle de la salmuera para evitar la deposición de sales sobre las membranas.

En la siguiente figura se presenta un esquema básico del proceso de electrodiálisis.

Figura 2.3. Esquema del proceso de electrodiálisis (Fuente: Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).



La eficiencia de un sistema de electrodiálisis se mejora mediante el cambio periódico de la polaridad de los electrodos (de 2 a 4 veces por hora). Con esta operación, se consigue invertir la dirección de los iones a través de las membranas y prevenir las incrustaciones disolviendo las posibles precipitaciones y enviándolas al desecho; reduciendo la formación de fangos o similares sobre la superficie de la membrana. Con lo anterior, también se reduce el requerimiento de dosificación continua de productos químicos y genera la limpieza automática de los electrodos con el ácido formado durante la operación anódica. Después de un cambio de polaridad, la corriente de producto se convierte en corriente de salmuera y viceversa. A este proceso se le conoce como electrodiálisis reversible (EDR).

Los procesos de ED/EDR son generalmente menos eficientes que otras tecnologías de desalación por membranas. Adicionalmente, las bacterias, los solutos no iónicos y la turbiedad residual no son afectadas por este proceso y por lo tanto, permanecen en el

agua de producto, requiriendo tratamientos adicionales para el cumplimiento de los requerimientos de calidad de agua potable (AWWA, 2011).

2.2.2 Evaporación térmica o destilación

Los procesos de destilación han venido cayendo en desuso, debido a los altos costos tanto de inversión como de consumo energético, y por lo tanto de explotación. La utilización de esta tecnología está restringida a ciertas aplicaciones de uso industrial, para producir agua destilada necesaria en algunos procesos (p ej. agua para calderas) o en países con abundantes recursos energéticos (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

En estas plantas, al producirse agua de calidad destilada, se necesita de un postratamiento completo para el aporte de dureza, alcalinidad y sales al agua producto, antes de ser distribuida a la población.

2.2.2.1 Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa (MSF, Multistage Flash Distillation)

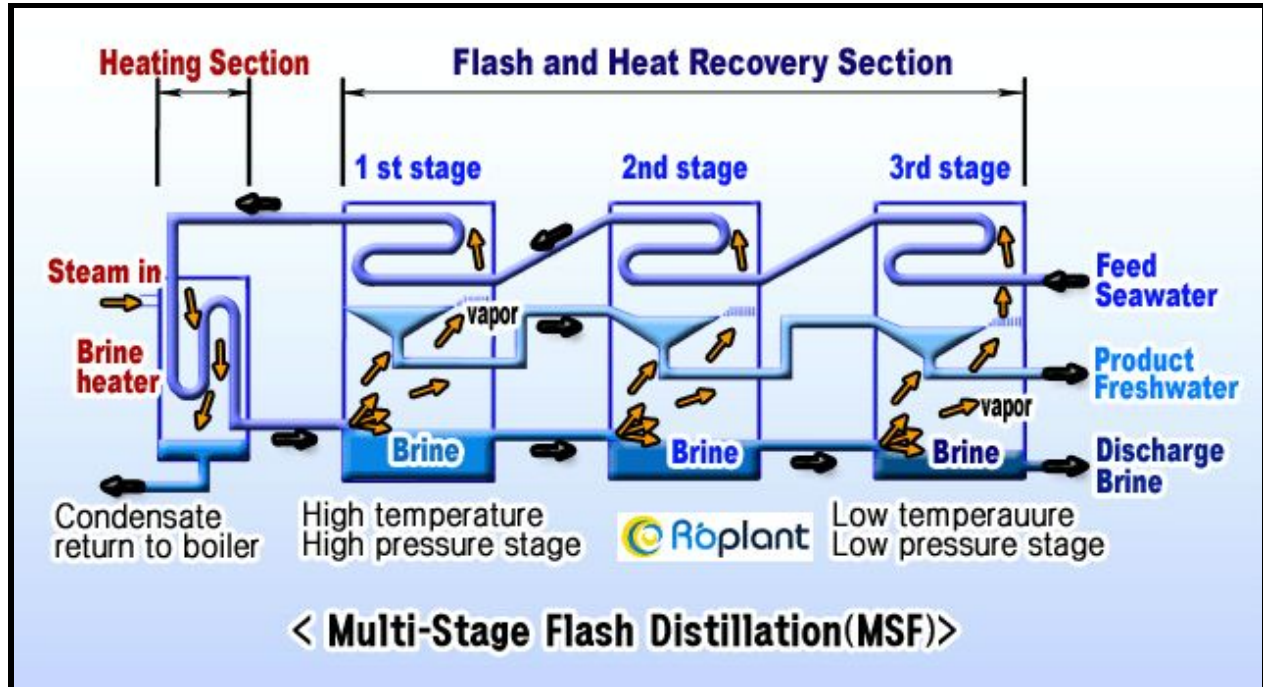
El objeto de este proceso es el de destilar agua de mar y condensar el vapor obtenido, recuperando el calor latente para calentar más agua de mar, que posteriormente también se irá evaporando. Si la transmisión de calor fuese con área infinita, e infinito número de etapas y no hubiese pérdidas, una vez iniciado el proceso, no habría que aportar más calor y el proceso se mantendría por sí mismo. Como en la realidad esto no es así, hay que disponer de una fuente de energía, que suministre el incremento en temperatura necesario para iniciar y mantener el ciclo (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

En este proceso el agua se calienta en una serie de etapas, cada una a temperaturas y presiones inferiores de manera sucesiva. Típicamente, estos sistemas contienen entre 15 a 25 etapas. Mientras el agua entra por cada una de las etapas, a través de una boquilla reductora de presión, una porción del agua se convierte en vapor de manera instantánea. Este vapor de agua, luego se condensa en el exterior de los tubos del condensador y se recoge en bandejas. Mientras el vapor se condensa, el calor latente se utiliza para precalentar el agua de mar que será enviada al calentador principal, donde recibirá calor adicional antes de ser introducida a la primera etapa de evaporación. El condensado recolectado en cada una de las etapas forma el producto, y el proceso completo se lleva a cabo mediante un gradiente sub atmosférico de presión a través de las etapas.

La evaporación de una fracción pequeña del agua de alimentación continúa en cada una de las etapas siguientes, a menor presión. Este proceso genera y condensa vapores en la misma etapa. La recuperación para procesos de destilación MSF convencionales está limitado a aproximadamente 10% a 30% para desalación de agua de mar.

En la Figura 2.4, se presenta una imagen del proceso de MSF.

Figura 2.4. Proceso de MSF (Fuente: www.roplant.org).



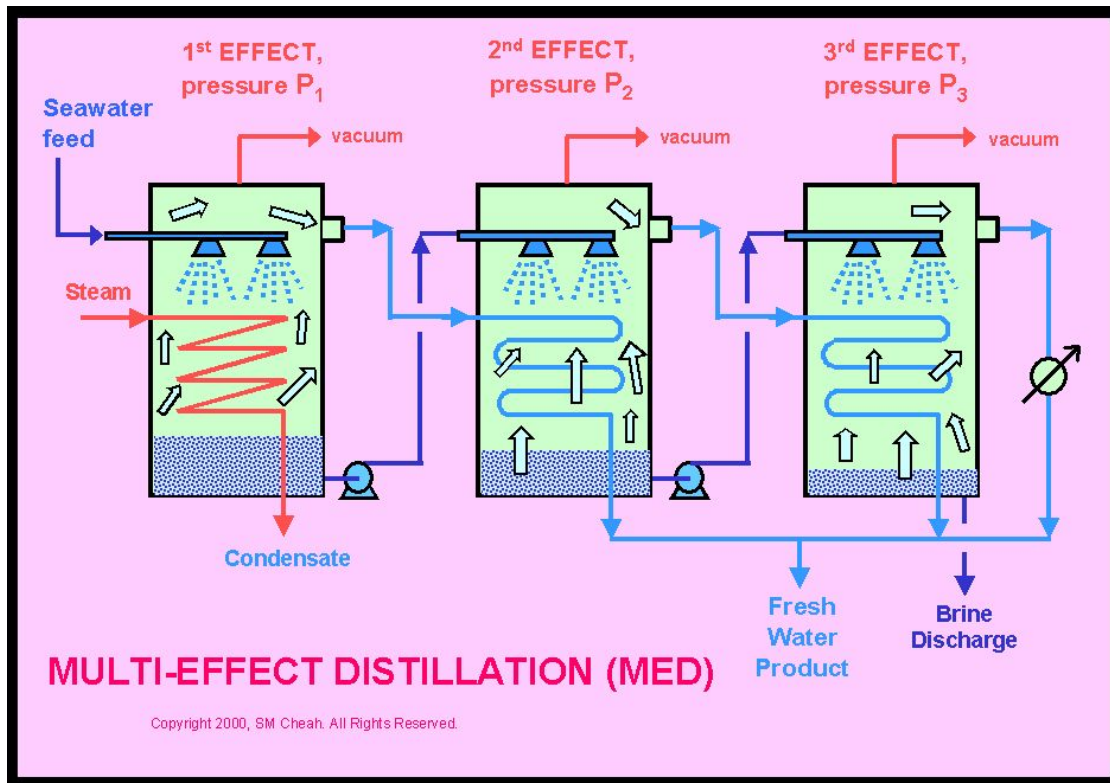
2.2.2.2 Proceso de Evaporación Multifecto (MED, Multiple Effect Distillation)

Este proceso, al igual que el MSF, utiliza múltiples recipientes o “efectos” en un arreglo en serie con presiones inferiores en cada etapa sucesiva. Típicamente se utilizan de 8 a 16 efectos en MED, con el fin de minimizar el consumo energético. El agua de alimentación, se distribuye en el exterior de los tubos del evaporador en una película muy delgada, con el fin de promover una rápida evaporación. El vapor se condensa en la superficie interior de los tubos. El vapor que se produce por evaporación es condensado de una manera en la que utiliza el calor de vaporización para calentar la solución salina restante a una temperatura y presión menor en cada una de los efectos siguientes; de esta manera se permite que el agua pueda hervirse de manera múltiple sin tener que adicionar más energía o calor después del primer efecto. Por ende, el vapor producido en cada efecto, es utilizado para calentar el agua de alimentación en el siguiente efecto. Lo anterior, no sólo reduce la energía requerida

para la destilación pero también el consumo de corriente eléctrica total. Como resultado, los costos de energía, para operar una planta MED son menores de los necesarios para MSF.

En la Figura 2.5 se presenta un esquema del proceso MED.

Figura 2.5. Proceso de MED



El vapor generado en el último efecto está típicamente a una presión y temperatura muy baja para ser utilizado nuevamente.

Los requerimientos de energía en un sistema MED se detallan a continuación (AWWA, 2011):

1. para la creación de vapor a suficiente presión para promover la evaporación en la primer etapa
2. para generar la energía que requieren los sistemas de vacío, que reducen la presión de ebullición en los efectos consecutivos
3. para bombear agua afluyente a través de los intercambiadores de calor hacia el evaporador, para recircular el concentrado dentro de cada etapa de evaporación y para bombear el condensado y concentrado a través del recuperador de calor antes de salir del sistema

4. para enfriamiento del agua para condensar el vapor de la última etapa

El rango de recuperaciones para sistemas MED convencionales, está limitado a aproximadamente 20% a 35% para desalación de agua de mar.

2.2.2.3 Proceso de Compresión de Vapor

En un sistema de desalación por compresión de vapor, existen tres secciones importantes: un compresor o un eyector, un evaporador que puede ser de una o varias etapas y un intercambiador de calor líquido/líquido (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

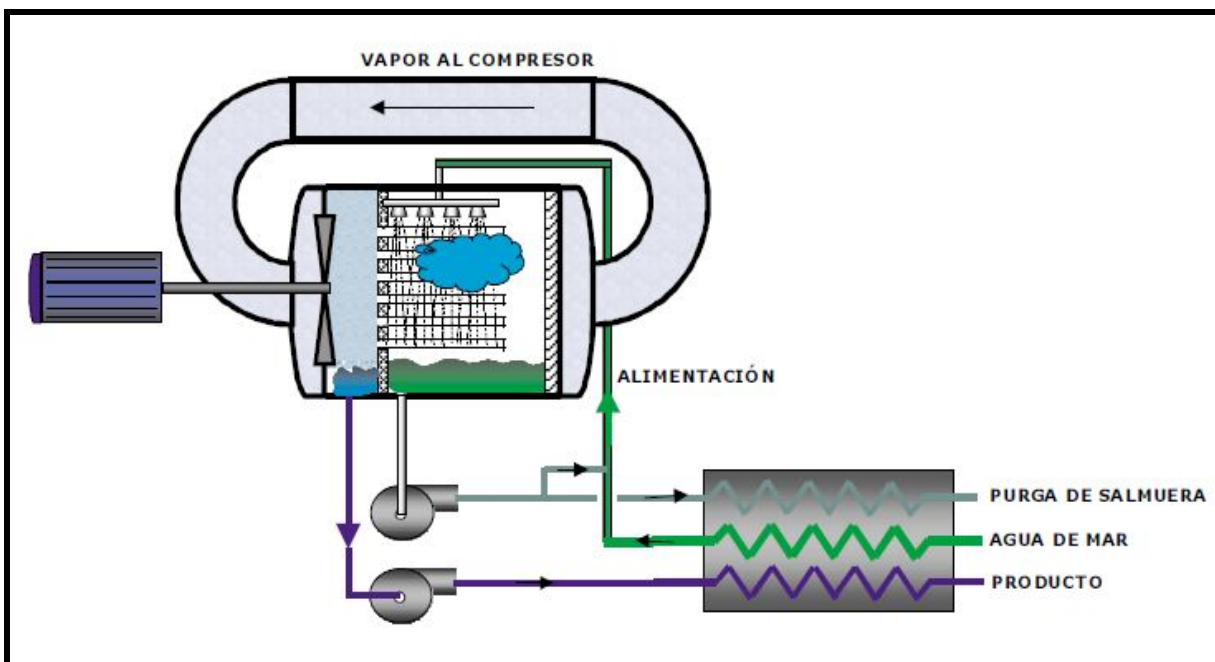
El agua de mar se hace pasar por un intercambiador de calor, donde se calienta; adicionalmente se mezcla con una parte de la salmuera y forma lo que se denomina agua de alimentación. Esta agua es bombeada al interior de un evaporador y rociada sobre los tubos del condensador. Esta alimentación es calentada hasta alcanzar la temperatura de saturación correspondiente a la presión existente en el interior del evaporador. Al seguir absorbiendo calor, una parte se evapora.

El vapor que se forma, pasa a través de unas mallas separadoras de gotas (*demisters*), entra al compresor donde se comprime y se convierte en un vapor recalentado; para luego ser introducido en el interior de los tubos del evaporador, donde pierde su calor y después se condensa, cediendo el calor al agua de alimentación que está cayendo por el exterior de los tubos.

El agua producida (producto) es extraída mediante una bomba y dado que aún lleva calor es enfriada en el intercambiador de placas, calentando el agua de mar que se incorpora al ciclo.

En Figura 2.6, se muestra un ciclo de proceso del Proceso de Compresión de Vapor. El agua que no se evapora, se concentra y forma la salmuera, que cae al fondo del evaporador. Este concentrado se extrae mediante una bomba y el flujo se divide en dos corrientes, una que se mezcla con el agua de mar para formar la alimentación y la otra, denominada purga, la cual es necesaria para mantener el equilibrio salino. Esta última, es enfriada en el intercambiador de placas donde cede su calor al agua de mar que va para el evaporador.

Figura 2.6. Proceso de compresión de vapor (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009)



El agua de mar antes de iniciar el proceso mencionado, es tratada químicamente, para evitar las incrustaciones y corrosiones. Adicionalmente, el sistema cuenta con un equipo de vacío para extraer los gases que no se condensan en el interior del evaporador.

El proceso descrito, se denomina Compresión Mecánica de Vapor; al sustituir el compresor por un eyector que funcione con vapor, se obtiene lo que se conoce como Eyecto-Compresión de Vapor.

2.2.3 Tecnologías Novedosas en Desarrollo

2.2.3.1 Ósmosis Forzada (OF)

Esta tecnología utiliza al igual que la OI y la NF, una membrana semipermeable para separar el agua de una solución salada. Sin embargo, en lugar de utilizar una presión hidráulica externa para crear la fuerza necesaria para transportar el agua a través de la membrana, el proceso de OF emplea el gradiente de presión natural que provee una solución con mayor salinidad (como el carbonato de amonio o nanopartículas magnéticas preparadas especialmente con este fin). La mayor presión osmótica de la solución de extracción (con mayor salinidad), provoca que el agua se mueva hacia ella a través de la membrana. El agua dulce se separa luego de la solución más salada,

utilizando un proceso de separación adicional, el cual varía, dependiendo del soluto de la solución preparada o de extracción. Los solutos separados, son recuperados y reusados en el proceso de OF o descartados.

Las fuerzas osmóticas generadas en la OF pueden llegar a ser significativamente mayores que las fuerzas hidráulicas utilizadas en la OI. El uso de una conveniente solución de extracción con fuerzas de empuje por presión osmótica muy altas, puede utilizarse para generar altos flujos de agua y recuperaciones. El proceso de OF, una vez desarrollado completamente y comercializado adecuadamente, se espera que tenga ventajas potenciales en términos de menor potencial a atascamiento (“fouling”), menor consumo energético y más simple.

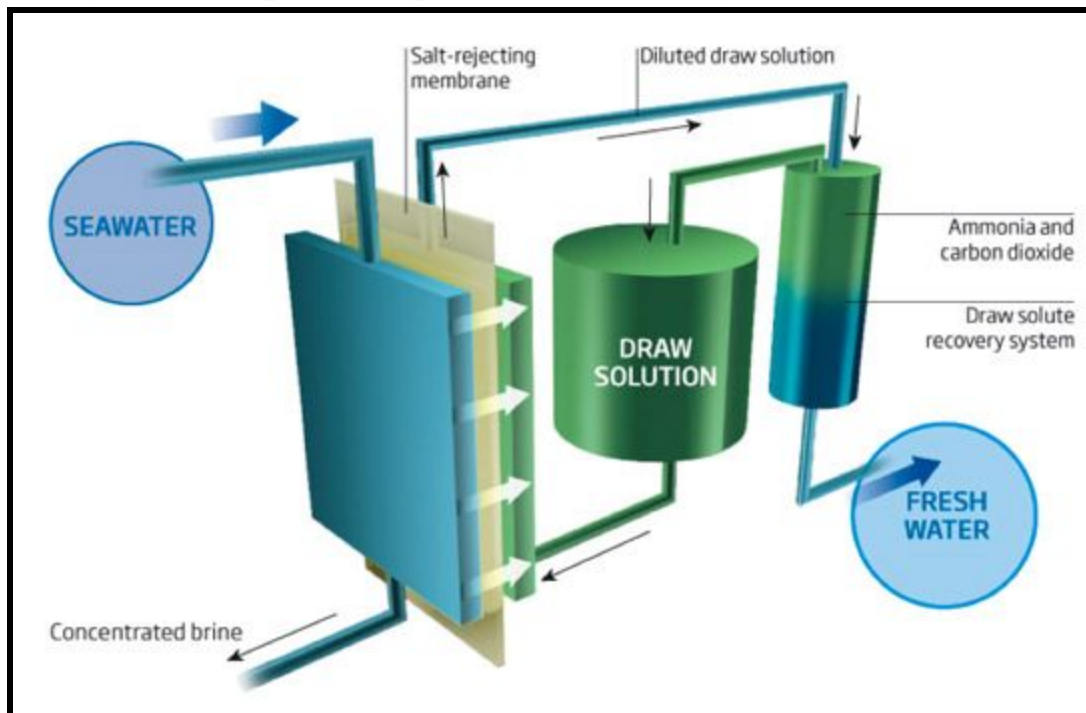
Dos de los retos más importantes de la OF, son: la identificación de solución de extracción y el desarrollo de membranas eficientes. Un soluto para ser utilizado en la FO en la solución preparada, debe poseer las siguientes características (AWWA, 2011):

1. alta eficiencia osmótica; esto significa que debe ser altamente soluble en agua y debe tener un peso molecular bajo, esto con el fin de generar una presión osmótica alta
2. no tóxico, lo anterior pues cantidades en el orden de trazas pueden estar presentes en el agua producto
3. Compatibilidad química con la membrana
4. Fácilmente separable del agua recuperada y económicamente viable.

Las membranas comerciales de OI, no son aptas para poder ser utilizadas en los procesos de OF; lo anterior debido al relativamente bajo flujo de agua producto. Este bajo flujo de agua se debe principalmente a la polarización interna de la concentración en la capa porosa de soporte de la membrana, lo cual altera la fuerza efectiva de empuje a través de la capa activa de la membrana, limitando el flujo de agua. Una de las tareas más importantes para investigación futura, es el desarrollo de una membrana semipermeable de OF, que posea un alto rechazo a las sales y una polarización de la concentración interna mínima que pueda producir flujos de agua mayores (AWWA, 2011).

En la Figura 2.7 se presenta un esquema del proceso de OF. Esta tecnología está aún en desarrollo. En las pruebas realizadas a nivel de laboratorio en la Universidad de Yale, se ha utilizado una solución de extracción muy concentrada de carbonato de amonio; la cual se prepara mezclando los gases de amoníaco y de dióxido de carbono. Al calentarse (a aproximadamente 60 °C), el carbonato de amonio se descompone como los gases de amoníaco y dióxido de carbono; dejando atrás el agua desalada.

Figura 2.7. Esquema del proceso de OF (www.greentechmedia.com).



2.2.3.2 Destilación por membrana

Es un proceso híbrido que utiliza los principios de la separación por membranas y la destilación térmica. Involucra la evaporación del agua de una solución salina y el transporte del vapor de agua a través de los poros de una membrana hidrofóbica. La membrana permite el paso del vapor de agua pero previene el paso de la solución. El vapor de agua se transporta a través de la membrana en respuesta a un cambio en la presión parcial a través de la membrana, debido a un gradiente térmico. El vapor limpio, se condensa como agua pura en el recipiente de la membrana o en un sistema separado de condensación.

Esta tecnología difiere de las tecnologías de empuje a través de membranas, en que en lugar de aplicar una presión para forzar el líquido a través de la membrana, la fuerza de empuje para la desalación es la diferencia en las presiones de vapor del líquido a través de la membrana. Al incrementar la temperatura del líquido se incrementa la presión de vapor y esto resulta en un incremento en la tasa de penetración a la membrana. La eficiencia de estos sistemas depende de la calidad del agua de alimentación, el diseño del sistema y el calor recogido del permeado. Se ha reportado que la destilación por membrana ha funcionado a temperaturas relativamente bajas (70°C) y por ende puede utilizar calor de desecho de algún proceso o fuentes de calor de baja temperatura.

Entre las principales ventajas de utilizar la Destilación por Membranas, se encuentran las siguientes: habilidad de utilizar fuentes de energía de baja temperatura, requerimientos mínimos de pretratamiento y despreciable preocupación por incrustaciones o precipitaciones. Entre los retos, se puede mencionar: para eficiencia económica se requiere de una fuente de energía que sea de desecho (que ya no se use), taponamiento de la membrana y degradación de la membrana debido a la pérdida de la hidrofobicidad. Esta tecnología se encuentra actualmente en desarrollo.

2.2.3.3 Congelación/Descongelación

En este proceso, al igual que en la desalación térmica, el concepto fundamental para alcanzar la separación es un cambio de fase. En este caso el cambio de fase se realiza de líquido a sólido. Los cristales de hielo, excluye la sal de su estructura y esta es separada del hielo en forma de salmuera. Un aspecto clave de este proceso, es que el requerimiento energético para el cambio de fase de agua a hielo, es menor a 1/7 del requerimiento energético para el cambio de fase de agua a vapor (sin embargo, los procesos de desalación térmicos prácticos, como el MSF y el MED, utilizan mucha menos energía que el calor de evaporación; lo anterior al uso de múltiples efectos o etapas) (AWWA, 2011).

Los retos de la desalación por congelamiento, incluyen la implementación de lavados adecuados para la separación de los cristales sin un derretimiento prematuro y recontaminación con las sales excluidas.

2.2.3.4 Desionización capacitiva (Capacitive Deionization, CDI)

En los procesos de CDI, la solución con alta salinidad, fluye entre un par de electrodos y los iones son adsorbidos en la superficie porosa de los electrodos al aplicar un campo eléctrico de bajo voltaje, y por consiguiente produciendo agua desionizada. Los iones adsorbidos, se desorben de la superficie de los electrodos al eliminar el campo eléctrico, resultando en la regeneración de los electrodos. La eficiencia del proceso de CDI, es altamente dependiente en las propiedades de la superficie de los electrodos, como el área superficial y las propiedades adsorbentes.

Estos sistemas de CDI, presentan algunas ventajas: una construcción simple y requerimientos energéticos bajos. Sin embargo, los retos actuales incluyen: la limitada capacidad de adsorción de los electrodos, una lenta cinética de transporte de los iones dentro y fuera de los poros de los electrodos, costos relativamente altos de los módulos de CDI y el potencial de atascamiento (“fouling”) de la superficie de electrodo causada

por la materia orgánica natural. Esta tecnología se encuentra actualmente en desarrollo, con constantes ensayos de laboratorio y pilotos (AWWA, 2011).

2.2.3.5 Desalación Supercrítica (DSC)

Las condiciones supercríticas se alcanzan a temperaturas y presiones elevadas, en donde las formas líquidas y gaseosas del agua ambas existen simultáneamente y no son distinguibles entre sí. El agua supercrítica, es un solvente extremadamente malo de sales inorgánicas, permitiendo que las sales disueltas sean removidas por precipitación, produciendo un desecho sólido o muy cercano a ser sólido y un producto purificado. La pureza del producto depende de la presión y la temperatura del fluido supercrítico; sin embargo, la DSC, se ha propuesto como una etapa de pretratamiento para la OI en la desalación de agua de mar, en donde DSC produce agua con niveles de SDT cercanos a los 3500 mg/l utilizando una presión de 3200 psi y una temperatura de aproximadamente 350°C. Luego de esta etapa, se pueden utilizar membranas de OI para agua salobre para continuar con el proceso de desalación, con los requerimientos teóricos de energía comparables con los obtenidos en la desalación de agua de mar por OI, pero con recuperaciones mayores, en el orden de 70% a 80%.

Estas tecnologías, se encuentran todavía en desarrollo y no se han probado fuera de un laboratorio; sin embargo, estas tecnologías pueden tener un rol muy importante en las futuras aplicaciones de desalación, al ofrecer oportunidades únicas que actualmente no se encuentran disponibles con las tecnologías a base de membranas o de evaporación.

3 CALIDAD DEL AGUA

3.1 Calidad del agua de mar

Los componentes del agua de mar están divididos en componentes mayoritarios (los cuales están presentes en cantidades mayores a 1 mg/L) y presentan las mismas proporciones en todos los océanos del mundo independientemente del contenido total de sal (ver Cuadro 3.1) y en los componentes minoritarios (los cuales están presentes en cantidades inferiores a 1 mg/L) y pueden variar de acuerdo con la localidad, profundidad o perturbaciones externas.

Cuadro 3.1. Concentración de los componentes mayoritarios en el agua de mar (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Parámetro	Concentración
Temperatura, °C	15 - 35
pH	7.9 – 8.1
Sales disueltas, mg/L	30 000 – 45 000
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$ (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

Cuadro 3.1 (continuación). Concentración de los componentes mayoritarios en el agua de mar (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

Parámetro	Concentración
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

Como puede observarse del cuadro anterior, las extremadamente altas concentraciones de minerales disueltos, muchos de los cuales se encuentran en órdenes de magnitud superiores que los valores que se encuentran normalmente en fuentes de agua dulce, demuestran el reto que existe al tratar agua de mar para uso potable.

La turbiedad del agua de mar puede consistir de sedimentos en suspensión proveniente de fuentes superficiales o del suelo o lecho marino, del fitoplancton, larvas marinas y otras especies orgánicas. Similar a la variabilidad existente en la turbidez, la concentración de carbono orgánico total (COT) puede variar con eventos como tormentas, corrientes marinas y floraciones periódicas de algas. La turbiedad, COT y otros parámetros biológicos pueden presentar un reto significativo para la desalación de agua de mar, requiriendo procesos de pretratamiento optimizados o el uso de tomas subsuperficiales, para proveer calidad de agua aceptable para los procesos de desalación.

3.1.1 Turbiedad

Es la medición de la dispersión de la luz incidente causada por la materia particulada en el agua. Las mediciones altas de turbiedad son indicativos de mayores cantidades de sólidos suspendidos, y por ende la posibilidad de causar más rápidamente el atascamiento de la membrana. Por esta razón, al agua con alto contenido en turbiedad, es usualmente filtrada a flujos bajos para minimizar el atascamiento y el consecuente retrolavado y uso de químicos para limpieza. En general, si la turbiedad del agua excede de 1 UNT, algún tipo de pretratamiento debe considerarse.

3.1.2 Carbono Orgánico

Típicamente se expresa en términos de carbono orgánico total (COT) o disuelto (COD). El carbono orgánico en el agua a tratar puede contribuir al atascamiento de las membranas, a través de la adsorción de la fracción disuelta en el material de la membrana o por obstrucción por la fracción particulada. La tendencia de una membrana a ser afectada por el COT es parcialmente influenciada por la naturaleza de la materia orgánica en el agua. El COT puede ser caracterizado como hidrofílico o hidrofóbico; los estudios sugieren que la fracción hidrofóbica contribuye de manera más significativa al atascamiento de la membrana. Las características del contenido de carbono orgánico, pueden ser bruscamente cuantificadas midiendo la absorbancia específica de la luz ultravioleta (SUVA) del agua, utilizando la Ecuación 1:

$$SUVA = \frac{UV_{254}}{COD}, \quad (1)$$

donde:

SUVA : absorbancia específica de la luz ultravioleta (L/mg – m)

UV₂₅₄ : absorbancia específica de la luz ultravioleta a 254 nm (cm – 1)

DOC : Carbono orgánico disuelto (mg/L)

Valores altos de SUVA, indican una mayor fracción de materia orgánica hidrofóbica, sugiriendo un mayor potencial de atascamiento. Generalmente, valores de SUVA que excedan 4 L/mg-m son considerados de alguna manera más difíciles de tratar. De todas maneras, el carbono orgánico (al igual que la turbiedad) puede usualmente ser removido efectivamente vía coagulación y sedimentación, minimizando el potencial de atascamiento y facilitando la operación a mayores flujos.

3.1.3 Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos totales (TDS) y las especies particulares de sólidos disueltos son consideraciones críticas para los sistemas de RO. Especies como el sílice, calcio, bario y estroncio, pueden precipitar como sales poco solubles causando incrustaciones y una rápida disminución del flujo. Las incrustaciones, son típicamente controladas utilizando químicos de pretratamiento como un ácido, para bajar el pH o un inhibidor de incrustaciones. Sin embargo, la cantidad total de sólidos disueltos también influencia la operación del sistema, debido a que la presión requerida para alcanzar un flujo específico está relacionada con la presión osmótica del sistema, la cual es directamente proporcional a TDS.

3.1.4 Temperatura

A bajas temperaturas, el agua incrementa su viscosidad, reduciendo el flujo a través de la membrana o aumentando la presión requerida para un mismo flujo.

3.1.5 Agua corrosiva

El agua desalinizada es inicialmente más corrosiva que muchas otras fuentes de agua potable, el agua se debe estabilizar mediante postratamientos para minimizar su efecto corrosivo sobre las tuberías y accesorios utilizados en los sistemas de distribución y de fontanería en edificios (ver Apartado 4.4).

El Índice de Langelier es un índice para calcular el carácter incrustante o corrosivo del agua y tiene que ver con los diversos equilibrios en el agua del dióxido de carbono, bicarbonato-carbonatos, el pH, la temperatura, la concentración de calcio y la salinidad total.

Mediante la Ecuación 2 se calcula el Índice de Langelier (IL):

$$IL = pH + TF + CF + AF - 12.1 \quad (2)$$

donde:

IL: Índice de Langelier

pH: concentración de iones hidrógeno $[H]^+$

TF: factor correspondiente a la temperatura

HF: factor correspondiente a la dureza de calcio

AF: factor correspondiente a la alcalinidad

12.5: constante correspondiente a los Sólidos Totales Disueltos

Los factores de la ecuación anterior se obtienen mediante tablas luego de medir la temperatura, la dureza de calcio y la alcalinidad en el agua. Posteriormente se debe valorar el resultado de la siguiente manera:

- Si el índice es 0: el agua está perfectamente equilibrada.
- Si el índice es negativo: indica que el agua es corrosiva.
- Si el índice es positivo: indica que el agua es incrustante.

Para aguas de consumo humano el índice de Langelier debería estar comprendido entre -0.5 y 0.5. Si el agua es incrustante se debe reducir el pH o la alcalinidad y si el agua es corrosiva se deben aumentar.

3.1.6 Boro

Otro de los problemas que presenta el agua desalinizada es la presencia de boro (componente mayoritario de agua de mar, ver Cuadro 3.1) el cual suele aparecer en forma de ácido bórico, sin carga iónica, y es muy difícil removerlo. Se debe tener precaución ya que según la OMS, el boro ha demostrado toxicidad para el aparato reproductor masculino en pruebas tanto breves como prolongadas es animales de laboratorio (OMS, 2013). El administrador del sistema de potabilización debe establecer los requerimientos en cuanto a concentración de esta sustancia en el agua tratada. Lo anterior, pues los requerimientos de remoción de boro afectan directamente el diseño del sistema de tratamiento.

En Costa Rica, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Ejecutivo 38924-S) no establece un Valor Alerta (VA) ni un valor Máximo Admisible (VMA) para este parámetro en el agua de consumo humano. Sin embargo, la OMS establece un valor de referencia para el boro de 0,5 mg/L el cual es provisional porque el valor de referencia calculado es menor que el que es posible alcanzar mediante métodos de tratamiento prácticos o medidas de protección de fuentes (OMS, 2013).

3.1.7 Bromo

Como se pudo observar en el Cuadro 3.1, los bromuros están presentes en el agua de mar en cantidades relativamente grandes, por lo que asimismo pueden estar presente en el agua desalinizada en concentraciones proporcionales a la concentración de cloruros, lo anterior, debido a que los mecanismos de eliminación son muy similares para estos aniones análogos (WHO, 2011).

Cuando ocurre la oxidación de los bromuros se da la formación de bromatos. Según la OMS los bromatos poseen capacidad cancerígena en animales de experimentación y han sido clasificado en el Grupo 2B (posiblemente cancerígeno para el ser humano). Es por lo anterior, que se debe tener especial cuidado si se desinfecta el agua utilizando ozonización ya que sin las condiciones lo permiten (en función de la concentración de iones bromuro, la dosis de ozono, el pH, la alcalinidad y el carbono orgánico disuelto) se produce la oxidación de los bromuros (OMS, 2013).

Mediante tratamiento, una vez formado el bromato, es difícil de eliminar, pero es posible reducir su concentración hasta menos de 0.01 mg/L mediante un control adecuado de las condiciones de la desinfección.

3.1.8 Toxinas producidas por algas

Las algas pueden ocasionar la presencia de toxinas que no son destruidas por calentamiento ya que son no volátiles. Sin embargo, pueden ser destruidas mediante cloración pero utilizando tiempos de contacto extremadamente largos. Una medida de control importante es detectar y ubicar este tipo de algas para así evitar extraer agua que las contenga (WHO, 2011).

3.2 Contaminación del agua de mar

Es fundamental determinar la calidad y los riesgos de contaminación presentes en la zona donde se va a extraer el agua de mar, ya que esto puede incidir en las operaciones y procesos para su desalación. La evaluación de los peligros y riesgos potenciales de los contaminantes requerirá una evaluación de las fuentes y tipos de contaminantes locales. Generalmente el medio marino se contamina con mayor facilidad por hidrocarburos, aguas residuales urbanas o ganaderas, metales pesados, compuestos organohalogenados o sustancias sólidas.

Luego de determinar las posibles contaminaciones se deben establecer los correspondientes pretratamientos (ver Apartado 4.1).

3.3 Aspectos de calidad de agua importantes para los sistemas de desalación por membranas

El agua es una solución de varias sales, las cuales determinan las características de la misma. Por esta razón es vital conocer la composición de la misma con el fin de poder someterla a un proceso de remoción o tratamiento, o desalinización a través de membranas. Esto pues:

1. No todas las membranas poseen el mismo nivel de rechazo a sales
2. Una misma membrana rechaza distintos iones en distintas formas
3. Existen iones específicos que poseen limitaciones al tratar de separarlos

Las sales en el agua se disocian en la forma de iones positivos y negativos. Los principales cationes presentes en el agua son: Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+) y Potasio (K^+). Los aniones más abundantes son: Cloruros (Cl^-), Sulfato (SO_4^-), Carbonato (CO_3^-) y Bicarbonato (HCO_3^-). En una menor cantidad se puede encontrar: hierro, manganeso, aluminio, nitratos, fosfatos, entre otros.

Las propiedades químicas del agua salada dependen de la concentración total y de una menor manera de la proporción relativa entre iones y cationes. Para propósitos de

la Ósmosis Inversa, esta última proporción es muy importante debido a la incidencia en la precipitación o incrustación de sales sobre la membrana.

La calidad del agua tiene un impacto significativo en el desempeño de los sistemas de ósmosis inversa, por esta razón, la calidad de agua cruda es una consideración primordial en el diseño de los sistemas de filtración por membrana. La mala calidad de agua requiere de flujos bajos, lo que implica un aumento en el área necesaria de la membrana y en el número requerido de módulos, aumentando el costo y el tamaño de los sistemas. Por consiguiente, el pretratamiento, puede muchas veces mejorar la calidad de agua a tratar a un costo menor a la adición de área de membranas.

Mejores calidad de agua, pueden permitir flujos mayores, reduciendo el área de las membranas, el tamaño del sistema y los costos de capital. Típicamente, los flujos se determinan a través de las prueba piloto; en el caso de la ausencia de esta etapa, es importante tener el conocimiento de parámetros críticos de calidad de agua como: índice de densidad de sedimentos (SDI, "Silk Density Index), turbiedad, carbón orgánico y sólidos disueltos; los cuales afectan el flujo de los sistemas, muchos de estos parámetros, ya fueron expuestos.

3.3.1 Índice de densidad de sedimentos (SDI)

Es una medición empírica, adimensional de la materia particulada en agua y es generalmente útil como un estimado grueso de la idoneidad de un agua para un tratamiento eficiente utilizando el proceso de ósmosis inversa. El procedimiento para la determinación del SDI se detalla en la norma ASTM D 4189-95: Standard Test Method for Silk Density Index (SDI) of Water.

En general, las mediciones de SDI son tomadas al filtrando una muestra de agua a través de un papel filtro de 0.45 μm con una presión de 30 psi. El tiempo requerido para recolectar dos filtrados separados de 500 mL es tomado. Estos resultados son introducidos en una fórmula para el cálculo del SDI.

Como una regla de dedo, módulos espirales de ósmosis inversa (RO) no son efectivos para tratar agua con un valor de SDI igual o superior a 5, pues esta calidad de agua contiene mucha materia particulada para las membranas semi-permeables y no porosas, las cuales se saturarán a una velocidad muy rápida e inadmisibles. Por esta razón, algún tipo de pretratamiento para remover materia particulada se requiere para valores de SDI que excedan 5.

3.4 Análisis de calidad de agua cruda

Uno de los aspectos más importantes para la correcta selección de las operaciones y procesos unitarios y el correcto dimensionamiento de los mismos en los sistemas de desalación, es la calidad del agua cruda que se pretende tratar.

3.4.1 Agua cruda

Antes del diseño y construcción de un sistema de tratamiento para desalar, deben estudiarse cuidadosamente las características del agua cruda que se captará, de forma tal que el pretratamiento se diseñe en base a esa información previa. En el siguiente cuadro se presentan los parámetros recomendados de calidad que se deberán muestrear u obtener para el agua cruda que ingresa al sistema de tratamiento. Es importante mencionar que estos valores se dan como una guía y pueden variar según lo que indique el fabricante o diseñador del sistema.

Cuadro 3.2 Datos de calidad de agua cruda recomendados para el desarrollo de un proyecto de desalación.

Parámetro	Unidades
Temperatura	°C
Turbiedad	UNT
SDI ₁₅	adimensional
SDI ₅	adimensional
pH	unidades estándar de pH
Carbono orgánico total (TOC)	mg/L
Carbono orgánico disuelto (COD)	mg/L
Luz Ultravioleta UV-254	m ⁻¹
Color verdadero y aparente	Upt-Co
Hierro, total	mg/L
Hierro, disuelto	mg/L
Manganeso, total	mg/L
Manganeso, disuelto	mg/L

Cuadro 3.2 (continuación). Datos de calidad de agua cruda recomendados para el desarrollo de un proyecto de desalación.

Parámetro	Unidades
Alcalinidad	mg/L como CaCO ₃
Dureza total	mg/L como CaCO ₃
Aceites y grasas	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L
Parámetros microbiológicos como: algas, coliformes totales, coliformes fecales, conteo bacterias heterótrofas	Unidades estándar
Calcio	mg/L
Magnesio	mg/L
Sodio	mg/L
Potasio	mg/L
Bario	mg/L
Estroncio	mg/L
Amoniaco	mg/L
Aluminio	mg/L
Sulfatos	mg/L
Cloruros	mg/L
Fluoruros	mg/L
Nitrato y nitrito	mg/L
Boro	mg/L
Bromuros	mg/L
Fosfatos	mg/L

Cuadro 3.2 (continuación). Datos de calidad de agua cruda recomendados para el desarrollo de un proyecto de desalación.

Parámetro	Unidades
Arsénico	mg/L
Sílice (SiO ₂)	mg/L
Conductividad	μS/cm
H ₂ S	mg/L
Oxígeno disuelto	mg/L

4 ENFOQUE DEL TRATAMIENTO

4.1 Pretratamiento

El pretratamiento que se deba aplicar está directamente relacionado con el tipo de toma que se realice. Si la toma es cerrada (agua de pozos costeros) se utilizan pretratamientos más sencillos como adición de ácidos, adición de coagulante-floculante, desinfección o filtración. Si la toma es abierta se debe aplicar pretratamientos más complejos. Asimismo, el pretratamiento se debe enfocar de acuerdo al tipo de proceso de desalación que se vaya a utilizar, como se muestra a continuación (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).

4.1.1 Pretratamientos para desalación por membranas

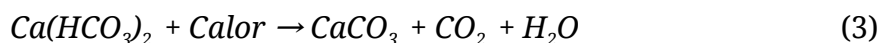
Si se va a desalar mediante una membrana osmótica no se puede realizar un pretratamiento convencional ya que este no elimina toda la materia en suspensión y coloidal presente en el agua, lo que produce un ensuciamiento de la membrana. (Delgado Díaz, 2011). A continuación se presentan los tratamientos más comunes previos a la desalación mediante membranas.

4.1.1.1 Dosificación de antiincrustantes y ácidos

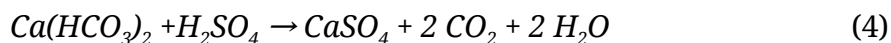
Se debe evitar la precipitación de sales minerales en las membranas; las sales que normalmente pueden crear problemas son los sulfatos de calcio, bario y estroncio, el carbonato de calcio, el fluoruro de calcio y la sílice. Para evitar esto se utilizan

productos antiincrustantes (también llamados dispersantes) los cuales limitan la formación de cristales manteniendo los iones en sobresaturación en el agua concentrada.

Los bicarbonatos pueden precipitar como carbonato de calcio por efecto de la temperatura. Al aumentar la temperatura, se provoca la descomposición de los bicarbonatos y su transformación en carbonatos insolubles (ver Ecuación 3), y otra por aumento del pH, ya que a partir de valores superiores a 8.2 se produce transformación a carbonatos insolubles.



Para evitar la precipitación específicamente del carbonato de calcio ($CaCO_3$) se puede acidificar el agua, ya que la disminución del pH aumenta la solubilidad de la sal (ver Ecuación 4).



4.1.1.2 Oxidación

También se debe evitar la precipitación de óxidos metálicos como el hierro, manganeso o aluminio. El hierro se puede encontrar en el agua en las formas ferrosa y férrica. El óxido ferroso (FeO) es soluble en el agua, por lo que no causa problemas de atascamiento en las membranas, sin embargo el óxido férrico (Fe_2O_3) el cual procede de la oxidación de la forma ferrosa, es insoluble, lo que puede ocasionar el atasco de las membranas.

Por otro lado el manganeso se puede encontrar en los estados de oxidación II y IV, el primero es soluble en agua por lo que puede ser rechazado por las membranas, sin embargo el segundo es insoluble y debe ser eliminado mediante algún pretratamiento.

Respecto al aluminio, este posee una solubilidad mínima a un pH de 6.6 y puede estar en el agua por origen natural o como aluminio residual procedente de coagulantes utilizados en otros pretratamientos. Si el aluminio se combina con el sílice se da la formación de aluminosilicatos formando una capa impermeable sobre las membranas.

Por lo general, para el proceso de oxidación se utiliza hipoclorito de sodio y el permanganato de potasio. Para el caso de los metales mencionados se procede a oxidarlos y luego se realiza una operación de filtración para eliminar estas sustancias insolubles oxidadas.

4.1.1.3 Coagulación-floculación

Este proceso se utiliza para la eliminación de sustancias coloidales orgánicas e inorgánicas. El contenido de materia orgánica puede quedar adherida en la superficie de las membranas o puede transmitir color. La materia orgánica proviene de humus vegetal o de contaminación por aceites, grasas u otros compuestos orgánicos.

La coagulación se encarga de la neutralización de las cargas asociadas a las partículas, mientras que la floculación las aglomera para su posterior sedimentación y filtración. Como coagulante-floculante usualmente se utilizan sales de aluminio o hierro. Se deben realizar ensayos para determinar el mejor coagulante, dosis y concentraciones óptimas y el diseño más adecuado para los procesos de mezcla rápida (coagulación) y mezcla lenta (floculación).

4.1.1.4 Sedimentación

Esta técnica se emplea mayoritariamente para la eliminación (por efecto de la gravedad) de la materia floculada y la eliminación de materia en suspensión. Existen muchos tipos de sedimentadores, el proceso de diseño se basa en el espacio disponible, las características del flóculo y la carga suministrada.

4.1.1.5 Flotación

Esta operación se utiliza para la eliminación de cierto tipo de sólidos que cuentan con la capacidad de flotar. Se realiza mediante la inyección de microburbujas de aire que rodean el sólido y lo hacen flotar, posteriormente son eliminados manualmente o mediante una paleta automática.

4.1.1.6 Filtración

La operación de filtración se debe realizar obligatoriamente al agua cruda siempre que esta tenga un Índice de Densidad de Sedimentos o de Atascamiento (SDI_{15} , Silt Density Index por sus siglas en inglés) mayor a 3, este índice es una medida indirecta de la materia en el agua que puede ser capaz de atascar las membranas. Generalmente se realiza una filtración de seguridad inmediatamente anterior a las membranas.

4.1.1.7 Adsorción

Este pretratamiento se utiliza si existe una cantidad importante de materia orgánica, usualmente esta materia se adsorbe en filtros de carbón activado; sin embargo, existe la desventaja de que también se retiene el cloro libre, lo que puede generar la proliferación de microorganismos.

4.1.1.8 Desinfección

Este proceso se realiza con la finalidad de reducir la actividad microbiológica en el agua. Si las membranas son biodegradables los microorganismos pueden destruirlas, perdiendo así sus propiedades. Si las membranas son no biodegradables la proliferación microbiana genera un atascamiento en ella.

La desinfección se puede realizar con un oxidante-desinfectante químico de cloro o sus derivados. Sin embargo, si se desea evitar la adición de oxidantes en el agua se puede aplicar un proceso físico como radiación ultravioleta.

4.1.1.9 Reducción

Cuando se realice desinfección utilizando oxidantes, es necesaria la dosificación de un agente reductor en medio de los dos procesos, esto debido a que existen membranas sensibles a los agentes oxidantes que pueden perder su eficiencia. Como agente reductor generalmente se utiliza bisulfito de sodio.

4.1.1.10 Descarbonatación

Como se observó en la Ecuación 4, si se da la aplicación de un ácido para evitar la formación de carbonato de calcio (CaCO_3) se producirá dióxido de carbono (CO_2) que permanecerá en dilución. El equipo que se utiliza es una torre de descarbonatación atmosférica rellena con anillos Raschig, monturas u otras. En la torre se dispersa el agua finamente y en contracorriente se introduce aire con la intención de arrastrar el gas en dilución eliminándolo a la atmósfera por la parte superior. Son equipos muy eficientes pero tienen la desventaja que saturan el agua con aire, por lo que posteriormente se debe instalar un desgasificador.

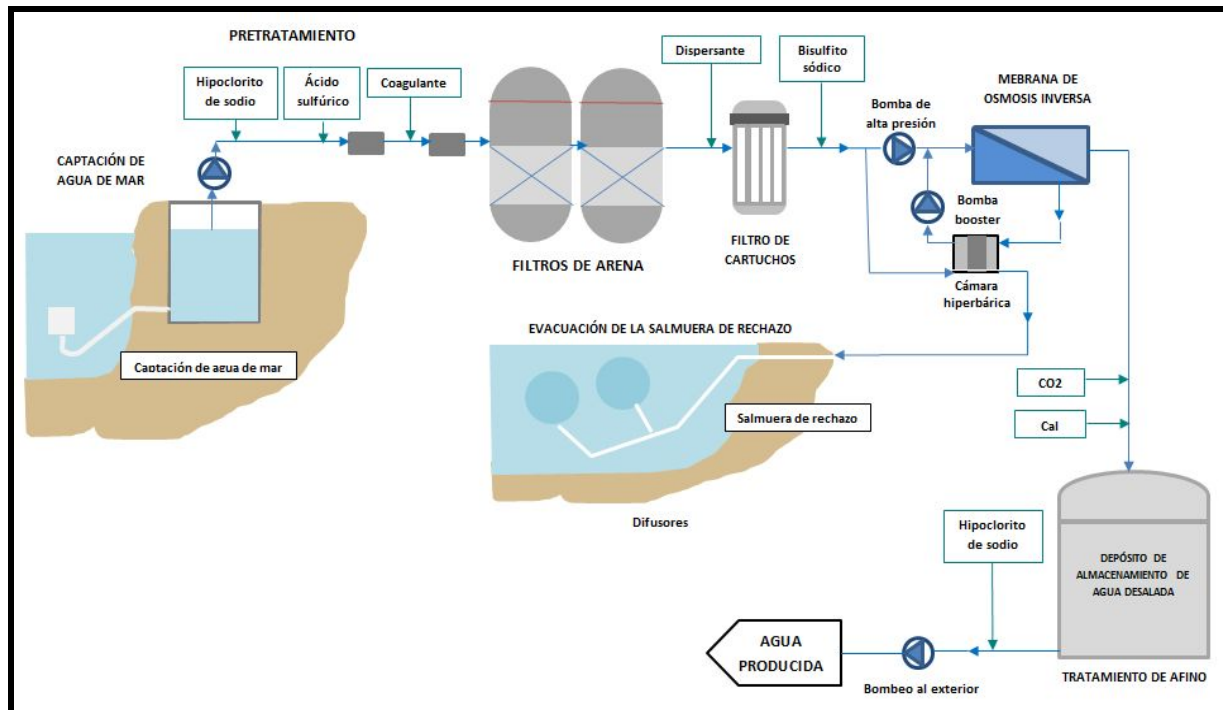
4.1.1.11 Desgasificación

La desgasificación se realiza mediante una torre rellena cerrada al vacío. Funciona de manera similar al descarbonatador dispersando el agua finamente pero introduciendo vapor en contracorriente. El vapor arrastra los gases en disolución para luego ser eliminados hacia la atmósfera utilizando eyectores o bombas de vacío.

4.1.2 Ejemplo de pretratamientos para desalación por membranas

En la Figura 4.1 se muestra un Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) donde se utilizan algunos de los pretratamientos mencionados en el Apartado 4.1.1. Primeramente se adiciona hipoclorito de sodio (proceso de oxidación), ácido sulfúrico (proceso de acidificación) y coagulante (proceso de coagulación-floculación), posteriormente se implementa la operación de filtración, luego se dosifica un dispersante (antiincrustante) y por último se adiciona bisulfito de sodio (proceso de reducción). En este caso la desinfección se aplica como postratamiento mediante hipoclorito de sodio.

Figura 4.1. Diagrama de flujo de proceso de proceso de desalación con membranas de OI (Almada, 2012).



4.1.3 Pretratamientos para desalación por destilación o evaporación

En las siguientes secciones se presentan los tratamientos más utilizados previos a un proceso de desalación por destilación o evaporación (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009):

4.1.3.1 Dosificación de antiincrustantes

Este pretratamiento es necesario para eliminar o reducir la precipitación de sales insolubles en las superficies del intercambiador de calor. Se aplica el mismo proceso que se explicó en el Apartado 4.1.1.1.

4.1.3.2 Descarbonatación y desgasificación

Este pretratamiento se realiza con la intención de eliminar los gases no condensables capaces de reducir el coeficiente de transmisión de calor y el oxígeno que facilita los fenómenos de corrosión de las superficies metálicas. Asimismo, se puede aplicar el mismo proceso de descarbonatación explicado en el Apartado 4.1.1.7 y/o el proceso de desgasificación que se cita en el Apartado 4.1.1.8. Normalmente se realiza el proceso de descarbonatación antes de la desgasificación para evitar la sobrecarga del equipo desgasificador.

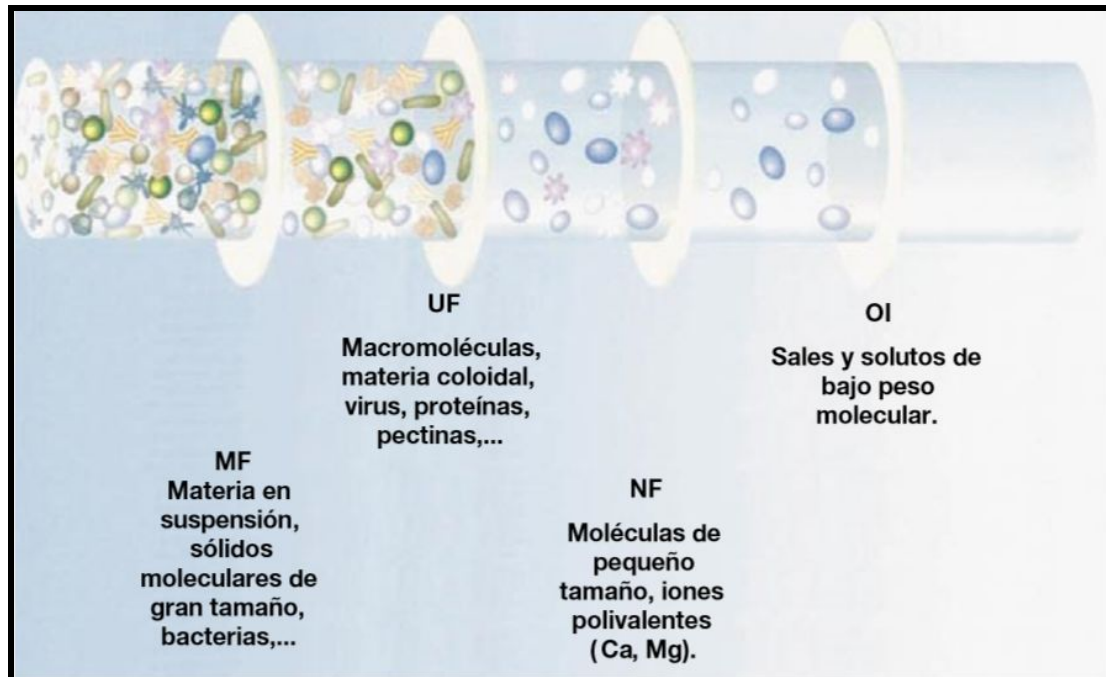
4.1.3.3 Dosificación de antiespumantes

Las espumas reducen el rendimiento de la evaporación y contaminan el producto obtenido, por esta razón hay que evitar su formación. Se forman por la constante agitación del agua de mar para facilitar el desprendimiento del vapor. La forma de solucionar este problema es mediante la adición de un antiespumante.

4.1.4 Pretratamientos mediante membranas

Es posible implementar pretratamientos mediante membranas los cuales pueden ser utilizados tanto para desalación por membranas como para desalación por destilación o evaporación. En la Figura 4.2 se muestra el tipo de separación que realiza la microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI). Asimismo más adelante se dará una explicación sobre cada una de ellas.

Figura 4.2. Separación por membranas mediante microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009).



4.1.4.1 Microfiltración (MF)

Esta tecnología se utiliza como alternativa a los pretratamientos físico-químicos convencionales, puede eliminar o reducir protozoos, turbiedad, color, algas y bacterias. Son membranas con tamaños de poro entre 0.1 μm a 0.2 μm . Pueden ser membranas orgánicas del tipo fibra capilar hueca constituidas por polipropileno y algún polímero fluorado o membranas inorgánicas tubulares de tipo cerámico con una capa aditiva de alúmina.

La utilización de la microfiltración en pretratamientos de desalación por membranas de ósmosis inversa, permite reducir su grado de atascamiento, debido a la alta reducción de coloides inorgánicos y orgánicos, responsables en su mayor parte del SDI de las aguas de entrada.

4.1.4.2 Ultrafiltración (UF)

Esta tecnología emplea membranas con tamaño de poro entre 0.1 μm y 0.01 μm . Las membranas pueden ser orgánicas de fibra capilar fabricadas con polímeros como polisulfona, fluoruro de polivilideno, poliamida, acetato de celulosa, entre otros.

También existen las membranas inorgánicas a base de óxido de zirconio pero son principalmente utilizadas para el tratamiento de aguas industriales.

Esta tecnología al igual que la microfiltración, permite optimizar el diseño de los sistemas de desalación con membranas, aumentando los flujos y suministrando agua a los sistemas de desalación con ósmosis inversa con valores de SDI inferiores a 3.

4.1.4.3 Nanofiltración (NF)

Como su nombre lo dice, esta tecnología utiliza membranas con tamaño de poro de un nanómetro (0.001 μm). Suelen ser membranas de arrollamiento en espiral, compuestas por lo general como capa activa de poliamida como capa activa y como capa de soporte de polisulfona y poliéster.

Caso contrario a la MF y la UF, la NF suele ser empleada como pretratamiento para plantas de desalación por evaporación, con el objeto de reducir el contenido de sulfatos y carbonatos de calcio, para facilitar la elevación de la temperatura máxima de funcionamiento y evitar la precipitación de estas sales.

Asimismo se puede utilizar para reducir el contenido de materias orgánicas antropogénicas tales como plaguicidas, materia orgánica de origen natural (ácidos húmicos), dureza total y sulfato de calcio.

En el Apartado 2.2.1.2 de este documento se presentó otra información relevante sobre la nanofiltración.

4.1.4.4 Constitución de los pretratamientos mediante membranas

La microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración deben estar constituidos a su vez por lo siguiente:

- Prefiltro de protección para la eliminación de partículas que puedan obstruir la membrana. Para MF el tamaño de luz de la malla debe ser de 500 μm , para UF entre 80 μm y 150 μm .
- Bombeo del agua de mar.
- Sistema de retrolavado ya sea con aire o agua. Puede ser con la incorporación de algún agente químico de limpieza.
- Sistema de limpieza química en caso de que los retrolavados no sean efectivos.
- Sistema de instrumentación y control.

4.2 Eliminación de patógenos

La eliminación de virus por membranas de ósmosis inversa puede variar de manera significativa y es una función de la propia membrana, así como su estado y la integridad de todo el sistema, incluyendo sellos. En el caso de las bacterias, se ha demostrado que pueden recorrer a través de los defectos de las membranas. Debido a lo anterior, las membranas no pueden ser consideradas como un proceso completamente eficaz para la desinfección y comúnmente son sucedidos por un paso de desinfección (WHO, 2011).

Cuando se utilizan procesos térmicos para la desalinización, la inactivación microbiana será controladas por la temperatura alcanzada y el tiempo que el agua se mantiene a esa temperatura. Las temperaturas típicas para asegurar la inactivación varían de 50 °C a 60 °C cuando se mantiene durante 5-30 minutos (WHO, 2011).

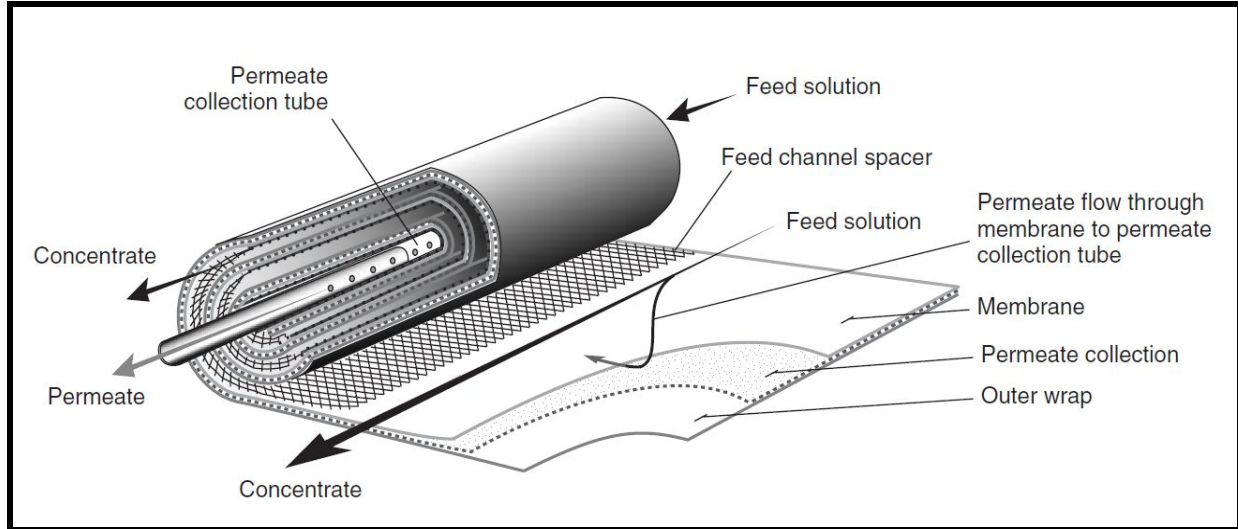
4.3 Desalación por Ósmosis Inversa

4.3.1 Configuración de las membranas

4.3.1.1 Módulo de membrana en espiral

Los módulos de membrana en espiral, son típicamente de 1 m (40 in) a 1.5 m (60 in) de largo y entre 0.1 m (4 in) a 0.46 m (18 in) de diámetro, siendo los elementos de 0.2 m (8 in) de diámetro, los más comunes. De cuatro a siete de estos elementos se arreglan en serie en un tanque presurizado, con los tubos de colección de permeado unidos.

En la Figura 4.3 se presenta un detalle de la configuración de una membrana en espiral (Crittenden, 2011).

Figura 4.3. Detalle de membrana en espiral.

Durante la operación, el agua de ingreso que se encuentra presurizada, entra por un lado del tanque presurizado y se encuentra con el primer elemento de membrana. Al fluir el agua de manera tangencial a través de la superficie de la membrana, una porción del agua cruza la superficie de la membrana y fluye de manera espiral hacia el tubo colector de permeado. El agua de ingreso restante, ahora concentrada, fluye hacia el próximo elemento en serie y el proceso se repite hasta que el concentrado sale del tanque presurizado. Cada módulo de membrana en espiral, tiene una recuperación del 5 al 15 por ciento. Una pérdida de carga se genera cuando el agua de ingreso fluye a través de los canales de ingreso y los espaciadores, lo cual reduce la fuerza de flujo a través de la superficie de la membrana. La pérdida de carga a través de cada elemento o membrana, es baja, típicamente menor a 0.5 bar (7 psi) por elemento.

4.3.1.2 Módulos de fibra hueca (HFF)

El agua cruda pasa por el exterior de la fibra y es forzada a pasar a través de la pared de la misma, el permeado es recogido en el lumen (orificio interno) de la fibra. El área activa de la membrana se encuentra en la superficie exterior de la fibra y es de un espesor de $0.1 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$. En la configuración típica de las HFF, el agua de ingreso entra por uno de los lados del módulo y el concentrado (salmuera) sale por el otro. Los arreglos de fibras son modulados de manera helicoidal alrededor de un tubo central. Un módulo sencillo puede contener varios cientos de miles de fibras y un área superficial de hasta 10 veces la de un módulo de membrana en espiral. La recuperación de producto por elemento es de aproximadamente 30%.

4.3.2 Estructura de la membrana

La resistencia al flujo a través de una membrana es inversamente proporcional al espesor de la misma. Con el fin de obtener un flujo apreciable de agua, la capa activa de la membrana debe ser extremadamente delgada, en el caso de las membranas de OI y las de NF los rangos se encuentran desde 0.1 μm a 2 μm . Los materiales con estos espesores, carecen de integridad estructural, por esta razón, estas membranas están compuestas de varias capas, con una capa activa delgada que provee de capacidad para separar sustancias y una capa con mayor espesor y más porosa que provee de integridad estructural.

Las membranas multicapa, se fabrican de dos maneras: asimétricas y compuestas de capa delgada. Las asimétricas, se forman de un mismo material que se desarrolla en la capa activa y capa de soporte durante el proceso de moldeo (en otras palabras, la membrana es químicamente homogénea pero físicamente heterogénea). Las membranas compuestas de capa delgada (thin-film composite), están compuestas de dos o más materiales moldeados uno encima del otro. Una ventaja de estas últimas, es que la separación de las sustancias y las propiedades estructurales pueden ser optimizadas de forma independiente, utilizando materiales apropiados para cada función.

La capa activa de las membranas de OI debe permitir de forma selectiva el paso del agua a través del material, mientras rechaza los solutos disueltos que pueden tener dimensiones similares a las de la molécula de agua. La separación de iones pequeños, no puede ser lograda si los mismos son transportados de manera convectiva con el agua líquida. Por lo tanto, las membranas de OI, se fabrican de un material denso, siendo este permeable pero no poroso y sin espacios vacíos, por el cual viaja el agua líquida. El agua y los solutos disueltos dentro del material sólido de la membrana, se dispersan a través del material sólido y se re - licúan en lado de la membrana donde se encuentra el permeado.

4.3.3 Material de las membranas

El desempeño de las membranas es afectado fuertemente por las propiedades físicas y químicas de los materiales que las conforman. El material ideal para las membranas es aquel que pueda producir un alto flujo sin que se tape o colmate y es físicamente durable, químicamente estable, no biodegradable, químicamente resistente y económico. Los materiales más utilizados en los sistemas de OI, son: derivados de celulosa y de poliamida.

4.3.3.1 Membranas de Acetato de Celulosa (AC)

Son de construcción asimétrica. Son hidrofílicas, las cuales permiten mantener valores altos de flujo y minimizar el atascamiento. Las propiedades estructurales de las membranas de AC, no son ideales; además, el material no es tolerante de temperaturas superiores a los 30°C, tiende a hidrolizarse cuando el pH está por debajo de 3 y por encima de 8, es susceptible de degradación biológica y se degrada con concentraciones de cloro libre por encima de 1 mg/l, dependiendo de la concentración y la duración con el oxidante. Adicionalmente, la compactación de las membranas debida a la alta presión operativa y la construcción asimétrica de las mismas, causa una reducción de flujo a través del tiempo.

4.3.3.2 Membranas de poliamida (PA)

Son química y físicamente más estables que las membranas de AC, generalmente inmunes a la degradación de bacterias, estables en un rango de pH entre 3 a 11, y no se hidrolizan en el agua. Bajo condiciones de presión y temperatura similares, las membranas de PA pueden producir valores de flujo de agua y rechazo de sales mayores que las membranas de AC. Sin embargo, las membranas de PA son más hidrofóbicas y susceptibles a colmatación que las de AC y no son tolerantes a concentraciones de cloro libre de cualquier orden. Cualquier residual de oxidante como el cloro en el agua cruda, causará rápido deterioro de la membrana. Para la mayoría de las aplicaciones, la desclorinación es requerida si el agua cruda o de ingreso al sistema es clorada, y puede realizarse con bisulfito de sodio, dióxido de sulfuro o carbón activado. Algunas membranas de PA tienen una superficie más rugosa que las de AC, lo cual puede incrementar la susceptibilidad a la colmatación biológica y particulada. Las membranas de PA, son normalmente de construcción tipo capa delgada. Las poliamidas, son utilizadas para la capa activa y materiales durables como la polietersulfona son utilizados para el material de soporte. La capa de soporte, es esencialmente una membrana de UF y provee poca resistencia al flujo.

4.3.4 Capacidad de rechazo

La capacidad de rechazo de las membranas de OI y NF, están designadas con un porcentaje de rechazo de sales o un valor de corte en el peso molecular (MWCO, molecular weight cut off). El parámetro de rechazo de las sales se usa típicamente en las membranas de OI y se determina mediante la utilización de la Ecuación 5.

$$Rej = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (5)$$

donde:

Rej : rechazo, adimensional (expresado como una fracción)

C_p : concentración en el permeado, mol/L

C_f : concentración en el agua cruda, mol/L

El rechazo puede ser calculado para parámetros como: SDT (sólidos disueltos totales) o la conductividad. Para la calificación de las membranas, el rechazo de sales específicas es especificado. El rechazo de cloruro de sodio, es normalmente especificado para las membranas de ósmosis inversa a alta presión; y el rechazo de $MgSO_4$, es normalmente especificado para NF o membranas de OI de baja presión. El corte en peso molecular (MWCO), se especifica en unidades de Daltons (Da), conocida también como unidad de masa atómica (uma).

4.3.5 Presión osmótica

4.3.5.1 Difusión y Ósmosis

La ósmosis, es el flujo de solvente a través de una membrana semipermeable, desde una solución diluida a una concentrada. La ósmosis reduce el flujo a través de una membrana de OI al inducir una fuerza al flujo en la dirección opuesta.

4.3.5.2 Presión osmótica

La fuerza para la difusión es típicamente descrita como un gradiente de concentración, sin embargo, una explicación termodinámica más rigurosa es un gradiente en la energía de Gibbs. Cuando existen dos recipientes separados por una membrana y conteniendo en uno agua y en el otro una solución de sales, ambos lados tienen valores distintos de energía de Gibbs, debido a la diferencia en las concentraciones de sales.

4.3.6 Mecanismos para el rechazo de solutos

Los modelos de permeación a través de las membranas, sugieren varios mecanismos para el rechazo. Los mecanismos básicos de rechazo son:

1. repulsión electrostática en la superficie de la membrana
2. solubilidad y difusividad a través del material de la membrana debido a efectos químicos

3. o filtrado debido al tamaño y otras propiedades químicas de las moléculas

Las membranas de OI y NF generalmente están cargadas negativamente en operación, esto debido a la presencia de grupo funcionales ionizados, como los carboxilatos, en el material de la membrana. Los aniones pueden ser rechazados en la superficie de la membrana debido a la repulsión electrostática, los cationes pueden ser rechazados para mantener la neutralidad eléctrica en el agua cruda y permeada. La presencia de grupos funcionales polares e hidrógeno-unibles en la membrana, incrementa la solubilidad de compuestos polares como el agua sobre los no polares, lo cual provoca un mecanismo para mayor flujo de agua a través de la membrana. Para las moléculas grandes se espera que tengan menor difusividad a través del material de la membrana o que no fuera posible que pasaran a través de la misma.

Las observaciones experimentales son consistentes con estos mecanismos de rechazo. Las moléculas polares pequeñas como el agua generalmente tienen el mayor flujo. Los gases disueltos como el H₂S y el CO₂, que son pequeños, neutros, y polares, también permean a través de las membranas de OI. Los iones monovalentes como el Na⁺ y el Cl⁻ permean mejor que los iones divalentes (Ca²⁺, Mg²⁺) debido a que los iones divalentes tienen mayor repulsión electrostática. Las bases y los ácidos (HCl, NaOH) permean mejor que sus sales (Na⁺, Cl⁻), debido a la disminución de la repulsión electrostática (Crittenden, J.C, 2011).

Homológamente, la permeación incrementa con una disminución en el peso molecular. Los materiales orgánicos de alto peso molecular no permean a través de las membranas de OI. Estas membranas tienen la capacidad de rechazar hasta el 99% de iones monovalentes. Las membranas de NF rechazan entre el 80% y el 99% de los iones divalentes mientras logran bajo rechazo de los iones monovalentes.

4.3.7 Ecuaciones para el flujo de agua y de solutos

Una variedad de ecuaciones se han desarrollado para describir la tasa de transferencia de masa para el agua y el soluto a través de una membrana de OI. Los modelos expresan el flujo como el producto del coeficiente de transferencia de masa y una fuerza. Esta fuerza para el flujo de agua a través de una membrana de OI es el diferencial de presión neto, o la diferencia entre los diferenciales de presión aplicada y osmótica, así como se expresa en la Ecuación 6:

$$\Delta P_{NET} = \Delta P - \Delta \pi = (P_F - P_P) - (\pi_F - \pi_P) \quad (6)$$

donde:

ΔP : presión neta transmembrana, bar

P_F : presión aplicada de ingreso

P_p : presión del permeado

π : presión osmótica

π_F : presión osmótica de ingreso

π_p : presión osmótica del permeado

El flujo de agua a través de las membranas de OI se describe mediante la Ecuación 7:

$$J_w = k_w(\Delta P - \Delta\pi) \quad (7)$$

donde:

J_w : flujo volumétrico de agua, $L/(m^2 * h)$

k_w : coeficiente de transferencia de masa para flujo de agua, $L/(m^2 * h*bar)$

Esta ecuación es válida en cualquier punto en la superficie de la membrana entre la entrada del agua cruda y la descarga de concentrado en un elemento de membrana. Debe anotarse que las presiones aplicada y osmótica cambian continuamente a lo largo de la membrana en espiral, esto debido a la pérdida de carga y el cambio en la concentración de solutos. Como resultado, el flujo total debe determinarse integrando esta ecuación a través de la longitud del elemento.

La fuerza para el flujo de solutos es la generada por el gradiente de concentraciones, el flujo de solutos a través de las membranas de OI, se expresa mediante la Ecuación 8:

$$J_s = k_s(\Delta C) \quad (8)$$

donde:

J_s : flujo másico de soluto, $mg/(m^2 * h)$

k_s : coeficiente de transferencia de masa para flujo de solutos, $L/(m^2 * h*bar)$ o m/h

ΔC : gradiente de concentraciones a través de la membrana, mg/l

Los valores de k_w y k_s son determinados experimentalmente por los fabricantes de las membranas. La concentración de soluto en el permeado, es la razón de los flujos de solutos y agua, como se muestra en la Ecuación 9:

$$C_p = \frac{J_s}{J_w} \quad (9)$$

Entonces, entre más bajo el flujo de solutos o entre más grande el flujo de agua, se alcanza mejor remoción de solutos y el permeado tendrá una concentración de solutos

menor. La razón del flujo de permeado al flujo de ingreso, se llama recuperación y se calcula utilizando la Ecuación 10:

$$r = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (10)$$

Utilizando los principios de balances de masas y de flujo, la concentración de solutos en el flujo de concentrado, puede ser calculada utilizando las ecuaciones de recuperación y de rechazo de solutos. Se obtiene la Ecuación 11:

$$C_C = C_F \left(\frac{1 - (1 - Re)r}{1 - r} \right) \quad (11)$$

El rechazo, frecuentemente es de aproximadamente 100%, en este caso se puede simplificar como se muestra en la Ecuación 12:

$$C_C = C_F \left(\frac{1}{1 - r} \right) \quad (12)$$

El desempeño de las membranas disminuye (disminuye el flujo de agua, incrementa el flujo de solutos) debido a ensuciamiento o atascamiento y envejecimiento de las membranas. Sin embargo, los flujos de agua y de solutos también varían debido a cambios en la temperatura, presión, velocidad y concentración del agua de ingreso al sistema.

4.3.8 Polarización de la concentración (PC)

Es la concentración de solutos en las cercanías de la superficie de las membranas y tiene efectos adversos en el desempeño de las mismas. El flujo de agua a través de la membrana trae el agua de ingreso (que contiene agua y solutos) a la superficie de la membrana, y mientras el agua limpia fluye a través de la membrana, los solutos se acumulan en las cercanías de la membrana. En la filtración por membranas, las partículas están en contacto con las membranas y forman una capa llamada capa queque. Debido a que los mecanismos de rechazo de la OI son distintos a los de las demás membranas, los solutos se quedan en solución y forman una capa límite de mayor concentración en la superficie de la membrana. De esta manera, la concentración en la solución de entrada se vuelve polarizada, con la concentración en la superficie de la membrana mayor a la concentración en el grueso del agua cruda del canal de entrada.

La polarización de la concentración (PC) tiene varios impactos negativos en el desempeño de los sistemas por OI:

1. El flujo de agua es menor debido a que el gradiente de la presión osmótica es mayor, debido a la mayor concentración de solutos en la superficie de la membrana.
2. El rechazo es menor debido a un incremento en el flujo de solutos a través de la membrana por un incremento en el gradiente de concentración y una disminución en el flujo de agua.
3. Los límites de solubilidad de los solutos pueden excederse, conduciendo a precipitación e incrustaciones.

4.4 Postratamientos

Como ya se mencionó, luego del tratamiento, las aguas son muy corrosivas debido a su baja dureza y alcalinidad. El tipo de postratamiento que se le quiera dar depende principalmente del proceso de desalación utilizado y de la calidad del agua potable que se requiera obtener de acuerdo a la reglamentación vigente. Se suelen utilizar los siguientes postratamientos:

4.4.1 Mezcla de aguas para disminuir altas concentraciones de boro

Este postratamiento se suele utilizar para disminuir altas concentraciones de boro. Generalmente la tasa de eliminación para el boro, utilizando una membrana convencional de ósmosis no supera el 75-80 %. Existen varias alternativas tecnológicas que permiten aumentar la eliminación de esta sustancia: la utilización de membranas de ósmosis de alto rechazo a boro, proceso de ósmosis inversa de varios pasos o la aplicación de resinas de intercambio iónico selectivas al boro; sin embargo los costos son muy elevados y el único método económico para disminuir la concentración de boro en aguas con concentraciones altas del mismo, es mediante la mezcla con aguas con concentraciones bajas de boro (OMS, 2013).

4.4.2 Intercambio Iónico

Este método realiza un cambio de iones utilizando resinas intercambiadoras de cationes, aniones o iones selectivos. No hay un cambio permanente en la estructura del sólido por lo que existe la ventaja de que se puede reutilizar el material de intercambio mediante una regeneración del mismo. Este postratamiento se puede utilizar en caso de que se requiera (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009):

- a) Descalcificación o ablandamiento. Mediante un intercambio catiónico utilizando resinas de alta selectividad, se realiza la sustitución de los iones calcio y magnesio por iones de sodio.

- b) Desalcalinización o descarbonatación. Utilizando una resina catiónica débil se fija los cationes asociados a iones bicarbonato, carbonato o hidroxilo.
- c) Desmineralización o desionización. Las resinas eliminan casi por completo los cationes y los aniones del agua, intercambiando los cationes de todas las sales de calcio, magnesio, sodio y otros cationes metálicos, por iones H^+ liberando sus correspondientes ácidos. Posteriormente, los ácidos se eliminan mediante las resinas aniónicas apropiadas.
- d) Eliminación selectiva de iones como níquel, plomo, boro, cobre, mercurio, hierro, manganeso, arsénico, nitrato, fluoruro y otros. Generalmente se utilizan resinas quelantes para la retención de los metales pesados.
- e) Adsorción de compuestos orgánicos.

4.4.3 Acondicionamiento del agua tratada

Este es una de los postratamientos más importante y se realiza previo a la desinfección para su posterior distribución. Si el proceso de desalación se realiza mediante membranas, el agua producida sigue sin ser apta para consumo humano ya que esta carece de dureza y alcalinidad. El acondicionamiento se realiza para establecer una composición mineral equilibrada (con la aportación de sustancias como calcio, magnesio y bicarbonatos) y el cumplimiento con el Reglamento de la Calidad del Agua Potable. Se pueden emplear dos procesos para la remineralización del agua tratada, los cuales se explican a continuación:

4.4.3.1 Acondicionamiento mediante mezcla de aguas

Esta alternativa solo se puede utilizar en caso de que se disponga de agua de origen diferente como fuentes subterráneas o subsuperficiales. Como su nombre lo indica se basa en mezclar el producto con otra agua que ya haya sido pretratada, para esto es necesario conocer a fondo la composición química de todas las aguas que conformen la mezcla.

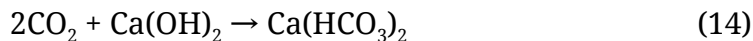
4.4.3.2 Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico del agua se puede realizar mediante alguno o algunos de los procedimientos que se muestran a continuación según las condiciones que se necesiten mejorar, la dosis de cada uno de ellos dependen del resultado final que se quiera o necesite lograr (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009):

- a) Dosificación de CO_2 y cal viva: se incrementa el contenido de bicarbonatos y calcio lo que da lugar a un incremento de la dureza y la alcalinidad. La reacción que ocurre es la que se muestra en la Ecuación 13:



- b) Dosificación de CO_2 e hidróxido de calcio: como se puede observar en la Ecuación 14, se obtiene el mismo resultado al procedimiento anterior, con la ventaja que el hidróxido de calcio no desprende tanto calor al disolverse como la cal viva.



Este es el proceso de acondicionamiento más utilizado en España, este sólido no se puede dosificar directamente por lo que se prepara una solución del 5% al 7% de agua saturada de cal o también llamada "lechada de cal". La mezcla se realiza en un silo. Posteriormente el agua saturada se mezcla con el agua a remineralizar en una cámara a la que se añade CO_2 para facilitar la reacción. El proceso se controla mediante la medición del pH al final de la cámara de reacción.

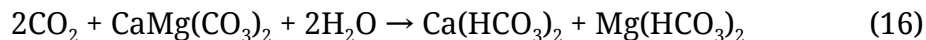
- c) Dosificación de CO_2 y lechos de carbonato de calcio: este proceso se puede realizar con flujo descendente (filtros abiertos convencionales) o con flujo ascendente y altura constante. El carbonato de calcio a utilizar debe ser de alta pureza y libre de trazas de otras rocas carbonatadas. La reacción que ocurre es la que se muestra en la Ecuación 15:



Como se observó en la reacción se forma más cantidad de bicarbonatos con el mismo consumo de CO_2 (comparado con la utilización de hidróxido de calcio). Además posee la ventaja que el agua disuelve en el lecho la cantidad necesaria de carbonato de calcio (alcanzando el pH de saturación) y no es necesario emplear equipos de control.

- d) Dosificación de CO_2 y torres de dolomitas

La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio, con una proporción aproximada de CaO al 30.5 % y del 21% de MgO. La reacción que se efectúa mediante este proceso se muestra a continuación:



Al igual que el proceso anterior, las torres de dolomitas producen más cantidad de bicarbonatos en comparación con el uso de hidróxido de calcio, consumiendo la misma cantidad de CO_2 . También posee la ventaja que se añade un ion

adicional de magnesio lo que representa una ventaja económica ya que se logra una mayor dureza y una mayor alcalinidad con la misma cantidad de CO₂.

De la misma manera al proceso con lechos de carbonato de calcio, el agua va a alcanzar el pH de saturación tras pasar por la torre sin la necesidad de emplear mecanismos de control, sin embargo el tiempo de contacto debe ser mayor en comparación con otros lechos.

e) Dosificación de cloruro de magnesio y bicarbonato de sodio

Este proceso añade iones de bicarbonato y magnesio incrementando la dureza y la alcalinidad; pero tiene la desventaja que añade más iones de cloruro y sodio. Además es un sistema muy costoso económicamente por los reactivos que utiliza.

4.4.4 Desinfección

Se debe realizar un postratamiento de desinfección con el objeto de prevenir alguna falla en el sistema o como protección parcial contra la contaminación en concentraciones bajas de microorganismos y su proliferación en el sistema de distribución.

El tratamiento de desinfección utilizado con mayor frecuencia es la cloración, aunque existen otros tratamientos como la ozonización, la exposición a radiación UV, la cloraminación y la aplicación de dióxido de cloro. Estos métodos son muy eficaces para destruir las bacterias y pueden tener una eficacia razonable en la inactivación de virus (dependiendo del tipo) y de muchos protozoos (WHO, 2011).

Según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable el cloro residual se encuentra dentro de los Parámetros de Calidad del Agua del Nivel Primario (N1) por lo que es obligatorio mantener cloro residual (ya sea libre o combinado) de acuerdo a lo que se muestra en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Valor alerta y valor máximo admisible para el cloro residual en el agua potable MINSA (2015).

Parámetro	Valor Alerta, VA (mg/L)	Valor Máximo Admisible, VMA (mg/L)
Cloro residual libre	0,3	0,6
Cloro residual combinado*	1,0	1,8

*Sólo en el caso que el residual del cloro se encuentre en forma combinada o se esté dosificando cloro en la forma de cloramina (cloro-amoniaco).

4.4.4.1 Cloración

El cloro se disuelve en el agua y forma ión hipoclorito (ClO^-) y ácido hipocloroso (HClO). La cloración se puede realizar mediante (WHO, 2011):

- **Gas cloro licuado:** un clorador extrae el gas del cilindro y lo adiciona al agua en forma dosificada.
- **Solución de hipoclorito de sodio:** se puede dosificar mediante una bomba dosificadora eléctrica de desplazamiento positivo o mediante un sistema de suministro por gravedad.
- **Gránulos de hipoclorito de calcio:** se disuelve en una porción de agua y luego se mezcla con el caudal principal

Sin embargo, el cloro tiene el inconveniente que puede reaccionar con materia orgánica natural y producir trihalometanos y otros subproductos de desinfección de agua (SPD) halogenados. No obstante, la formación de subproductos puede controlarse optimizando el sistema de tratamiento (WHO, 2011).

4.4.4.2 Ozonización

El ozono gaseoso (O_3) se forma haciendo pasar aire seco u oxígeno a través de un campo eléctrico de tensión alta. El aire enriquecido en ozono obtenido se añade directamente al agua mediante difusores porosos en la base de torres de contacto. Las torres de contacto, que suelen tener una profundidad de unos 5 m, proporcionan tiempos de contacto de 10 a 20 minutos. Generalmente se disuelve al menos el 80% del ozono aplicado. El aire que sale de la torre con restos de ozono, se hace pasar por un destructor de ozono y se expulsa a la atmósfera. El ozono tiene la desventaja que no produce un efecto desinfectante residual (WHO, 2011).

4.4.4.3 Otros procesos de desinfección

- **Cloraminación:** mediante la reacción del cloro con amoníaco en medio acuoso se produce monoclaramina la cual es útil como desinfectante. Es menos eficaz que el cloro libre pero es persistente como desinfectante residual.
- **Dióxido de Cloro:** ha comenzado a utilizarse recientemente debido a la preocupación por la producción de trihalometanos que conlleva la desinfección con cloro. El dióxido de cloro se genera antes de su aplicación, añadiendo gas cloro o una solución acuosa de cloro a una disolución acuosa de clorito sódico. En el agua, el dióxido de cloro se descompone en clorito y clorato.

- **Radiación UV:** este tratamiento se encuentra restringido normalmente para instalaciones pequeñas. La Radiación UV tiene actividad biocida a longitudes de onda de 180 nm a 320 nm.

4.5 Recuperación de la Energía

Desde el punto de vista energético, el diseño hidráulico de un sistema de desalación, debe optimizarse para minimizar el consumo. Es recomendable que las plantas utilicen recuperadores de energía los cuales se pueden clasificar en dos tipos. En el primero se incluirían aquellos que aprovechan la energía hidráulica de la salmuera para producir un desplazamiento positivo. El segundo tipo, que se utiliza en instalaciones de menor tamaño, es el que transforma la energía hidráulica de la salmuera en energía mecánica generalmente utilizando turbinas tipo Pelton o Pump Engineering's Turbocharger (Delgado Díaz, 2011).

4.6 Materiales de construcción

Como se observó en el Apartado 3.1.5, la agresividad del agua antes de su postratamiento es muy elevada por lo que una selección inadecuada de los materiales, puede generar una migración ya sea de materiales metálicos, poliméricos (plásticos o resinas), cementosos o cerámicos, incrementando la presencia de elementos y sustancias causando alteraciones en la calidad del agua. Lo anterior puede implicar cambios organolépticos como sabor, olor y color o general incumplimiento en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

Entre los materiales de construcción con los que se debe tener especial cuidado se incluyen: revestimientos, soldaduras, valvulerías, juntas, adhesivos, resinas de intercambio iónico, conducciones, recubrimientos, elementos o sistemas de membranas, entre otros.

Además, se debe realizar un lavado y/o desinfección de las conducciones antes de la puesta en marcha de la desaladora.

5 IMPACTOS AMBIENTALES Y MITIGACIÓN

5.1 Estudios ambientales

Un estudio ambiental para un proyecto de desalación debe ser evaluado en la fase de diseño, ejecución y funcionamiento. A continuación se detallan los contenidos básicos para los estudios ambientales de las plantas desaladoras en España (Ministerio de Sanidad y Política Social, 2009):

- Descripción general del proyecto: localización, objetivos, descripción de materiales empleados, movimientos de tierras previstos, suelo que se ocupará y otros recursos naturales, descripción de los tipos, cantidades y composición de residuos, vertidos y emisiones. Legislación aplicable. Inducción de actividades y nuevos proyectos, como consecuencia de la localización de la desaladora.
- Descripción de las principales alternativas estudiadas y una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos ambientales pero integrando a su vez criterios de tipo económico.
- Descripción de diversas alternativas en cuanto al trazado de emisarios submarinos para el vertido de salmuera.
- Evaluación de los efectos directos o indirectos del proyecto sobre la población, la flora, la fauna, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico artístico y el arqueológico.
- Medidas previstas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos.

5.2 Acciones capaces de producir efectos sobre el medio ambiente en un proyecto de desalación

- Movimientos de tierra
- Eliminación de vegetación
- Voladuras
- Olores
- Ruidos y vibraciones
- Afecciones a fauna
- Tipo y número de estructuras
- Tipo de materiales proyectados
- Tiempo estimado de duración
- Necesidad de desvíos o canalizaciones provisionales o definitivos

5.3 Vertido de la salmuera

Se dice que el mayor impacto ambiental que pueda tener una desaladora, procede del vertido de la salmuera de rechazo, sin embargo, si se realiza un adecuado diseño y una correcta ubicación del vertido se puede disminuir este impacto medioambiental. Destacar que al mar no se le añade más sal de la que tiene sino que se le devuelve (más concentrada) la sal que previamente se le ha extraído con el agua de mar.

Para la construcción del emisario de salmuera se debe tener las siguientes consideraciones:

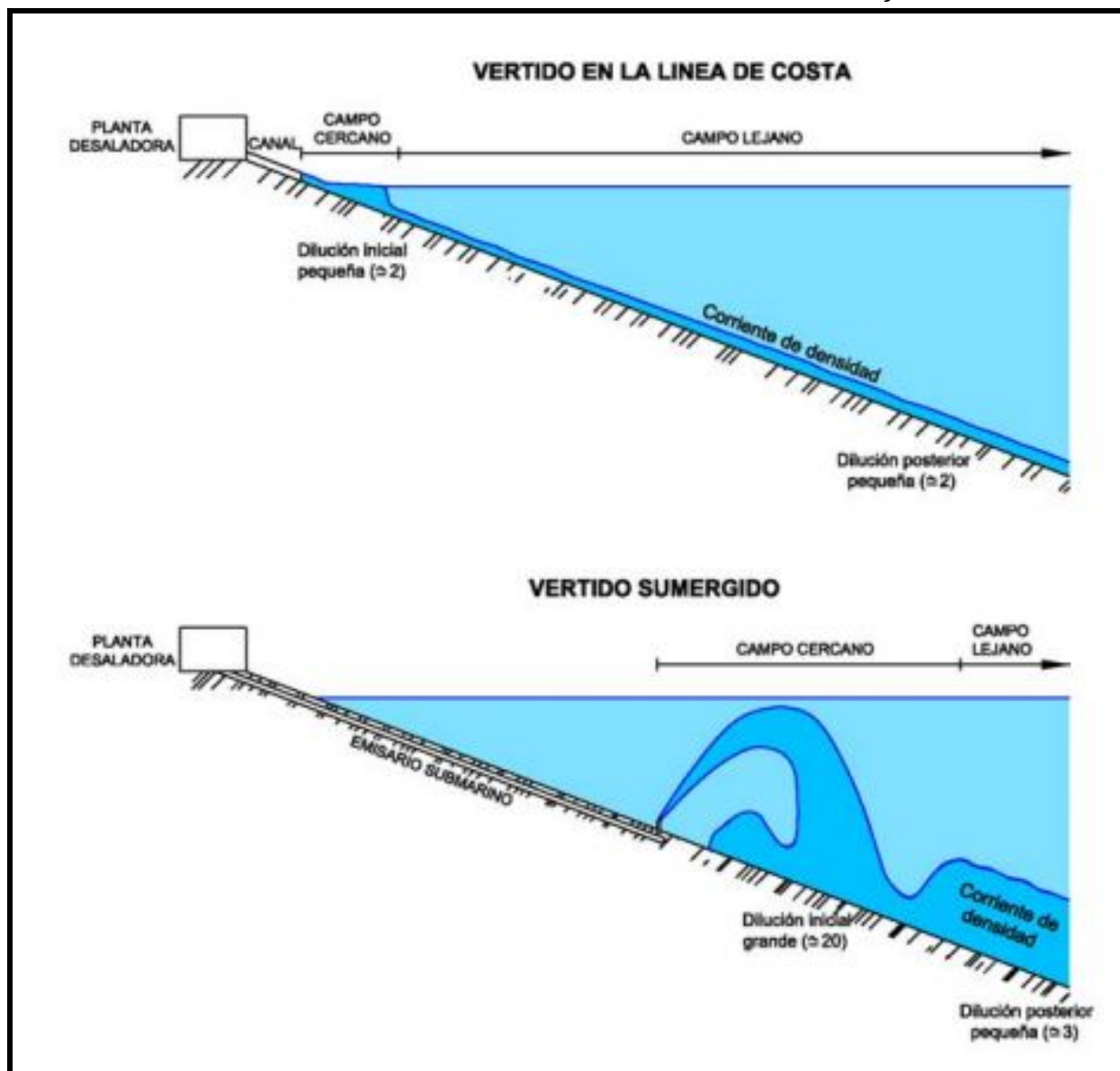
- Punto de vertido sea accesible para su seguimiento y control posterior.
- Proximidad de zonas de baño.
- Cercanía a lugares de pesca o de acuicultura.
- Presencia o cercanía de Espacios Naturales Protegidos.
- Morfología de la costa y el régimen de corrientes de la zona.
- Presencia de áreas de interés faunístico.
- Presencia de zonas húmedas que experimenten intercambios de agua con el mar y que pueden verse afectados por incrementos de la salinidad.

La salmuera contiene una elevada concentración de sales disueltas, aproximadamente el doble de la salinidad del agua de mar. Los organismos marinos se encuentran en un equilibrio osmótico con el medio ambiente en el que viven, por lo que un aumento en la concentración de sales, puede ocasionar la deshidratación de sus células y provocar su muerte. Estas aguas no se pueden verter donde haya especies muy sensibles a la salinidad (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2011).

Como se puede observar en la Figura 5.1, los métodos de descarga se pueden clasificar en dos grupos: los que se realizan sobre la misma línea de costa y los que se realizan en el fondo del mar. Los primeros en comparación con los segundos tienen la ventaja de que se construyen desde tierra, con esto se evita los elevados costos que puedan presentar obras submarinas; pero tienen el inconveniente de que el acceso del agua de mar para diluir se produce solo por un semiespacio (menos eficientes para provocar diluciones).

Asimismo, se pueden implementar sistemas más eficaces como la utilización de vertidos en el fondo del mar mediante tramos difusores con numerosas bocas de descarga, vertidos combinados con las aguas residuales de otras instalaciones o vertidos con predilución mezclando el efluente, antes de su vertido al mar, con un caudal de agua de mar extraído expresamente para este fin (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2011).

Figura 5.1. Croquis de vertido en la línea de costa y de vertido sumergido mediante emisario submarino (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2011).



5.4 Manejo de residuos

Aparte del residuo de salmuera mencionado en el Apartado 5.3 se generan otros residuos de las sustancias añadidas durante el proceso con distintos fines como floculantes, biocidas, antiincrustantes. Es importante realizar el tratamiento adecuado de estos residuos antes de su vertido.

6 COSTOS DEL TRATAMIENTO

Independientemente del método de desalación que se emplee, los costos de estos procesos dependen siempre de:

- Tamaño de la planta
- Características técnicas de la planta - pre y post tratamiento, tecnología para desalación
- De la calidad de agua a tratar
- De la ubicación de la planta de potabilización
- De las condiciones legales y laborales
- De los costos energéticos
- Disposición del concentrado

Como se ha discutido en este documento, el agua puede ser desalada por varios procesos. De estos procesos, la OI y MSF han alcanzado un éxito comercial muy importante sobre los demás; tanto es así, que las demás tecnologías representan aproximadamente un 15% de la capacidad total instalada a nivel mundial, y se no se espera que sean instaladas en sistemas de desalación a gran escala (CRC Press, 2010).

En el siguiente cuadro, se presentan las características generales de las tecnologías de MSF y OI.

Cuadro 6.1. Características generales de las tecnologías de MSF y OI (adaptado de CRC Press, 2010)

Tecnología/Característica	MSF	OI
Principio físico-químico	Evaporación Instantánea	Solución-difusión
Consumo energético	Eléctrico: 2.5 - 5 kWh/m ³ Térmico: 40 - 120 kWh/m ³	Eléctrico: 3.5 - 4.5 kWh/m ³ Térmico: No hay
Costos totales de capital	Alto	Bajo
Costos operativos	Alto	Bajo para producir un producto de 250 mg/l de SDT Alto para producir un producto de 10 mg/l de SDT
Requerimientos de reemplazo de partes	Bajo a medio (bombas grandes especiales)	Alto (bombas grandes, reemplazo de membranas)

Cuadro 6.1 (continuación). Características generales de las tecnologías de MSF y OI (adaptado de CRC Press, 2010).

Tecnología/Característica	MSF	OI
Requerimientos de mantenimiento	Medio	Alto
Consumo de químicos	Alto	Alto
Tasa de conversión (producto/agua de alimentación)	0.1-0.2	0.3-0.5
Potencial para requerimientos adicionales	Bajo (se encuentra en límite tecnológico)	Alto
Áreas más necesitadas en I+D	Materiales de bajo costo Materiales para transferencia de calor más eficientes y de menor costo	Pre-tratamiento, membranas de alta duración, materiales de bajo atascamiento y bajo consumo energético

La principal ventaja del proceso de MSF, es el conocimiento disponible de la tecnología. Sin embargo, es probable que se encuentre su límite de desarrollo tecnológico. Debido a esta limitación y en conjunto con el desarrollo esperado para la OI, puede estimarse que la tecnología de MSF no continúe creciendo y siendo mejorada al ritmo que aparentemente lo hará la OI. Se estima que la investigación en nuevos pretratamientos, la manufactura de elementos de alta resistencia, la formulación de materiales de bajo atascamiento y requerimiento de energía, en conjunto con el aumento en el conocimiento de la OI y la transferencia de estos a los niveles operativos, permitirá a la tecnología de OI a ser más adaptada a variables específicas de la calidad de agua y de operación. No obstante, se debe invertir muchos esfuerzos en el desarrollo de la OI, con el fin de alcanzar una tecnología para desalación más efectiva y costo eficiente (CR Press, 2010).

Con el fin de mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos, se debe tomar en cuenta no sólo los costos de capital y de operación, sino también los costos ambientales y del recurso (CR Press, 2010).

Los costos totales para los sistemas de desalación, son muy variables entre las diferentes locaciones donde se ubiquen. Por esta razón, es difícil e inadecuado, el comparar los costos unitarios de locaciones que no poseen las mismas características. Los factores más importantes de la heterogeneidad de los costos, son:

- Disponibilidad de los recursos de agua; específicamente, la cantidad, calidad y la proximidad a los usuarios finales
- Tecnología para desalación y capacidad de la planta
- Costos ambientales y de energía
- Regulaciones específicas en el sector de agua
- Eficiencia en el servicio
- Inversiones en el mantenimiento de las redes

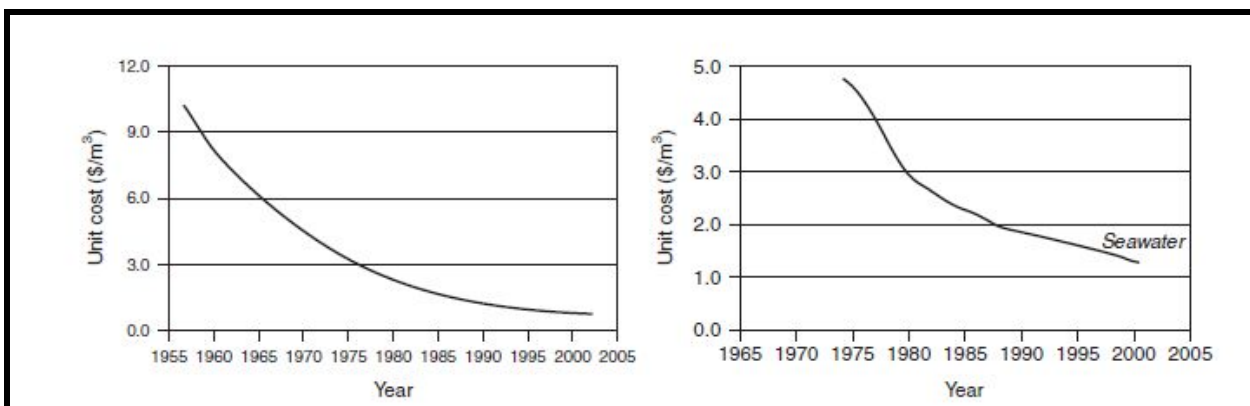
6.1 Costos de capital y de operación

6.1.1 Evolución de los costos de desalación

Los costos operativos para la producción de agua desalada, han disminuido de manera constante durante las últimas décadas, gracias a los avances tecnológicos continuos. Sin embargo, continúa siendo una opción de abastecimiento de agua costosa, al compararse con los recursos de agua naturales subterráneos y superficiales. Se estima que en un futuro cercano, la desalación será una alternativa competitiva, incluso en las regiones que no se encuentran con estrés hídrico. Es importante anotar, que los costos para fuentes de agua convencionales se espera aumenten, mientras los costos para desalación se espera disminuyan mientras se mejora la tecnología (CR Press, 2010).

En la Figura 6.1, se presentan la evolución de los costos para desalación en las últimas décadas, para MSF y OI. Como puede observarse, los costos para MSF desde la década de 1960 hasta el año 2000, han disminuido de aproximadamente 7 a 9 US\$/m³ a menos de 1 US\$/m³. Una tendencia similar se observa para la desalación de agua por OI, donde el costo ha disminuido desde 3 a 5 US\$/m³ a finales de 1970 hasta menos de 1 US\$/m³ en la actualidad (CR Press, 2010).

Figura 6.1. Evolución de los costos unitarios de procesos de desalación por: a) MSF y b) OI (CR Press, 2011)



Estas reducciones importantes de costos, han ocurrido en tres áreas principales: capital, energía y de operación y mantenimiento. Esta reducción en los costos se ha debido principalmente a:

- Desarrollos tecnológicos
- Incremento en el tamaño de los sistemas de potabilización
- Menores tasas de interés
- Menores costos energéticos
- Cambios en la gerencia del desempeño de las empresas
- Competición intensa entre los proveedores de equipos a nivel mundial

Se debe hacer énfasis en que los costos del agua de las plantas de desalación existentes, varían de manera importante y no son comparables completamente debido a diferencias en los factores de determinación de costos. Estos factores determinantes para los costos, específicos de cada sitio, dependen de un número de variables como: características del agua de alimentación, calidad del agua producto, capacidad de la planta, disposición del concentrado, requerimientos de espacio, aspectos de operación y mantenimiento, locación geográfica, disponibilidad de energía, etc. Entre ellos, el factor más crítico es el consumo energético y su disponibilidad; esto determina no sólo el costo final si no, muchas veces la metodología de desalación. Por ende, la mayoría de los sistemas por MSF operan en países donde se produce petróleo (Golfo Pérsico), mientras los sistemas de OI son más comunes en los lugares donde existe un faltante de fuentes de agua dulce y una buena fuente disponible de agua de mar. A pesar de la variabilidad de factores que afectan el costo final de la desalación, se pueden realizar observaciones generales sobre costos, de acuerdo a el tipo de agua de alimentación, capacidad de la planta, fuente de energía y tecnología de desalación (CR Press, 2010).

6.1.2 Costo del agua desalada con respecto a la naturaleza del agua de alimentación y la capacidad del sistema

La cantidad de sal a remover afecta de manera significativa el costo de desalación. En general, entre más sales se remuevan, más costoso el proceso de desalación. El costo de desalar agua de mar puede ser de 3 a 5 veces el costo de desalar agua salobre. La capacidad de la planta, también impacta el costo de desalación, siendo generalmente más económicas las plantas más grandes.

En el Cuadro 6.2, se presentan los costos de desalación de acuerdo a la naturaleza del agua de alimentación y la capacidad de la planta (CR Press, 2010).

Cuadro 6.2. Costo del agua producida de acuerdo al tipo de agua desalada y el tamaño de la planta.

Tipo de agua de alimentación	Capacidad de la planta (m³/día)	Costos (€/m³)
Salobre	< 1 000	0.63 - 1.06
	5 000 - 60 000	0.21 - 0.43
Agua de mar	< 1 000	1.78 - 9.00
	1 000 - 5 000	0.56 - 3.15
	12 000 - 60 000	0.35 - 1.30
	> 60 000	0.40 - 0.80

El Cuadro 6.2 señala consideraciones importantes a la hora de seleccionar el tipo de agua por desalar y el tamaño del sistema de tratamiento.

6.1.3 Costos de desalación respecto a la fuente de energía

Los procesos de desalación, requieren de cantidades significativas de energía para alcanzar la separación de las sales del agua de mar. Las plantas existentes de MSF y OI utilizan comúnmente fuentes de energía convencionales (gas, petróleo, electricidad), al ser estas fuentes la forma más económica de satisfacer los requerimientos energéticos de las desaladoras. Sin embargo, el uso de recursos energéticos renovables en los sistemas de desalación, promete una solución factible a la escasez de agua en áreas remotas donde el agua para consumo humano y la infraestructura convencional de energía no está disponible.

En el Cuadro 6.3, se comparan los costos de desalación respecto a la fuente de agua utilizada.

Cuadro 6.3. Costo del agua producida de acuerdo al sistema de suministro de energía (CR Press, 2010).

Tipo de Agua de Alimentación	Tipo de energía utilizada	Costo (€/m³)
Salobre	Convencional	0.21 - 1.06
	Fotovoltaica	4.5 - 10.32
	Geotérmica	2.00
Agua de mar	Convencional	0.35 - 2.70
	Eólica	1.00 - 5.00
	Fotovoltaica	3.14 - 9.00
	Colectores solares	3.50 - 8.00

Los sistemas de desalación que utilizan fuentes de energía renovable, pueden no competir actualmente con los sistemas convencionales, en términos del costo directo del agua producida. Sin embargo, su aplicación se ha estado expandiendo en ciertas áreas y parece claro que se convertirán, en un futuro, en una aplicación competitiva a las plantas que utilizan fuentes de energía convencionales, debido a que los precios de los combustibles continúan en alza y las fuentes de combustible disminuyen.

6.1.4 Costos de la desalación del agua respecto al tipo de tecnología de desalación

Generalmente, los sistemas MSF son más costo intensivos, pero usualmente tienen mayores capacidades de producción que la OI. Como se ha mencionado, se utilizan mayoritariamente en países donde se produce petróleo, donde la disponibilidad de combustible no es un factor limitante, como los países del Golfo Pérsico; en los cuales la desalación térmica representa un 90% del total de la producción de agua desalada. La desalación por OI, se desarrolló como una tecnología para desalación más flexible y económica y ha venido ganando terreno a nivel mundial en los últimos años, al disminuir el costo de las membranas y su operación. Durante los últimos años, y gracias a estos costos reducidos, ha venido creciendo la instalación de sistemas por OI en plantas de gran tamaño y se ha aplicado tanto para la desalación de agua salobre como la de mar; en oposición a la MSF, la cual se utiliza raramente para la desalación

de agua salobre, debido a su mayor consumo energético a baja salinidad en comparación con la OI.

En el Cuadro 6.4, se presentan los costos de desalación con relación al método de desalación utilizado y el tamaño de la planta.

Cuadro 6.4. Costo del agua producida de acuerdo al método de desalación y el tamaño del sistema (CR Press, 2010).

Método de desalación	Tipo de agua de alimentación	Capacidad de la planta (m³/día)	Costo (€/m³)
MSF	Agua de mar	23 000 - 528 000	0.42 - 1.40
OI	Agua salobre	< 20	4.50 - 10.32
		20 - 1 200	0.62 - 1.06
		40 000 - 46 000	0.21 - 0.43
	Agua de mar	< 100	1.20 - 15.00
		250 - 1 000	1.00 - 3.14
		1 000 - 4 800	0.56 - 1.38
		15 000 - 60 000	0.38 - 1.30
		100 000 - 320 000	0.36 - 0.53

De los datos del cuadro anterior, se puede concluir que no existen diferencias significativas en el costo por m³ de agua producida cuando se utiliza OI o MSF para desalación de agua marina. Sin embargo, como se presenta en el Cuadro 6.1, la demanda de energía por m³ de agua producida es significativamente mayor cuando se opera con la tecnología de MSF en lugar de OI. Esta diferencia se debe a la ausencia de demanda de energía termal en las plantas de OI. Por ende, los costos de desalación deben ser evaluados en términos de demanda de energía por m³ de agua producto. Los costos similares entre la OI y MSF que se muestran en el Cuadro 6.4, se deben a la variabilidad de los costos energéticos, que dependen en el país donde la planta desaladora será instalada.

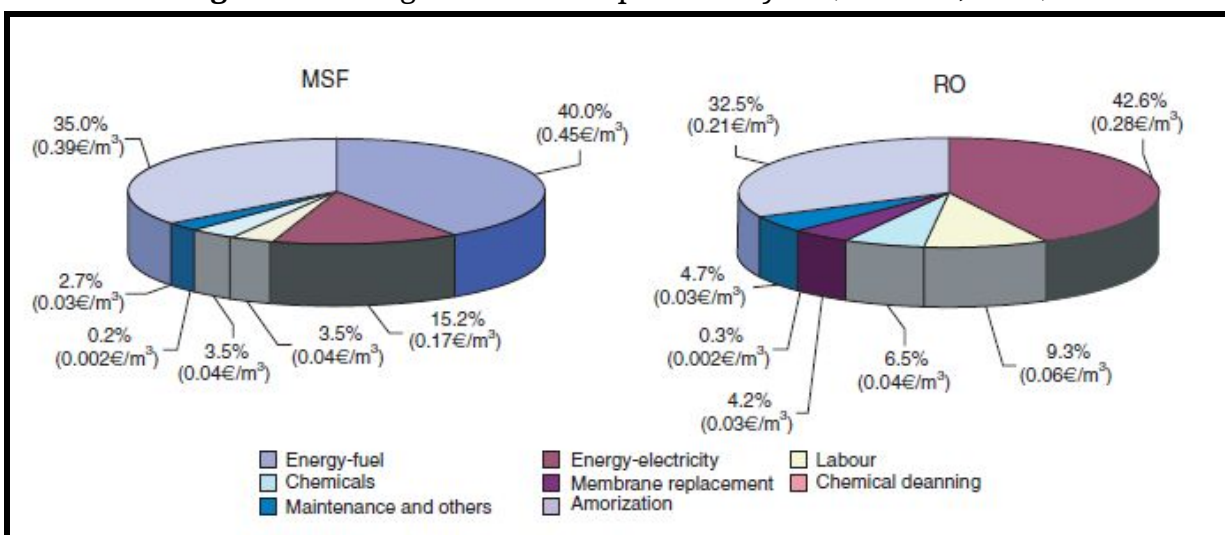
6.1.5 Desglose de los costos de desalación

Los análisis económicos de una planta de desalación se basan en factores técnicos y económicos determinantes, como los costos por: capital, energía, mano de obra,

químicos, materiales y consumibles que son específicos de la locación, el tipo de proceso, la capacidad de la planta, la calidad del agua de alimentación, la disponibilidad de energía, los requerimientos de pretratamiento, la salinidad del agua producto y otros costos relacionados con el sitio, como el terreno y la disposición de la salmuera.

Los costos de amortización, representan una porción importante del costo total, aproximadamente un tercio del total para MSF y OI. El mayor factor de costo de las plantas desaladoras se genera en el consumo energético, alcanzando hasta un 55.2% para MSF (incluyendo combustible y consumo de electricidad) y 42.6% para OI (CR Press, 2011). En la siguiente figura se presenta un desglose de la composición de costos para MSF y OI.

Figura 6.2. Desglose de costos para MSF y OI (CR Press, 2011)



6.1.6 Costo del Tratamiento - Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos

En las etapas iniciales de un proyecto de desalación, se debe trabajar en modelos de predicción de costos que puedan estimar los costos completos de un proyecto de este tipo con el fin de conseguir los recursos o financiamiento necesario. No se pueden generalizar los costos de un proyecto de este tipo porque dependen de cada caso específico, sin embargo, en este apartado, se pretenden exponer algunos aspectos básicos que deben considerarse al realizar estimaciones de costos para un proyecto de desalación.

Los costos de un proyecto de este tipo, generalmente se clasifican en dos categorías:

1. **Costos de capital:** incluyen el costo de los equipos, materiales y mano de obra para construir la planta desaladora; además de los costos de permisos, diseños, construcción y financiamiento del proyecto.
2. **Operación y mantenimiento (O&M):** incluye los costos de mano de obra, energía, insumos químicos y otros consumibles (membranas, filtros de cartucho, entre otros) necesarios para operar y mantener la planta desaladora. También se deben incluir los costos asociados para la disposición de residuos, administración de proyectos, monitoreo ambiental y cumplimiento de permisos.

Estos costos se evalúan para determinar el costo total del agua y para desarrollar el costo de ciclo de vida del proyecto.

6.1.6.1 Costos de capital

Se incluyen dos componentes principales para los costos de capital:

1. **Costos de construcción:** incluyen el costo del equipo, edificios, tuberías y otras estructuras físicas que comprenden el proyecto, incluyendo los costos generales y administrativos del contratista, seguros, utilidades y financiamiento. Pueden llegar a representar un 60 a 80 por ciento del total de los costos de capital.
2. **Costos indirectos:** costos por ingeniería, aspectos ambientales y de emplazamiento, servicios legales, administrativos y financieros necesarios para planificar, diseñar y tramitar los permisos del proyecto. Pueden llegar a representar entre un 20 a 40 por ciento del costo total de capital.

Los costos de construcción de un proyecto de desalación, dependen de muchos factores, dentro de los cuales se mencionan los siguientes:

1. Calidad del agua de alimentación
2. Calidad solicitada del agua tratada
3. Capacidad del proyecto de desalación (tamaño)
4. Tipo de toma y distancia a la planta
5. Medios para llevar el agua a los usuarios - consumidores
6. Medios para disposición de residuos (concentrado y sólidos del pretratamiento)
7. Aspectos de sitio y de desarrollo:
 - a. disponibilidad y costo del terreno
 - b. condiciones geotécnicas
 - c. desarrollo del sitio
 - d. uso del suelo
 - e. restricciones del plan regulador

- f. requerimientos ambientales y de permisos
- g. preocupaciones comunales
- h. disponibilidad y costo de la energía
- i. acceso

La calidad de agua de la fuente, definirá el nivel de tratamiento y el tipo de proceso de desalación requerido, además de definir los pretratamientos necesarios previos al proceso de desalación.

A continuación se describen brevemente algunos de los factores que afectan los costos de capital.

Calidad del agua de alimentación

Dos aspectos principales en la calidad del agua de alimentación afectan los costos de un proyecto de desalación.

1. la presencia de sólidos suspendidos inorgánicos y orgánicos
2. la presencia de sustancias disueltas, incluyendo los SDT y otros contaminantes disueltos inorgánicos y orgánicos.

Requerimientos de agua producto

En general, al aumentar los requerimientos de calidad de agua producida se aumentan los costos de la misma. Los operadores deben definir los requerimientos mínimos que deben satisfacerse con el proceso de desalación; en algunas ocasiones esto conlleva a utilizar membranas con mayor capacidad de rechazo o el uso de un segundo paso de agua ya sea parcial o completo; lo que resulta en un incremento con los costos de capital y de O&M.

Toma de agua cruda

La desalación de agua de mar requiere un sistema de toma de agua cruda capaz de proveer una cantidad confiable de agua marina de calidad consistente. Para alcanzar estos objetivos, es esencial realizar una evaluación detallada de las condiciones de sitio. Se debe evaluar las características físicas y oceanográficas, el efecto potencial de contaminación, navegación y atascamiento por organismos marinos.

Debido a requerimientos ambientales estrictos, un sistema moderno de toma de agua, puede llegar a representar hasta un 50% del costo de capital de algunos proyectos de desalación (AWWA, 2011).

Almacenamiento y transporte de agua producida

El almacenamiento y transporte del agua producida a los usuarios, puede resultar en un costo significativo del proyecto. Estos costos dependen del volumen de almacenamiento y de la longitud, tamaño y material de construcción de las tuberías requeridas para llevar el agua los clientes. Estos costos varían considerablemente de proyecto a proyecto y pueden llegar a costar igual que el tratamiento en sí, dependiendo del tamaño del almacenamiento y la distancia a los usuarios.

Disposición del concentrado/salmuera

En sistemas de desalación de agua marina por OI, la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) del agua de rechazo o concentrado, es usualmente 1.5 a 2 veces la del agua de mar.

En la mayoría de plantas de desalación de agua marina, el concentrado se retorna de vuelta al mar, en una manera que facilita la dispersión del mismo y su asimilación. Los costos de disposición del concentrado son muy variables y dependen en la sensibilidad del medio ambiente en el sitio de disposición y el volumen y calidad del agua de rechazo.

El costo de un sistema de disposición de las aguas de concentrado, puede representar desde un 5% hasta un 40% de los costos de capital del proyecto, dependiendo de la distancia de la disposición y la complejidad técnica de la misma.

Contingencia

En los proyectos de desalación, por mejor planeados que se desarrollen, muy probablemente surjan costos no esperados mientras se desarrolla el proyecto.

Esta contingencia se expresa típicamente como un porcentaje de los costos estimados de construcción; y en las etapas iniciales de planeamiento, este porcentaje puede representar más del 25% de costos constructivos estimados. Después de que los planos finales y las especificaciones fueran preparadas, el rubro por contingencia puede llegar a ser del 10%. Aún luego de que las ofertas por construcción sean recibidas, es necesario contar con un rubro por contingencia, con el fin de cubrir los costos no esperados que se presentan en la mayoría de proyectos de construcción.

6.1.6.2 Costos de operación y mantenimiento

Se dividen en costos fijos y costos variables. Los costos fijos incluyen la mano de obra y el reemplazo de las membranas. Los costos variables son lo que dependen directamente de la cantidad de agua que se desala; estos incluyen: energía, productos químicos, disposición del concentrado y otros costos misceláneos. Los costos totales de O&M es la suma de los costos fijos y variables por año.

Costos fijos de O&M

Mano de obra

Respecto a la mano de obra, los costos dependen de un número de factores, entre ellos:

1. La capacidad (tamaño) de la planta. Plantas pequeñas pueden operar con solamente uno o dos funcionarios permanentes, hasta con pequeños períodos de operación sin que requiera presencia. En contraste, plantas más grandes, típicamente requieren atención por operadores todo el tiempo, para mantener las rutinas de mantenimiento, generación de datos, etc.
2. La complejidad de la planta. Si los procesos de tratamiento son complejos, puede ser necesario contar con un número mayor y más capacitado de operadores.
3. Regulaciones locales y política de los dueños de los sistemas
4. Salarios locales

Reemplazo de membranas

Este costo se considera como un costo fijo, debido a que una vez que la membrana se pone en operación, se asume se inicia el proceso de degradación de la misma. Estimar los costos anuales de reemplazo de membranas es básicamente un función del número de membranas instaladas, el costo proyecto de reemplazo de membranas y la estimación de la vida útil de las mismas. La vida útil de las membranas, depende principalmente en la calidad del agua de alimentación y la efectividad del pretratamiento.

Se debe adicionalmente pensar en costos para reparación y reemplazo de equipos y piezas del sistema potabilizador.

Costos variables de O&M

Energía

Se debe tomar en cuenta todo el consumo energético del proyecto de desalación. Se requiere conocer el consumo de potencia requerido para bombear el agua de alimentación a la planta desde la fuente de agua, para bombear o llevar el agua los consumidores y la potencia requerida para el proceso de tratamiento.

El costo de la energía es un rubro muy importante de los costos de O&M de los sistemas de desalación.

Productos químicos

El tipo y cantidad de productos químicos requeridos en una planta desaladora puede variar significativamente de un proyecto a otro. Los costos de los productos químicos utilizados dependen de la cantidad y calidad del agua que va a tratarse y los requerimientos de calidad de agua producida. El consumo de químicos de otras plantas desaladoras en operación puede utilizarse para estimar las necesidades de químicos en el proceso de tratamiento. Si esta información no está disponible, pruebas piloto se realizan típicamente para cuantificar de mejor manera los requerimientos de productos químicos (AWWA, 2011).

Disposición de residuos

Los residuos de las plantas desaladoras incluyen la corriente de concentrado y los sólidos removidos del agua cruda previo al tratamiento por membranas. Se deben incluir todos los costos asociados para la disposición de las aguas de rechazo y residuos generados, ya sea que las aguas de rechazo se mezclen antes de ser dispuestas o se dispongan utilizando difusores y estrategias de difusión en el mar. Los costos por monitoreo de la calidad de agua en el área de descarga para cumplir con los requerimientos de permisos se deben incluir en los costos de O&M. Dependiendo de la legislación, los pretratamientos y los residuos generados se deberá tomar en cuenta el tratamiento de las aguas residuales generadas y demás residuos.

Cada proyecto de desalinización que se realice, debe estudiar detalladamente los costos de capital y de operación y mantenimiento. El detalle de los mismos mostrado anteriormente, varía de proyecto a proyecto y se incluye solamente con el fin de dar insumos básicos que deben ser considerados en las estimaciones de costos que se realicen en un proyecto de este tipo.

7 NORMATIVA VIGENTE Y TRAMITOLOGÍA

En este apartado, se presenta un detalle de Normativa y Regulaciones existentes en Costa Rica aplicables a la desalación de agua de mar. Es importante mencionar, que no se abarca toda la normativa relacionada con el tema y en caso de que se desee realizar e implementar un proceso de desalación, se debe consultar toda la normativa vigente y a las áreas respectivas de la institución directamente relacionados con un proyecto de este tipo. En resumen, podría existir regulaciones aplicables a un proyecto de desalación que no se encuentren indicadas en este capítulo.

7.1 Reglamento de Concesiones de Agua Marina para Desalinización, N° 35870-S-MINAET

El objeto de este Reglamento es: *“Establecer el procedimiento para la desalinización de agua marina”*.

En este decreto se definen los requisitos que deben ser presentados a la Dirección de Aguas del MINAET, conjuntamente con la solicitud de concesión de aprovechamiento de aguas.

Entre los requisitos solicitados, se rescatan los siguientes:

1. Llenar el formulario de solicitud que al efecto ponga a disposición la Dirección de Agua.
2. Autorización de la Municipalidad respectiva cuando la toma y las obras de conducción y descarga se encuentren dentro de la zona restringida de la zona marítima terrestre.
3. Viabilidad ambiental de la actividad de desalinización otorgada por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental de conformidad con el artículo 17 de la Ley Orgánica del Ambiente N° 7554. Para tales efectos la SETENA emitirá una Guía para esta actividad de conformidad con el Decreto Ejecutivo N° 34522 de fecha veintiséis de marzo de dos mil ocho.
4. Plano y certificación de propiedad correspondiente del área geográfica que se pretende aprovechar el agua.
5. Resumen general del proyecto con la descripción del proceso y la demanda de agua máxima.
6. Tipo y diseño de la toma del agua de alimentación.
7. Estudio hidrogeológico en donde se garantice y demuestre la viabilidad técnica de la toma propuesta, de tal forma que la misma no ocasione contaminación por intrusión salina a las aguas continentales.

Se define adicionalmente los tipos de tomas de agua autorizados y la manera en que se debe descargar la salmuera y los requisitos que deben presentarse para los mismos.

Según funcionarios de AyA que participa en un proceso de desarrollo de reglamentación con MINAE, se indica que este decreto se va a derogar y que actualmente las áreas técnicas y legales trabajan en un decreto sustituto que se llamará: Reglamento para Evaluación, Aprobación, Instalación y Operación de Plantas

de Desalinización. Este documento se trabaja en conjunto con las siguientes instituciones:

1. AyA
2. Dirección de Aguas - MINAE
3. Ministerio de Salud
4. Instituto Costarricense de Turismo
5. Setena
6. Sistema Nacional de Áreas de Conservación

7.2 Reglamento para la calidad de agua potable, Decreto Ejecutivo N° 38924-S

Este reglamento tiene por objetivo: *“Establecer los límites máximos permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos para el agua potable, a fin de garantizar su inocuidad y la salud de la población”*.

7.3 Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, Decreto N° 33601-S-MINAE

Este Reglamento tiene por objetivo: *“la protección de la salud pública y del ambiente, a través de una gestión ambientalmente adecuada de las aguas residuales.”*.

El ámbito de aplicación es: *“El presente reglamento será de aplicación obligatoria en todo el territorio nacional en relación con el manejo de las aguas residuales, que independientemente de su origen sean vertidas o reusadas”*.

Según algunas averiguaciones realizadas, se indica que este reglamento se está analizando por parte de MINAE, con el fin de incluir aspectos relacionados con las aguas vertidas en los procesos de desalación.

7.4 Trámites ante La Secretaría Técnica Nacional, SETENA

Según consulta realizada al funcionario representante por AyA ante Setena, se indica que esta secretaría trabaja actualmente en el desarrollo de términos de referencia para proyectos de desarrollo que involucran plantas desaladoras. Se indica que según el tipo de proyecto desarrollado y su magnitud, el Departamento de Evaluación Ambiental (DEA) de la SETENA, solicita el Formulario de Evaluación Ambiental D1 y adicionalmente a este formulario se aplicarán otros instrumentos de evaluación ambiental como: Declaración Jurada de Compromisos Ambientales, Pronóstico-Plan de Gestión Ambiental o un Estudio de Impacto Ambiental dependiendo del tipo de proyecto y su impacto al medio ambiente.

Se indica que SETENA se enfoca en: Sitio de Toma, Sitio de Descarga y Tratamiento y Vertido de las Aguas Residuales.

7.5 Trámites ante el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, CFIA

El proyecto de desalación debe cumplir los requerimientos solicitados por el CFIA.

7.6 Especificación técnica para desalinización y potabilización de agua marina, AyA

Se trabaja en el AyA, a través de la Dirección de Normativa y Control en el desarrollo de especificaciones técnicas para los procesos de desalación, donde se establecen requisitos técnicos generales para la potabilización de agua marina, aplicables a iniciativas públicas o privadas cuyo fin sea el abastecimiento de agua para consumo humano.

Esta especificación permitirá al AyA contar con una herramienta técnico-normativa valiosa aplicable a proyectos de desalación dentro de las competencias de AyA.

Como se mencionó, la reglamentación o normativa antes mencionada, no es la única aplicable a los procesos de desalación; se mencionan como insumo básico para el desarrollo de un proyecto de este tipo.

Adicionalmente, existe normativa local de organismos como AWWA, ASTM y otros que son aplicables al tema de la desalación. Algunas de estas se referencian en este texto.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El agua de mar se ha convertido en una fuente de agua para el abastecimiento de agua potable, la agricultura, el riego y la industria; lo anterior mediante procesos de desalación de agua marina.
2. Las obras de captación de agua marina son estructuras vitales para el buen funcionamiento de las plantas desaladoras. Para la correcta ubicación, selección y dimensionamiento de las mismas se requieren de estudios básicos importantes y un grupo multidisciplinario de profesionales.
3. Existen numerosas tecnologías para desalar el agua de mar, entre ellas, tecnologías muy consolidadas, probadas y mejoradas durante las últimas décadas y otras tecnologías que actualmente se encuentran en desarrollo. Las tecnologías actualmente más utilizadas son la desalación mediante el Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa (MSF, mayormente utilizado en países que poseen recursos energéticos) y Ósmosis Inversa (OI).
4. Según las referencias bibliográficas consultadas, las tecnologías por evaporación térmica o destilación, se encuentran en su límite tecnológico; mientras que las tecnologías por membranas presentan bastantes campos para desarrollar y mejorar su tecnología.
5. Cualquier proyecto de desalación de agua marina, al igual que los proyectos de potabilización de agua dulce, requieren de importantes estudios básicos que definirán el éxito y buen funcionamiento de la tecnología implementada.
6. Para la correcta selección y definición de los pretratamientos y tratamiento principal se debe contar con un registro histórico importante de calidad de agua, según se define en el Apartado 3. Calidad de Agua, de este informe. En el mismo apartado se presentan consideraciones importantes sobre calidad de agua.
7. La calidad de agua deseada que debe producir el sistema de potabilización, determina aspectos vitales del sistema de tratamiento. El cliente o dueño de la planta potabilizadora deberá definir la calidad de agua deseada, con base en la normativa o guías nacionales e internacionales vigente; un ejemplo de este aspecto se refiere a los requerimientos de calidad respecto al parámetro Boro.
8. Existe una cantidad muy importante de operaciones y procesos unitarios utilizados como pretratamientos para los sistemas de desalación. La calidad de

agua cruda y de alimentación a los mismos, definirá estos procesos; así como la disponibilidad tecnológica y experiencia del diseñador.

9. La mayoría de procesos de desalación utilizan una cantidad importante de productos químicos utilizados como oxidantes, agentes reductores, antiincrustantes y desinfectantes.
10. Existe una importante posibilidad de que las aguas una vez desaladas, deban recibir un postratamiento remineralizador con las sustancias necesarias en el agua para el ser humano.
11. Los sistemas de desalación mediante ósmosis inversa, actualmente cuentan con equipos recuperadores de energía, que aprovechan la energía disponible en el agua de rechazo y reducen apreciablemente el consumo energético de estos sistemas.
12. El consumo energético en los sistemas de desalación de agua marina es uno de los indicadores más importantes de la eficiencia de los mismos, y es uno de los costos de operación y mantenimiento más importantes para estos sistemas.
13. Con el fin de reducir al máximo los impactos ambientales relacionados con la toma de agua marina y la disposición de las agua de rechazo, se deben desarrollar extensos estudios ambientales y oceanográficos para cumplir adecuadamente con la legislación nacional y cualquier otra aplicable a estos procesos.
14. En los pretratamientos y en el tratamiento principal, se generan aguas residuales que deben ser estudiadas o estimadas sus calidades con el fin de determinar el tratamiento y disposición adecuada de las mismas.
15. Por la complejidad y lo costoso de los sistemas de desalación, la concepción e implementación de un proceso de este tipo, debe ser un proceso multidisciplinario y debe involucrar al menos las siguientes áreas: Programación y Control, Gestión Ambiental, Investigación y Desarrollo, Administración de Proyectos, áreas operativas (Subgerencia de Sistemas Periféricos), Subgerencia de Sistemas Comunales, Proveeduría, Dirección Jurídica, Recursos Humanos, entre otros.
16. Los costos de la desalación de agua marina son altos, pero han venido disminuyendo a través del tiempo y se espera se continúe con esta tendencia.
17. En un proyecto de desalación de agua marina, es importante identificar y evaluar los costos específicos de capital y de operación y mantenimiento del

proceso. Lo anterior para definir el tipo de tecnología, el tamaño (caudal) de la planta, la ubicación de la misma, las operaciones y procesos unitarios de la misma. En la Sección 6.1.6 (Costo del Tratamiento) de este informe, se presenta a manera de propuesta, un detalle de los costos mínimos que deben contemplarse al conceptualizar un proyecto de este tipo. Se recomienda revisar esta recomendación y ampliar en caso de que sea necesario.

18. En Costa Rica existe normativa técnica y regulaciones establecidas para el desarrollo de un proyecto de este tipo; en el Apartado 8 de este documento, se presentan algunos documentos y trámites necesarios para estos proyectos. Cabe indicar que no son los únicos documentos y trámites relacionados que existen. Actualmente, las instituciones públicas trabajan en conjunto y por su cuenta en el desarrollo de normativa técnica y legal relacionada a los procesos de desalación de agua marina.
19. Se recomienda la capacitación específica de las áreas involucradas en la concepción e implementación de un proyecto de desalación. Se debe fortalecer el área operativa con técnicos y profesionales especializados con conocimientos en química y tratamiento de agua para potabilizar.
20. Se recomienda contar con un grupo de buzos especializados y capacitados para la inspección y mantenimiento de la toma de agua, sus estructuras y el emisario de agua concentrada.
21. Se recomienda el acompañamiento a las comunidades beneficiadas de un área profesional en Gestión Social.

9 REFERENCIAS

- Almada, C. (12 de Octubre de 2012). *Desalinización del agua para consumo humano*. Obtenido de <http://desalinizacionaguaparaconsumohumano.blogspot.com/>
- American Water Works Association, (2011). *Desalination of Sea Water, AWWA Manual M61*. Primera Edición.
- Crittenden, J. C., Montgomery Watson Harza, & Wiley InterScience. (2012). *MWH's water treatment principles and design*. Hoboken, N.J.: John Wiley and Sons.
- Delgado Díaz, S. (2011). *Evaluación de Tecnologías Potenciales de Reducción de Contaminación de las Aguas de Canarias*. Canarias: Universidad de La Laguna.
- MINSA (2015). *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. Decreto Ejecutivo 38924-S. Publicado por la Imprenta Nacional en el Diario Oficial La Gaceta N° 170 del 01-sep-2015.
- MINAET (2010). *Reglamento de Concesiones de Agua Marina para Desalinización*. Decreto Ejecutivo 35870-S-MINAET. Publicado por la Imprenta Nacional en el Diario Oficial La Gaceta N° 170 del 01-sep-2015.
- MINAET (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. Decreto Ejecutivo 33601-S-MINAE. Publicado por la Imprenta Nacional en el Diario Oficial La Gaceta N° 55 del 19-abr-2007.
- Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. (2011). *Asistencia Técnica en la Evaluación de Impacto Ambiental de Vertidos Líquidos y de Actuaciones en el Medio Marino*. Madrid, España: Gobierno de España.
- Ministerio de Sanidad y Política Social (2009). *Guía de Desalación: Aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano*. Madrid, España.
- Parker, C. R. (1972). *Water Analysis by Atomic Absorption Spectroscopy*. Springvale, Australia: Varian Techtron Pty. Ltd.
- World Health Organization (2011). *Guidelines for Drinking - water Quality*. Fourth Edition. Geneva, Suiza. WHO.
- WHO (2011). *Safe Drinking-water from Desalination*. Fourth Edition. Geneva, Suiza. World Health Organization.