



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**GUÍA DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DESALACIÓN DE
AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

MARLON MIRANDA GÓMEZ



MÉXICO D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Ing. Rodolfo Torres Barrera
Vocal:	Dr. Néstor Noé López Castillo
Secretario:	Dra. Rosa María Ramírez Zamora
1er Suplente:	Dr. Alfonso Durán Moreno
2do Suplente:	Dr. José Agustín García Reynoso

El desarrollo del siguiente trabajo tuvo lugar en las instalaciones de la Coordinación de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Rosa María Ramírez Zamora

Asesor de tema

Marlon Miranda Gómez

Sustentante

ÍNDICE

I.	Glosario: _____	6
II.	Lista de Abreviaturas _____	10
III.	Lista de tablas _____	11
IV.	Lista de figuras _____	12
V.	Resumen _____	16
VI.	Objetivos _____	18
1	ANTECEDENTES _____	19
1.1	Generalidades de los procesos con membrana _____	19
1.2	Disponibilidad de agua para potabilización _____	22
1.3	Legislación aplicable para el proceso de ósmosis inversa para desalación de agua de mar _____	26
1.4	Aplicaciones del agua desalada _____	27
2	DESARROLLO DE UNA GUÍA DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DESALACIÓN DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA _____	29
2.2	Características del agua de mar _____	30
2.3	Metodología para el diseño de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis Inversa _____	36
2.3.1	Obra de toma de agua de mar _____	36
2.3.2	Trenes de pretratamiento de agua cruda de mar _____	40
2.3.3	Principales elementos en un sistema de desalación por ósmosis inversa _____	42
2.3.3.1	Filtro de cartuchos _____	42
2.3.3.2	Bomba de alta presión _____	44
2.3.3.3	Válvula de regulación _____	46
2.3.3.4	Membrana de ósmosis inversa _____	46
2.3.3.4.1	Variables que influyen en el comportamiento de las membranas de ósmosis inversa _____	50
2.3.3.5	Recuperadores de energía _____	52
2.3.3.5.1	Recuperador de energía tipo Pelton _____	53
2.3.3.5.2	Recuperador de energía tipo turbocargador _____	54
2.3.3.5.3	Recuperador de energía tipo intercambiador isobárico ERI _____	55
2.3.3.5.3.1	Funcionamiento del recuperador de energía isobárico ERI _____	56
2.3.3.6	Materiales utilizados en los equipos de desalación de agua de mar _____	59
2.4	Postratamiento _____	61
2.5	Programas de cómputo comerciales para el diseño de sistemas de ósmosis inversa _____	63

3	ESTIMACIÓN DE COSTOS DE SISTEMAS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA	65
3.1	Costos de operación y mantenimiento de las plantas desaladoras	67
4	APLICACIÓN DE LA GUÍA DESARROLLADA EN UN EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA	69
4.1	Cálculo de consumos de energía	83
4.1.1	Cálculo de consumos energéticos con los diferentes recuperadores de energía	83
4.1.1.1	Cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida para un recuperador tipo ERI	84
4.1.1.2	Cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida para un recuperador tipo Turbocargador	84
5	CONCLUSIONES	87
6	REFERENCIAS	89
ANEXOS		96
A.1.	Procesos Térmicos para desalación de agua de mar	96
A.1.1.	Destilación por evaporación súbita multietapa (DFM)	96
A.1.2.	Destilación por múltiple efecto (DME)	98
A.1.3.	Destilación por compresión de vapor (DCV)	99
A.1.4.	Ventajas	101
A.2.	Obras de toma de agua de mar	103
A.2.1.	Obra de toma superficial de agua	103
A.2.1.1.	Filtros móviles	104
A.2.1.2.	Filtros pasivos	105
A.2.1.3.	Velocidad tope	106
A.2.2.	Obra de toma de agua de mar a través de pozos	108
A.2.2.1.	Pozo playero vertical	108
A.2.2.2.	Pozo radial	110
A.2.2.3.	Galerías de infiltración	111
A.3.	Tipos de pre tratamiento en desalación de agua de mar por ósmosis inversa	113
A.3.1.	Filtración en medio poroso	113
A.3.1.1.	Aplicación de la filtración con medio poroso	115
A.3.1.2.	Operación y mantenimiento	117
A.3.2.	Filtración en cartuchos	117
A.3.2.1.	Aplicación de la filtración con cartuchos	119
A.3.2.2.	Insumos requeridos	120
A.3.2.3.	Operación y mantenimiento	120
A.3.3.	Sedimentación	121
A.3.3.1.	Aplicación de la sedimentación	123

A.3.3.2.	Generación de residuos	124
A.3.3.3.	Operación y mantenimiento	124
A.3.4.	Microfiltración	125
A.3.4.1.	Aplicación de la microfiltración	128
A.3.5.	Ultrafiltración	130
A.3.5.1.	Aplicación de la ultrafiltración	132
A.3.6.	Desinfección	133
A.3.6.1.	Aplicación de la desinfección	134
A.3.7.	Ajuste de pH con ácidos	136
A.3.8.	Decloración	138
A.3.9.	Coagulación-floculación	139
A.3.10.1.	Aplicación de la coagulación-floculación	139
A.3.10.2.	Insumos requeridos	140

I. Glosario:

- Agua de alimentación: Agua de mar que es alimentada al equipo de desalación.
- Agua dulce: El agua dulce es agua que contiene cantidades mínimas de sales disueltas, especialmente cloruro sódico, distinguiéndose así del agua de mar o agua salobre.
- Agua potable: Aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.
- Agua producto: Agua dulce que es el producto del proceso de desalación.
- Agua salobre: Se llama agua salobre al agua que tiene más sal disuelta que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0.5 y 30 gramos de sal por litro.
- Anti incrustante: Reactivo químico usado para prevenir la precipitación en las membranas de compuestos poco solubles en agua.
- bar: Unidad de medida de la presión $1 \text{ bar} = 14.5 \text{ psi} = 0.99 \text{ atm}$.
- Biocida: Sustancias químicas sintéticas o de origen natural o microorganismos que están destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier organismo considerado nocivo para el hombre.
- Calor latente de condensación: Cantidad de energía liberada cuando el vapor pasa a estado líquido.
- Clarificación: Conjunto de procesos de pre tratamiento de agua usados para eliminar partículas suspendidas del agua. Se utiliza solamente la sedimentación para partículas que se remueven por diferencia de densidad y la coagulación-floculación-sedimentación cuando las partículas tienen carga y no sedimentan por sí mismas.
- Coagulación: Proceso de pre tratamiento usado para desestabilizar partículas con carga, para formar finos aglomerados y posteriormente,

partículas más grandes (floculación) y más fácilmente removibles por sedimentación.

- Desalación: Es el proceso de eliminar la sal del agua de mar o salobre.
- Destilación: Proceso donde un líquido es calentado para producir vapor. El vapor es luego condensado.
- Eficiencia de transferencia de energía en un recuperador de energía: Porcentaje de energía transferida de la corriente de rechazo de la ósmosis inversa a la corriente de agua de mar que entra al equipo de ósmosis inversa.
- Ensuciamiento: Contaminación química o crecimiento biológico en la superficie de las membranas de ósmosis inversa, u otro proceso que utilice membranas.
- Filtro multimedia: Es un dispositivo o sistema a presión o no que cuenta con varios tipos de medios de empaque del lecho de filtración, usados principalmente para remoción de sólidos de hasta 10 micras de tamaño.
- Floculante: Reactivo químico que permite que las partículas suspendidas desestabilizadas por coagulación se agrupen de forma que sean más fácilmente removidas.
- Galería de infiltración: Método usado para la recolección de agua de mar a ser tratada para desalación.
- Incrustación: Sustancia que precipita en las paredes del equipo durante el proceso de desalación.
- Microfiltración: Proceso de filtración por membrana, el cual sólo permite el paso de partículas a través de la membrana de tamaño de 0.1 a 1 micrómetros.
- Nano filtración: Proceso de filtración por membrana, el cual sólo permite el paso de partículas a través de la membrana de tamaño de 0.0008 a 0.0015 micrómetros.
- Ósmosis: Movimiento natural del agua de fluir de una solución diluida a una solución más concentrada. Permite el paso de partículas a través de la membrana de tamaño de 0.0001 a 0.0012 micrómetros.

- Ósmosis inversa: Proceso en el cual se fuerza al agua a pasar a través de una membrana semi-permeable, desde una solución más concentrada en sales disueltas a una solución menos concentrada, mediante la aplicación de presión, ocasionando que el agua fluya en sentido inverso al de la ósmosis.
- Permeado. Agua purificada por el proceso de membrana.
- Presión de saturación del vapor: Presión a la que las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio.
- Presión osmótica: Mínima presión requerida para evitar el paso de un disolvente puro a una disolución, separados por una membrana semipermeable.
- Rechazo. Agua residual del proceso de ósmosis inversa que usualmente tiene una alta concentración de sólidos disueltos.
- Recuperación. Porcentaje del agua alimentada que es recuperada en el proceso de desalación.
- Retrolavado de filtros multimedia: Es el lavado de los filtros, en el cual se hace pasar el flujo en sentido contrario del normal para remover los sólidos que retuvo el filtro.
- Salinidad: Es el contenido de sales (hipoclorito de sodio) soluble en el agua.
- Salmuera. Agua que contiene más de 50,000 ppm de sal.
- Sistema de recuperación de energía: Es un equipo incorporado en la planta desaladora para recuperar energía del proceso.
- Sólidos disueltos totales (SDT): Cantidad de sólidos que está disuelta en el agua, medidos en ppm.
- Sólidos suspendidos: Material coloidal que se encuentra suspendido en el agua, medidos en ppm.
- Sólidos suspendidos totales (SST): Cantidad de sólidos suspendidos en el agua que no están disueltos.
- Turbidez/Turbiedad: Falta de transparencia en el agua debida a la presencia de materia suspendida en el agua.

- Ultra-filtración: Proceso de filtración por membrana, el cual sólo permite el paso de partículas a través de la membrana de tamaño de 0.001 a 0.01 micrómetros.

II. Lista de Abreviaturas

OI: Ósmosis Inversa

ERI: Energy recovery device

DFM: Destilación por evaporación súbita multietapa

SDT: Sólidos disueltos totales

ppm: Partes por millón

COT: Carbón orgánico total

DME: Destilación por múltiple efecto

DCV: Destilación por compresión de vapor

UTN: Unidad Nefelométrica de Turbidez

SDI: Índice de densidad de sedimentos (Silt density index)

SST: Sólidos suspendidos totales

PVC: Policloruro de vinilo

CPVC: Policloruro de vinilo clorado

PP: Polipropileno

FRP: Fibra de vidrio reforzada

µm: micrómetro

PEAD: Polietileno de alta densidad

ICCE: Índice de Costos del *Chemical Engineering*

gfd: galones por pie cuadrado día

lmh: Litros por metro cuadrado hora

mgd: millones de galones por día

PVDF: Poli fluoruro de vinilideno

KWh/m³: Medida de la energía necesaria para producir un metro cúbico de permeado.

III. Lista de tablas

Tabla 1.1	Disponibilidad de agua en diferentes países_____	23
Tabla 1.2	Principales productores de agua desalada y porcentaje mundial de producción_____	25
Tabla 2.1	Composición estándar del agua de mar_____	32
Tabla 2.2	Ejemplos de composiciones de algunos mares_____	33
Tabla 2.3	Ejemplos de composiciones estimadas de agua de mar_____	33
Tabla 2.4	Solubilidades de algunos compuestos inorgánicos_____	35
Tabla 2.5	Criterios de selección de la obra de toma del agua de mar a alimentar a un sistema de desalación_____	36
Tabla 2.6	Comparativo entre los diferentes tipos de obra de toma de agua de mar_____	37
Tabla 2.7	Comparación de criterios de selección de tres diferentes recuperadores de energía de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa_____	59
Tabla 2.8	Selección del pretratamiento para los equipos de desalación de agua de mar por ósmosis inversa_____	62
Tabla 2.9	Selección del tren de postratamiento para los equipos de desalación de agua de mar por ósmosis inversa_____	63
Tabla 3.1	Intervalo de costos de inversión y de postratamientos para las principales tecnologías de desalación_____	66
Tabla 3.2	Costos de operación y mantenimiento para las principales tecnologías de desalación_____	68
Tabla 4.1	Análisis químico típico del agua de mar con 36000 ppm de concentración_____	69
Tabla 4.2	Comparación de consumos energéticos con los diferentes tipos de recuperador de energía_____	85
Tabla A-1	Eficiencia de remoción de un proceso DFM_____	101
Tabla A.2	Principales características de filtros_____	114
Tabla A.3	Resultados obtenidos por microfiltración_____	128

IV. Lista de figuras

Figura 1.1	Intervalos de tamaños de poros de procesos con membrana_____	19
Figura 1.2	Soluciones separadas por una membrana semipermeable_____	20
Figura 1.3	Fenómeno de ósmosis_____	20
Figura 1.4	Proceso de ósmosis inversa_____	21
Figura 1.5	Millones de m ³ producidos por día_____	24
Figura 1.6	Capacidad instalada de acuerdo a la tecnología_____	25
Figura 1.7	Principales usos de la desalación de agua de mar_____	28
Figura 2.1	Componentes principales de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa_____	29
Figura 2.2	Caracterización del agua de mar_____	31
Figura 2.3	Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, contenido de algas, alto COT y grasas_____	41
Figura 2.4	Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, COT y algas_____	41
Figura 2.5	Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, COT y algas_____	41
Figura 2.6	Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez y COT_____	42
Figura 2.7	Pretratamiento para agua de mar con baja turbidez_____	42
Figura 2.8	Filtro + portafiltro_____	44
Figura 2.9	Bomba centrífuga de múltiples etapas_____	45
Figura 2.10	Bomba de desplazamiento positivo_____	45
Figura 2.11	Válvula de regulación_____	46
Figura 2.12	Corte transversal de la membrana de ósmosis_____	47
Figura 2.13	Trayectoria del agua a través de la membrana de ósmosis_____	47
Figura 2.14	Estructura de la capa barrera de la membrana de ósmosis inversa_____	48
Figura 2.15	Elementos y composición de una membrana enrollada para ósmosis_____	49

Figura 2.16	Detalles del funcionamiento y elementos de una membrana enrollada para ósmosis inversa_____	49
Figura 2.17	Comportamiento en función de la presión_____	50
Figura 2.18	Comportamiento en función de la temperatura_____	50
Figura 2.19	Comportamiento en función del % de recuperación_____	51
Figura 2.20	Comportamiento en función de la concentración de sales en el agua cruda_____	51
Figura 2.21	Turbina Pelton_____	53
Figura 2.22	Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía Pelton_____	54
Figura 2.23	Turbo cargador_____	55
Figura 2.24	Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía turbo cargador_____	55
Figura 2.25	Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía ERI_____	56
Figura 2.26	Funcionamiento ERI 01_____	57
Figura 2.27	Funcionamiento ERI 02_____	57
Figura 2.28	Funcionamiento ERI 03_____	57
Figura 2.29	Funcionamiento ERI 04_____	58
Figura 2.30	Funcionamiento ERI 05_____	58
Figura 2.31	Resistencias de los inoxidables a los cloruros_____	60
Figura 2.32	Postratamiento del producto con ajuste de pH y/o cloración_____	61
Figura 2.33	Postratamiento del producto, segundo paso de ósmosis inversa y/o ajuste de pH y/o cloración_____	62
Figura 4.1	Flujos de trabajo de acuerdo a diseño_____	70
Figura 4.2	Pantalla 1, información detallada del agua de mar_____	74
Figura 4.3	Pantalla 2, arreglo del equipo de ósmosis inversa_____	76
Figura 4.4	Ejecución del programa_____	76
Figura 4.5	Pantalla 3, resultados del cálculo de la ósmosis_____	77
Figura 4.6	Programa de cálculo del recuperador de energía tipo ERI_____	78
Figura 4.7	Pantalla 2, resultados del recuperador de energía_____	79

Figura 4.8	Ejemplo de cómo presenta el fabricante la Información necesaria para poder correr el programa_____	81
Figura 4.9	Ejemplo de los resultados que presenta el programa con recuperador de energía tipo turbo cargador_____	82
Figura A.1	Arreglo básico de un proceso por DFM para desalación_____	97
Figura A.2	Arreglo básico de un proceso por DME para desalación_____	98
Figura A.3	Arreglo básico de un proceso por DCV para desalación_____	99
Figura A.4	Arreglo básico de un proceso por DCV para desalación_____	100
Figura A.5	Obra de toma abierta para sistemas de desalación por ósmosis__	104
Figura A.6	Filtro móvil_____	104
Figura A.7	Filtro pasivo 01_____	105
Figura A.8	Filtro pasivo 02_____	106
Figura A.9	Velocidad tope 01_____	106
Figura A.10	Velocidad tope 02_____	107
Figura A.11	Pozo vertical 01_____	109
Figura A.12	Pozo vertical 02_____	109
Figura A.13	Pozo radial 01_____	110
Figura A.14	Pozo radial 02_____	110
Figura A.15	Galería de infiltración 01_____	111
Figura A.16	Galería de infiltración 02_____	111
Figura A.17	Esquema simplificado de los filtros a presión_____	114
Figura A.18	Esquema simplificado de los filtros de cartuchos_____	118
Figura A.19	Esquema simplificado de un sedimentador en pretratamientos de_	121
Figura A.20	Diagrama de un tren de pretratamiento de agua salada por coagulación, floculación y sedimentación_____	122
Figura A.21	Diagrama de proceso de un sedimentador circular en_____	123
Figura A.22	Membranas de filtración con flujo tangencial_____	125
Figura A.23	Membranas tubulares de microfiltración_____	126
Figura A.24	Membranas de filtración de flujo perpendicular_____	126
Figura A.25a	Membranas de filtración de fibra hueca_____	127
Figura A.25b	Membrana de filtración de fibra hueca sin casco_____	127

Figura A.26 Diagrama de proceso de una membrana espiral enrollada de ultrafiltración _____ 131

V. Resumen

En este trabajo de tesis de licenciatura se presenta la metodología propuesta de una guía para el diseño y operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

Este documento se compone de cuatro capítulos principales. En el primero denominado “Antecedentes” se presentan las generalidades del proceso de ósmosis inversa, la problemática de la disponibilidad de agua dulce, las diferentes alternativas para paliar dicha problemática, en particular, los procesos de desalación de agua de mar, la legislación relacionada con el agua desalada y las aplicaciones de ésta.

El segundo capítulo es propiamente el desarrollo de la Guía para el diseño y operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. En este capítulo se hace una descripción y criterios de selección o de diseño de los principales componentes de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. El proceso inicia con la obra de toma de agua de mar, continúa con el pretratamiento que permitirá acondicionar la calidad del agua para ser alimentada al proceso de ósmosis de inversa, para tratar de disminuir los contaminantes que causen ensuciamiento o bioensuciamiento de la membrana. Posteriormente, se describen los principales elementos del equipo de ósmosis inversa y, finalmente se presentan los post tratamientos del producto de la ósmosis inversa para poder un agua con la calidad que se le dará (potable, riego, etc.).

En el tercer capítulo se desglosan y ejemplifican los principales costos involucrados con la construcción, operación y mantenimiento de los principales sistemas de desalación de agua de mar. En este capítulo se mencionan los principales factores que afectan la inversión de un planta desaladora de agua de mar y se hace un comparativo de los costos de inversión, operación y mantenimiento entre las diferentes tecnologías para desalar agua de mar.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presenta un ejemplo práctico de la aplicación de la guía desarrollada en esta tesis para el diseño y operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

VI. Objetivos

Objetivo General

Elaborar una guía para el diseño y operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

Objetivos específicos

- Identificar y describir los principales componentes de los sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.
- Proponer y justificar criterios de diseño y operación de los principales componentes identificados para los sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.
- Especificar y comparar los costos de inversión y de operación y mantenimiento de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa y otras tecnologías, en función de su capacidad.
- Aplicar la guía elaborada en el diseño de un sistema de desalación de agua de mar estándar con 36000 ppm de SDT por ósmosis inversa.

1 ANTECEDENTES

1.1 Generalidades de los procesos con membrana

La ósmosis inversa es el nivel más fino de filtración disponible (Figura 1.1) al actuar como una barrera contra las sales disueltas, moléculas inorgánicas y orgánicas con pesos moleculares cercanos a los 100 g/mol. Por otra parte, las moléculas de agua pasan libremente a través de la membrana produciéndose así agua baja en sales.^{4, 5}

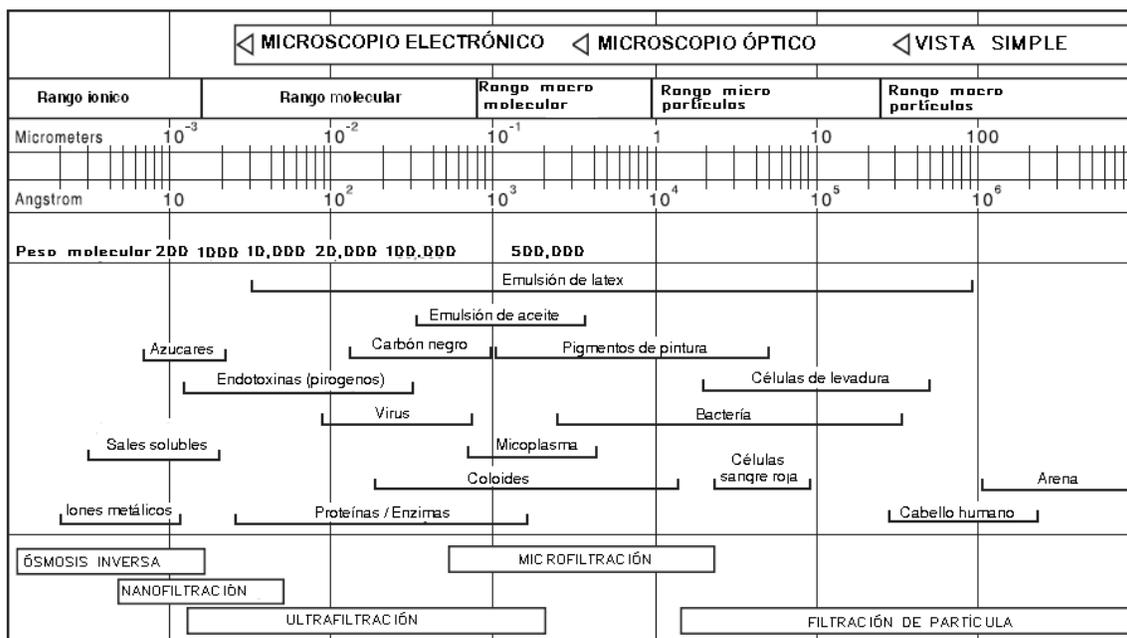


Figura 1.1 Intervalos de tamaños de poros de procesos con membrana (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

La desalación por ósmosis inversa permite la separación de sales del agua por medio de una membrana semipermeable que permite el paso del líquido pero no de las sales.^{2, 8}

La ósmosis inversa se basa en el fenómeno de ósmosis, que es un proceso físico-químico relacionado con el comportamiento del agua como solvente de una solución ante una membrana semipermeable respecto al solvente (agua) pero que retiene los solutos, la ósmosis es una difusión simple del agua a través de la membrana sin gasto de energía. La ósmosis se presenta cuando se tienen dos

soluciones con distintas concentraciones de sales y éstas están separadas por una membrana semipermeable (Figura 1.2). El agua con baja concentración en sales tiende a fluir a través de la membrana hacia el lado con alta concentración en sales actuando como solvente hasta alcanzar una cierta altura (Figura 1.3).

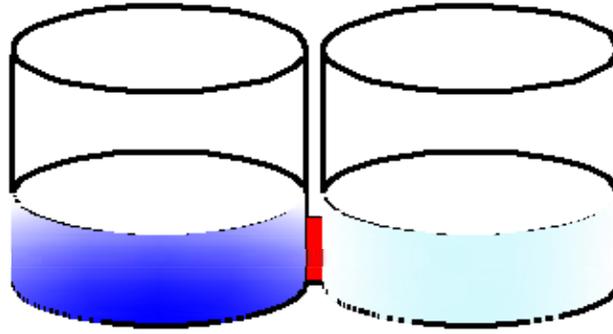


Figura 1.2 Soluciones separadas por una membrana semipermeable.

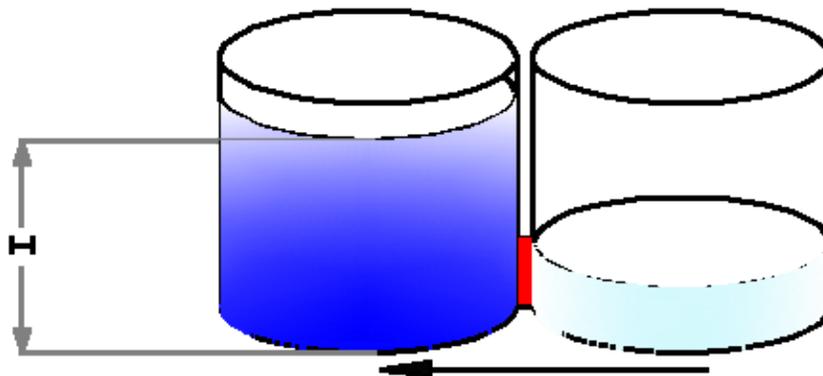


Figura 1.3 Fenómeno de ósmosis.

La altura (H) representa una presión y se le conoce como presión osmótica.

Si se aplica una presión igual o mayor a la presión osmótica del lado donde se encuentra la alta concentración en sales, el agua fluirá en sentido inverso (Figura 1.4).

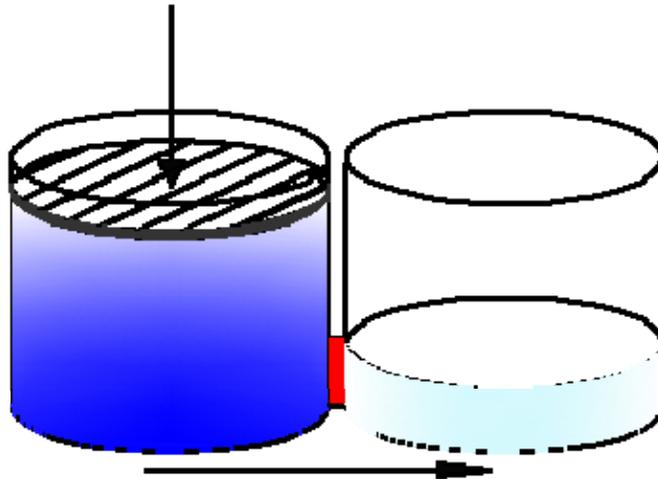


Figura 1.4 Proceso de ósmosis inversa.

A este proceso se le conoce como ósmosis inversa ya que implica el proceso inverso a la ósmosis. Este principio se utiliza para separar sales de una solución, la separación que se puede obtener usando este proceso es cercana al 99% de las sales, obteniendo agua de muy buena calidad que dependiendo del uso que se le quiera dar podrá o no tener un tratamiento adicional.^{1, 2, 5, 6, 8}

La presión necesaria en el proceso de ósmosis inversa depende principalmente de la temperatura y de la concentración en sales de la solución que se quiera tratar y deberá ser mayor a la presión osmótica para lograr que el agua fluya a través de la membrana, obteniendo así agua con un contenido menor en sales.⁵

En la actualidad el fenómeno de ósmosis inversa se aplica para desalar agua de mar y así producir agua baja en sales que puede ser usada para consumo humano.

Con la creciente demanda y la escasez de agua, la desalación de agua de mar representa una fuente importante de agua y gracias a los avances en las tecnologías para desalar agua esto se puede llevar a cabo con costos cada vez más bajos.⁹

1.2 Disponibilidad de agua para potabilización

Aproximadamente el 94% del agua en el mundo es salada y se encuentra en los océanos, sólo el 6% corresponde a agua dulce. De este porcentaje disponible de agua dulce, el 27% se encuentra en los glaciares y el 72% se encuentra en los mantos acuíferos.^{7, 43}

Mientras el agua en la tierra soporta importantes actividades económicas como la pesca, el transporte y la industria, ésta está más allá de los límites para soportar las actividades antropogénicas y sus necesidades; por ejemplo, la producción de una tonelada de acero requiere cerca de 182,000 litros de agua, la producción de una tonelada de aluminio requiere cerca de 1'364,000 litros de agua, la producción de una tonelada de petróleo en una refinería de petróleo crudo necesita 91,000 litros de agua y para producir una tonelada de fibras artificiales se necesitan cerca de 910,000 litros de agua⁴³.

A continuación se presenta la Tabla 1.1 que enlista los países con mayor escasez y mayor abundancia de agua anualmente.⁴

Tabla 1.1 Disponibilidad de agua en diferentes países (Shiklomanov, 1996).

País	Millones de m³/año
Kuwait	Limitados o nulos
Malta	15
Gaza	46
Emiratos Árabes Unidos	500
Libia	600
Singapur	600
Jordania	680
Israel	750
Chipre	900
Brasil	6220
Rusia	4059
USA	3760
Canadá	3290
China	2800
Indonesia	2530
India	1200
Colombia	1200
Perú	1100

De aquí la importancia de muchos países por obtener fuentes alternativas de agua potable para su sustento y desarrollo.⁴

Los procesos para desalación de agua de mar son muchos y variados, con la capacidad de suministrar agua para diferentes usos.

Las técnicas para desalación del agua de mar están clasificadas en dos principales categorías:^{2,6}

1. Procesos Térmicos

- 1.1. Destilación por evaporación súbita multietapa (DFM).
- 1.2. Destilación por múltiple efecto (DME).

1.3. Destilación por compresión de vapor (DCV).

2. Procesos por membranas

2.1. Ósmosis inversa (OI)

En el mundo cerca del 60% de los procesos instalados son por membrana y cerca del 40% de los procesos instalados son por destilación. Ambas tecnologías crecen 17% anualmente desde 1990, con una producción de 5.9 millones de m³ por día hasta el año del 2007 de acuerdo a las Figuras 1.5 y 1.6, siendo los procesos por destilación por evaporación súbita multietapa y ósmosis inversa los usados principalmente en la desalación del agua de mar (Figura1.6)^{2, 7, 9}

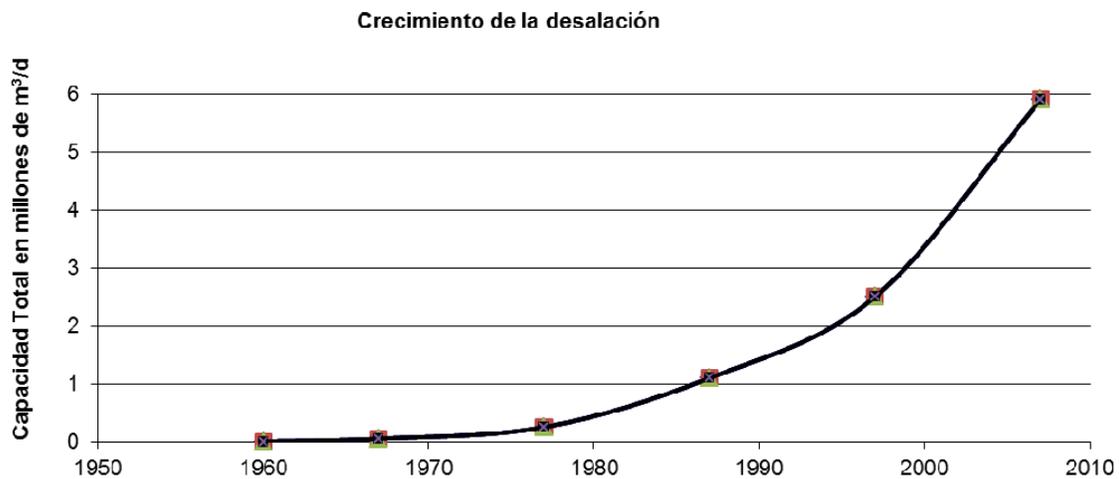


Figura 1.5. Millones de m³ producidos por día (GWI Desal Data / IDA, 2007).

Capacidad instalada por tecnología

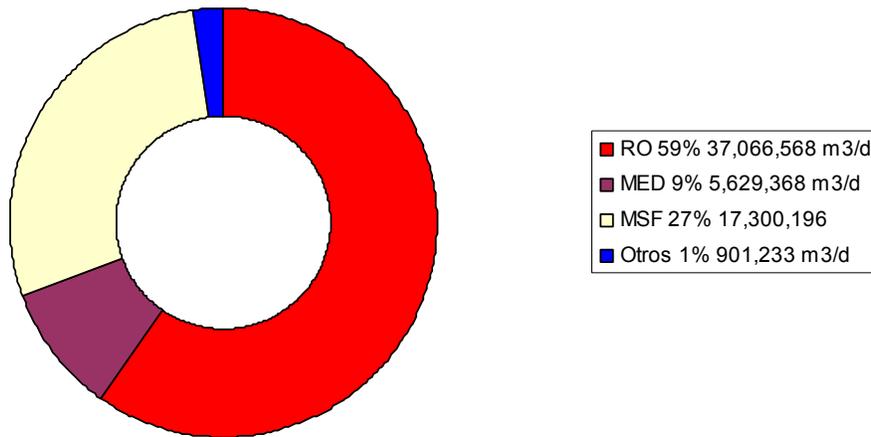


Figura 1.6 Capacidad instalada de acuerdo a la tecnología (GWI Desal Data / IDA, 2007).

Los mayores productores de agua desalada se localizan en el Medio Oriente, donde se presenta la mayor escasez de agua, como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Principales productores de agua desalada y porcentaje mundial de producción. (GWI Desal Data /IDA, 2007).

	País productor	Producción m ³ /día	Producción mundial
1)	Arabia Saudita	10,759,693	17%
2)	Emiratos Árabes Unidos	8,428,456	13%
3)	USA	8,133,415	13%
4)	España	5,249,536	8%
5)	Kuwait	2,876,625	5%
6)	Argelia	2,675,958	4%
7)	China	2,259,741	4%
8)	Qatar	1,712,886	3%
9)	Japón	1,493,158	2%
10)	Australia	1,184,812	2%

En la actualidad hay más de 8,000 plantas desaladoras¹¹ en operación alrededor del mundo, en las que se producen más de 21 millones de metros cúbicos de agua por día. El mayor porcentaje de plantas instaladas se encuentra en Medio Oriente, donde se tiene la mayor escasez de agua; Arabia Saudita es el número uno en el mundo en capacidad instalada con cerca del 17% de producción a nivel mundial. Sin embargo, como las condiciones de sequía continúan y existe preocupación sobre la disponibilidad del agua, más proyectos de desalación están empezando a proponerse en numerosos lugares donde la economía mundial y la demanda del mercado todavía exceden la capacidad de producción^{2, 9}.

Con la escasez de agua en algunas partes del mundo, las técnicas de desalación ofrecen una alternativa para incrementar el agua disponible en todo el mundo.

Gracias a los avances tecnológicos en membranas, la facilidad de operación, los bajos costos de mantenimiento, facilidad en la instalación, la inclusión de dispositivos para recuperación de energía, consumos bajos de energía por m³ de agua producida y costos totales más bajos con respecto a otras tecnologías en la obtención de agua potable a partir de agua de mar, la desalación de agua de mar por ósmosis inversa está perfilada como una fuente viable en la obtención de agua que puede ser tratada para cualquier tipo de uso⁷.

1.3 Legislación aplicable para el proceso de ósmosis inversa para desalación de agua de mar

El tratamiento de agua de mar está compuesto por tres corrientes, agua de mar, agua producto (permeado) y agua de rechazo (concentrado). Por lo que el tratamiento podría involucrar el seguimiento de tres normatividades. Una correspondiente a la extracción del agua de mar, otra debida al consumo del agua producida y otra por la descarga del concentrado producido. En México para el proceso de agua de mar, sólo se puede aplicar cuando el uso del producto es potable, la norma NOM-127-

SSA1-1994, la cual establece los límites máximos permisibles de compuestos presentes en el agua para consumo humano¹³.

La desalación del agua de mar por ósmosis inversa es una tecnología relativamente nueva en México, por lo que hasta la fecha no existe normatividad para llevar a cabo este proceso. De la poca información que se dispone se puede encontrar un mandato constitucional de Vicente Fox (exPresidente de la República Mexicana), donde declara al agua como un asunto de seguridad nacional y expide el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006, el cual menciona la desalación de agua de mar como una fuente potencial de agua e indica que quienes pretendan llevar a cabo alguna actividad relacionada con la desalación, necesitarán previa autorización de la Secretaría en materia de impacto ambiental (SEMARNAT). Lo que se traduce en un estudio de impacto ambiental ante la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, que será la encargada de establecer las condiciones a las que se sujetarán para proteger al ambiente^{4, 14}.

1.4 Aplicaciones del agua desalada

Las aplicaciones del agua desalada pueden ser muchas, siempre que se tenga al mar como fuente disponible de agua, que son las siguientes:

- Municipal
- Industrial
- Irrigación
- Energía
- Militar
- Turismo

Siendo la de tipo municipal la más importante (Agua potable para consumo humano) como lo muestra la Figura 1.7.

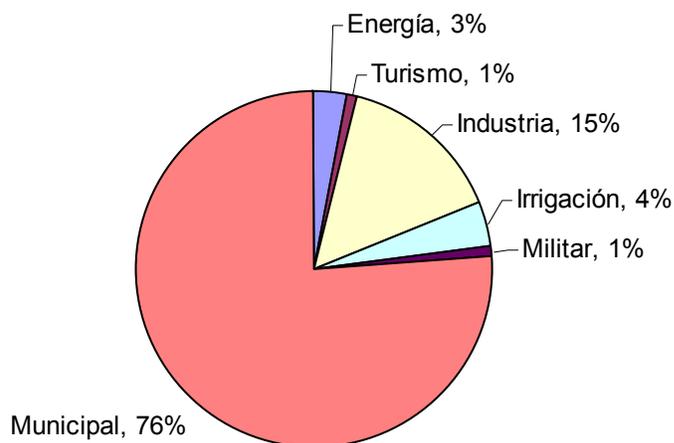


Figura 1.7 Principales usos de la desalación de agua de mar
(GWI Desal Data / IDA, 2007).

En la actualidad los proyectos de mayor producción de agua están enfocados principalmente en el suministro de agua a redes municipales. Como ejemplo está la planta desaladora más grande del mundo en la actualidad, Ashkelon, en Israel, con una producción de 330,000 m³/d. Dicha planta produce el 13% de la demanda doméstica de la ciudad equivalente al 5 – 6% de la necesidad de agua en Israel⁹.

Con base en la información presentada en este capítulo es indudable la necesidad de encontrar fuentes alternas de abastecimiento para la producción de agua potable, sin embargo, en nuestro país no se identificó una guía que permita el diseño y operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. Debido a lo anterior, en este trabajo se presenta una propuesta para contribuir a resolver esta problemática, la cual se presenta en el siguiente capítulo.

2 DESARROLLO DE UNA GUÍA DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE DESALACIÓN DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA

2.1 Componentes principales de los sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa

El proceso inicia (Figura 2.1) con la alimentación de agua de mar a través de la obra de toma. Posteriormente, el agua de mar pasa por un pretratamiento compuesto por una serie de procesos físicos y/o químicos. Finalmente, el agua pretratada se alimenta al sistema principal de desalación, en el cual el agua es succionada por una bomba de alta presión la cual impulsa el agua sobre membranas semipermeables. El agua impulsada por la bomba alcanza una presión mayor a la presión osmótica y comienza el proceso de ósmosis inversa haciendo pasar parte del agua de mar a través de la membrana. El agua que pasó a través de la membrana (permeado) se denomina agua producto, mientras que el agua que no pasó la membrana se conoce como agua de rechazo. Esta agua de rechazo se encargará de arrastrar y sacar fuera de las membranas las sales que no permearon y así evitar que éstas se depositen sobre las membranas.

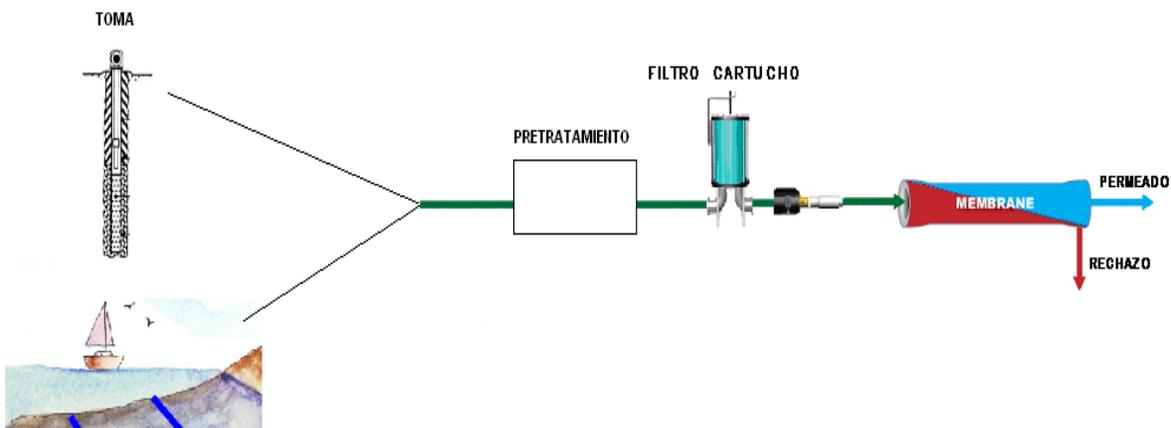


Figura 2.1 Componentes principales de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

En el proceso de ósmosis inversa existen tres corrientes principales:

- Corriente de agua cruda, que es el agua de mar pretratada que se va a procesar.
- Corriente de permeado, que es el agua que ha pasado a través de la membrana semipermeable.
- Corriente de agua de rechazo, que es el agua que no pasó a través de la membrana semipermeable y que contiene las sales que dejó el agua permeada.

Antes de describir cada componente principal listado en este trabajo y presentar los criterios de diseño y operación recomendados para sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, se resume la información técnica importante relacionada con las características del agua de mar, las cuales son importantes para la selección y dimensionamiento de los principales componentes de sistemas de desalación de agua mar por ósmosis inversa.

2.2 Características del agua de mar

El agua de mar puede ser caracterizada de acuerdo a la concentración de sales disueltas (SDT) y a la cantidad total de carbono orgánico total (COT) de acuerdo a la Figura 2.2.⁵

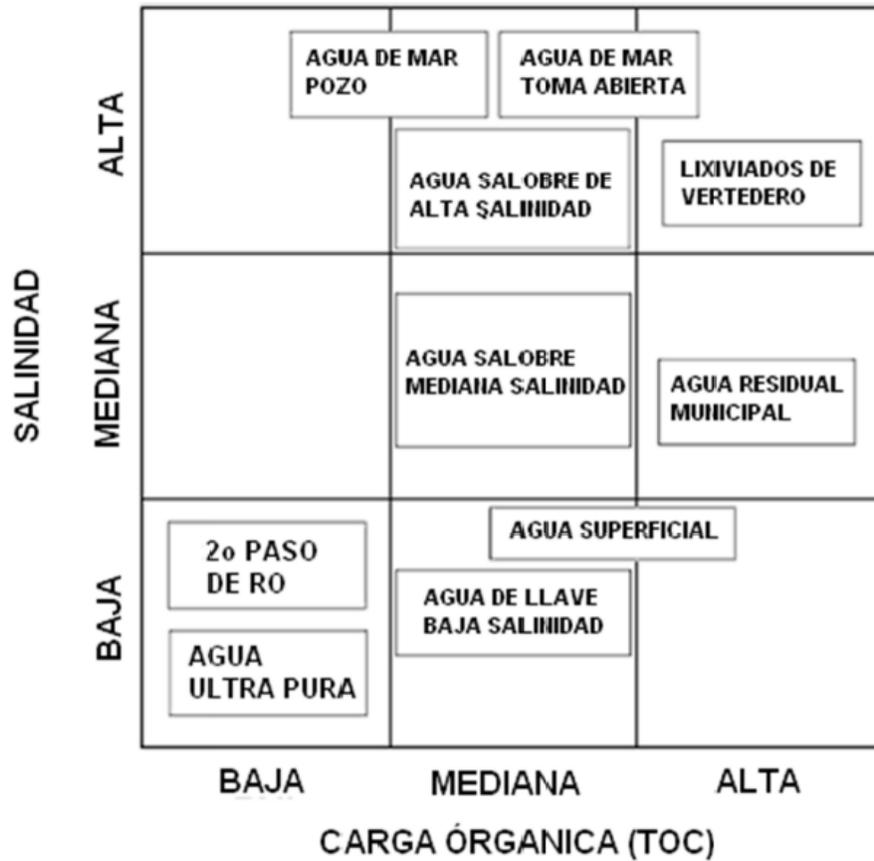


Figura 2.2 Caracterización del agua de mar (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

El agua de mar con una concentración de 35,000 ppm de SDT es considerada como agua de mar estándar (Tabla 2.1), ya que la composición alrededor del mundo es similar.

La concentración del agua de mar se puede considerar como estándar para la mayor parte del agua de mar, pudiendo llegar a tener variaciones. Por ejemplo, cerca de los límites del mar báltico podemos encontrar concentraciones de 7,000 ppm de SDT en el agua, para el mar Rojo y el golfo de Arabia podemos encontrar concentraciones de casi 45,000 ppm (Tabla 2.2).

Tabla 2.1 Composición estándar del agua de mar (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

ión	Concentración (mg/L)
Calcio	410
Magnesio	1310
Sodio	10,900
Potasio	390
Bario	0.05
Estroncio	13
Hierro	<0.02
Manganeso	<0.01
Sílice	0.04 - 0.08
Cloruros	19,700
Sulfatos	2,740
Fluoruros	1.4
Bromuros	65
Nitratos	<0.7
Bicarbonatos	152
Boro	4 – 5
SDT	35,000
pH	8.1

Tabla 2.2 Ejemplos de composiciones de algunos mares (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

Ubicación	Salinidad (SDT, ppm)	Conductividad eléctrica (k, μ S/cm)	Factor k/SDT μ S/(cm.ppm)
Pacífico Sur	<36,000	<51,600	1.43 – 1.44
Gran Canaria (Océano Atlántico)	37,600	53,280	1.42
Cerdeña (Mar Mediterráneo)	40,800	57,240	1.40
Reino de Bahrein (Golfo Pérsico)	42,500	59,350	1.40
Egipto (Mar Rojo)	44,000	62,990	1.38

La composición del agua de mar no estándar puede estimarse a partir de la composición del agua estándar (Tabla 2.3). No aplica lo mismo para aguas de pozo, ya que dependiendo del tipo de suelo, la infiltración de aguas de tierra adentro, etc., puede llegar a variar la concentración y la composición de las sales, teniendo diferencias del agua que es tomada directamente del mar⁵.

Tabla 2.3 Ejemplos de composiciones estimadas de agua de mar (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

Agua	K (ppm)	Na (ppm)	Mg (ppm)	Ca (ppm)	HCO ₃ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ (ppm)	SiO ₂ (ppm)
Agua de mar estándar-32,000 ppm	354	9,854	1,182	385	130	17,742	2,477	0.9
Agua de mar estándar-35,000 ppm	387	10,778	1,293	421	142	19,406	2,710	1.0
Agua de mar estándar-36,000 ppm	398	11,086	1,330	433	146	19,960	2,787	1.0
Agua de mar estándar-38,000 ppm	419	11,663	1,399	456	154	20,999	2,932	1.0
Agua de mar estándar-40,000 ppm	441	12,278	1,473	480	162	22,105	3,086	1.1
Agua de mar estándar-45,000 ppm	496	13,812	1,657	539	182	24,868	3,472	1.2
Agua de mar estándar-50,000 ppm	551	15,347	1,841	599	202	27,633	3,858	1.4

Las características del agua de mar se deben considerar en el diseño y operación del pre-tratamiento y del proceso de ósmosis inversa. Por ejemplo, como consecuencia de una alta salinidad del agua de mar se tienen altas presiones osmóticas, y la recuperación del sistema está limitada típicamente de un 40% a 50% dependiendo de la salinidad del agua y, tratando de no exceder las presiones máximas de operación de las membranas, para evitar un alto consumo energético asociado a altas presiones y a altas recuperaciones.

La incrustación de las membranas de ósmosis inversa ocurre cuando sales moderadamente solubles se concentran dentro de la membrana y alcanzan su solubilidad máxima. Por ejemplo, si una planta de ósmosis inversa opera con un 50% de recuperación, en la corriente del concentrado se tendrá cerca del doble de concentración de la sal que se encontraba en la corriente del agua de alimentación. Por lo tanto, si la solubilidad de la sal es cercana a su solubilidad máxima y si la recuperación de la planta incrementa, el riesgo por incrustaciones se incrementa también ya que la concentración en el rechazo será mayor conforme aumente la recuperación del equipo.

Debido a la escasez de agua se ha vuelto más popular la adición de reactivos químicos para la obtención de recuperaciones más altas y así reducir el flujo de rechazo producido por un equipo de ósmosis inversa. Para minimizar la precipitación y las incrustaciones es importante establecer medidas de control y prevenir exceder los límites de solubilidad de sales (Tabla 2.4). Por ejemplo, en un equipo de ósmosis inversa las sales que comúnmente causan problemas por su baja solubilidad son CaSO_4 , CaCO_3 y el sílice.⁵

Tabla 2.4 Solubilidades de algunos compuestos inorgánicos (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

Substancia	Fórmula	Temperatura (°C)	Solubilidad (mg/L)
Hidróxido de aluminio	Al(OH) ₃	25	3 x 10 ⁻³⁴
Fosfato de aluminio	AlPO ₄	25	9.84 x 10 ⁻²¹
Carbonato de bario	BaCO ₃	25	2.58 x 10 ⁻⁹
Sulfato de Bario	BaSO ₄	25	1.1 x 10 ⁻¹⁰
Carbonato de calcio	CaCO ₃	25	Calcita 3.36x10 ⁻⁹ Aragonita 6x10 ⁻⁹
Fluoruro de calcio	CaF ₂	25	3.45 x 10 ⁻¹¹
Fosfato de calcio	Ca ₃ (PO ₄) ₂	25	2.07 x 10 ⁻³³
Sulfato de calcio	CaSO ₄	25	4.93 x 10 ⁻⁵
Hidróxido de hierro (II)	Fe(OH) ₂	25	4.87 x 10 ⁻¹⁷
Sulfuro de Hierro (II)	FeS	25	8 x 10 ⁻¹⁹
Hidróxido de hierro (III)	Fe(OH) ₃	25	2.79 x 10 ⁻³⁹
Fosfato de hierro di-hidratado	FePO ₄ ·2H ₂ O	25	9.91 x 10 ⁻¹⁶
Carbonato de plomo	PbCO ₃	25	7.4 x 10 ⁻¹⁴
Fluoruro de plomo	PbF ₂	25	3.3 x 10 ⁻⁸
Sulfato de plomo	PbSO ₄	25	2.53 x 10 ⁻⁸
Fosfato de amonio magnesio	MgNH ₄ PO ₄	25	2.5 x 10 ⁻¹³
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	12	2.6 x 10 ⁻²⁵
		25	6.82 x 10 ⁻⁶
Fluoruro de magnesio	MgF ₂	18	7.1 x 10 ⁻⁹
		25	5.16 x 10 ⁻¹¹
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) ₂	18	1.2 x 10 ⁻¹¹
		25	5.61 x 10 ⁻¹²
Fosfato de magnesio	Mg ₃ (PO ₄) ₂	25	1.04 x 10 ⁻²⁴
Hidróxido de manganeso	Mn(OH) ₂	18	4 x 10 ⁻¹⁴
		25	2 x 10 ⁻¹³
Carbonato de estroncio	SrCO ₃	25	5.6 x 10 ⁻¹⁰
Sulfato de estroncio	SrSO ₄	17.4	3.8 x 10 ⁻⁷
Carbonato de Zinc	ZnCO ₃	25	1.46 x 10 ⁻¹⁰

El agua proveniente de pozo en general es una fuente con un bajo potencial de sales que pueden llegar a precipitar. Típicamente requiere un muy ligero pretratamiento que puede solamente llegar a consistir en la adición de ácido para evitar la precipitación por dureza, adición de un anti-incrustante o el uso de filtración.

Las instalaciones para desalación de agua de mar requieren un sistema de toma de agua capaz de proveer la cantidad necesaria de influente con un mínimo impacto ecológico. Para cumplir con este objetivo es necesario evaluar a fondo las condiciones del sitio, como lo son las características físicas, meteorológicas, datos oceanográficos, marinos y biológicos.

Los efectos potenciales de contaminación deben ser evaluados y se debe emplear un diseño apropiado en la obra de toma para prevenir o mitigar el daño ocasionado por la obra de toma ya sea por toma abierta o una toma por pozo. Se debe tomar en cuenta que la toma afectará algunos parámetros de la calidad del agua alimentada y determinará el comportamiento de los procesos del sistema, de acuerdo al tipo de obra de toma que se seleccione (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Comparativo entre los diferentes tipos de obra de toma de agua de mar³.

	Calidad del efluente	Costo de exploración y modelación	Impacto ambiental	Inversión	Producción de la planta (m ³ /h)
Obra superficial de toma de agua					
Filtros móviles	Mediana*	Alto	Mediano	Alta	Sin Límite
Filtros pasivos	Mediana*	Mediano	Mediano	Baja	<200,000**
Velocidad tope	Mediana*	Mediano	Mediano	Mediana	<300,000**
Obra de toma a través de pozos					
Pozo playero vertical	Buena	Bajo	Bajo	Baja	<20,000**
Pozo radial	Buena	Mediano	Bajo	Mediana	<20,000**
Galerías de infiltración	Buena	Alto	Mediano	Alta	<50,000**

*La calidad podrá variar por temporada; **Capacidad máxima instalada pudiendo llegar a ser mayor

***Se podría usar cualquier tipo de toma de obra para cualquier capacidad de planta desaladora de agua de mar, el uso de cualquiera de estas obras de toma obedece mas a la viabilidad de usar cualquiera de estos tipos de obra mas que a un tamaño de planta. La decisión de usar cualquiera de estos estará determinada por un estudio de factibilidad.

El diseño de la obra de toma es altamente específico del lugar. El diseño, modelado y monitoreo y las actividades alrededor del diseño pueden representar hasta un 20% del costo del capital de las instalaciones. El acceso a un suministro constante es uno de los temas más importantes a discutir cuando se evalúa el potencial de las plantas desaladoras, sin embargo, el suministro de agua de mar a una planta a veces parece ser realmente sencillo por la aparente simplicidad y la importancia de la toma sobre el diseño de la localidad y el comportamiento de la planta es por lo regular subestimado³.

Un buen diseño de la obra de toma no sólo protege al equipo y reduce el impacto ambiental de la vida marina, también mejora el comportamiento y reduce los costos de operación de los equipos del pretratamiento.

Dentro de los aspectos más importantes a considerar en la instalación de una obra de toma abierta, se encuentran los siguientes:

- El fácil acceso a un suministro de agua de mar de calidad estable.
- El oleaje y corrientes marinas ya que éstas pueden dañar estructuras, afectar profundidades marinas y alterar dramáticamente la calidad del agua. Los problemas operacionales son agravados por la corrosividad del agua de mar y los organismos marinos que pueden atacar y contaminar equipos y sistemas.
- La distancia entre la obra de toma y la planta desaladora, ya que esto afecta la economía de la instalación.
- La calidad y cantidad del agua de alimentación, esto impacta directamente en la selección del proceso de pretratamiento. Como primer paso, la obra de toma puede tener efectos de largo alcance sobre la operación de toda la planta y el impacto al ambiente marino¹⁷.

Con el fin de elegir la obra de toma más adecuada, todas las características específicas del lugar deben ser consideradas y como resultado tener una comparación global de las ventajas y desventajas.

Información requerida para las obras de toma de agua de mar.

Toma de agua subterránea.

- Geología e hidrogeología.
- Interacciones entre el acuífero de agua de mar y los acuíferos costeros.
- La topografía del terreno.
- Requisitos ambientales específicos.
- Actividades urbanas, agrícolas o industriales.
- Características del acuífero.
- Confirmar espesor de arena.
- Caracterización de los depósitos de arena de playa.

Toma de agua abierta o superficial.

- Perfil del fondo marino.
- Naturaleza del fondo marino.
- Tipo de corrientes marinas.
- Batimetría.
- Vientos.
- Actividades marítimas.
- Descargas de aguas residuales (de las ciudades, industrias, etc.).
- Especies de fauna y flora protegidas.

2.3.2 Trenes de pretratamiento de agua cruda de mar

Los procesos de pretratamiento para la desalación de agua de mar se dividen en procesos físicos y químicos. Los procesos físicos como: filtración en medio poroso, filtros de cartucho, sedimentación, microfiltración y ultrafiltración que en combinación con los pretratamientos químicos como: coagulación – floculación, desinfección, decloración, adición de agentes anti incrustantes y ajuste de pH, permiten obtener una mejor calidad del agua que alimentará a los procesos principales de desalación.

El pretratamiento permite obtener la calidad necesaria de agua de mar para que pueda ser tratada por el proceso de ósmosis inversa y tiene que proporcionar las siguientes características:

- SDI < 3
- Turbidez < 0.5 UTN
- pH 4 – 10
- Cl⁻ < 0.1 ppm
- Temperatura 1 – 45 °C
- Libre de grasas y aceites
- COT < 2 ppm
- SST < 2 ppm

El pre-tratamiento es específico para cada tipo de agua, y dependiendo de la calidad de ésta el pretratamiento podrá ser muy largo y complicado para aguas muy contaminadas o casi nulo para aguas limpias.

A continuación se presentan algunos tipos de trenes de pretratamiento para agua de mar a seleccionar en función de la calidad del agua cruda.

COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + FLOTACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA

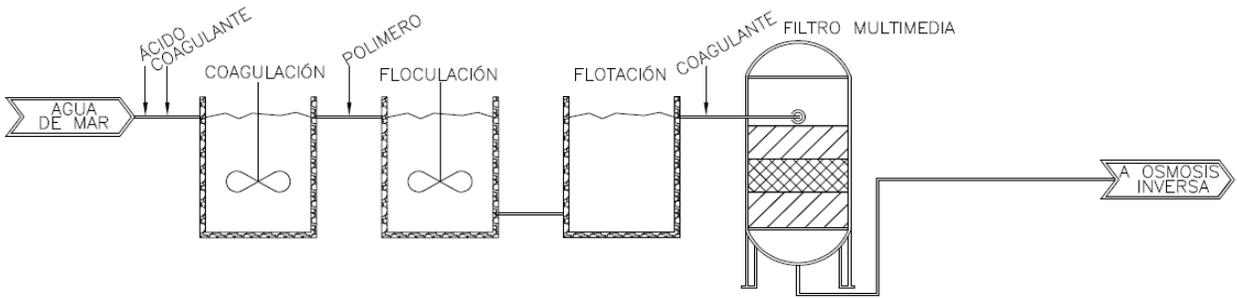


Figura 2.3 Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, contenido de algas, alto COT y grasas.

COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + SEDIMENTACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA

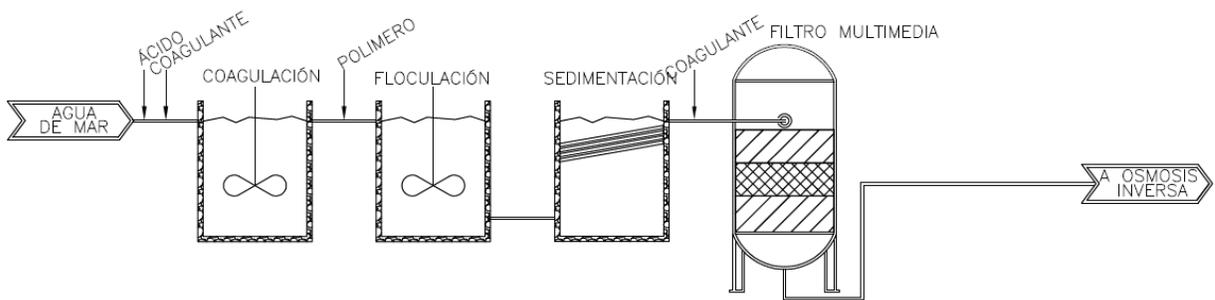


Figura 2.4 Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, COT y algas.

COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA

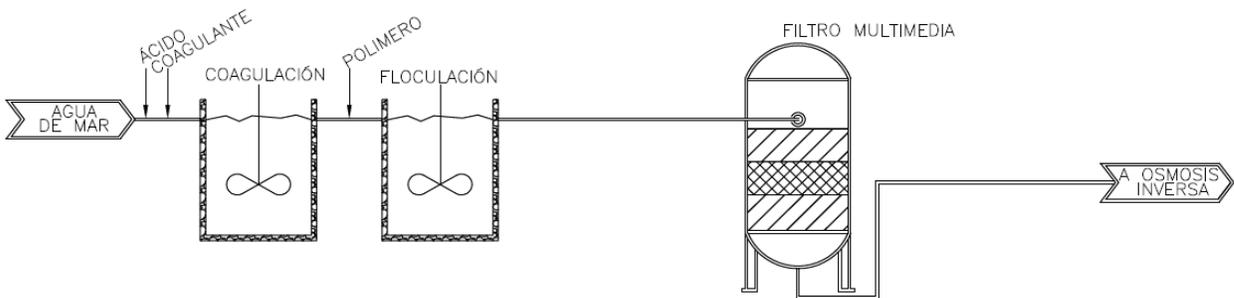


Figura 2.5 Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez, COT y algas.

2.3 Metodología para el diseño de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa

2.3.1 Obra de toma de agua de mar

El agua de mar a tratar proviene de una sola fuente y ésta se puede obtener de dos formas distintas cada una con características diferentes:

- Toma abierta o superficial, que es la toma de agua directamente del mar.
- Toma de agua por pozo, que es la perforación de pozos cerca del mar.

El agua de una obra de toma abierta o superficial es una fuente variable que es afectada por factores climáticos o de temporada. Ésta tiene un alto potencial de contaminación por sólidos suspendidos ya sean microbiológicos o coloidales. El pretratamiento para el agua de una obra de toma abierta es más elaborado que un pretratamiento para la obra de toma por pozo (Tabla 2.5). Adicionalmente a los pasos en el pretratamiento de una obra por pozo se puede requerir de cloración, coagulación/floculación, clarificación, filtración bimedia, filtración multimedia, de-cloración, acidificación y/o adición de un anti-incrustante; dependiendo de la calidad del agua a tratar.

Tabla 2.5 Criterios de selección de la obra de toma del agua de mar a alimentar a un sistema de desalación ¹⁷.

Tipo de bombeo	Toma superficial	Toma profunda	Pozos verticales	Pozos radiales
Calidad de agua	Mala	Intermedia	Buena	Buena
Variación de la calidad	Alta	Moderada	Baja	Baja
Costo de pretratamiento	Muy alto	Alto	Bajo	Bajo
Costo de bombeo	Bajo	Alto	Medio	Alto
Costo de exploración y modelación	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Impacto ambiental	Bajo	Alto	Bajo/Medio	Bajo/Medio

COAGULACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA

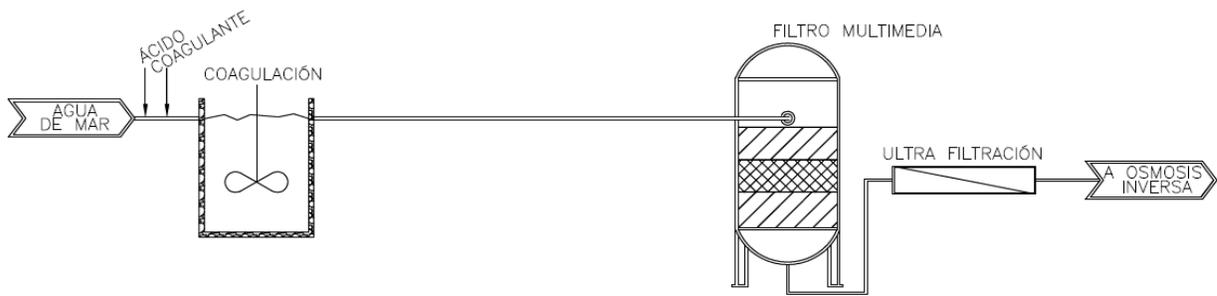


Figura 2.6 Pretratamiento para agua de mar con alta turbidez y COT.

FILTRACIÓN MULTIMEDIA

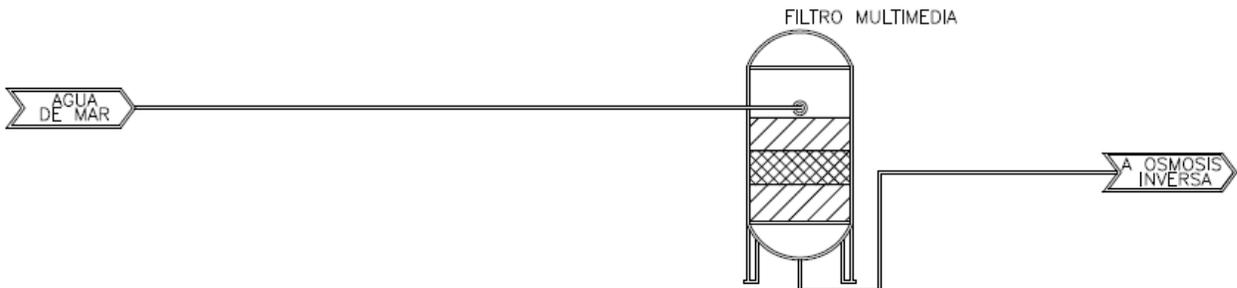


Figura 2.7 Pretratamiento para agua de mar con baja turbidez.

2.3.3 Principales elementos de un sistema de desalación por ósmosis inversa

A continuación se presentan los principales elementos que componen una planta de desalación de agua de mar.

2.3.3.1 Filtro de cartuchos

Son cartuchos construidos en polipropileno con un tamaño de filtración que puede ir de 1 a 5 μm de tamaño nominal de filtración, se usan principalmente para eliminar del agua partículas de tamaño considerable que pueden dañar las membranas o que pueden depositarse sobre las membranas de ósmosis inversa, pudiendo causar incrustaciones o ensuciamiento por precipitación; haciendo que las membranas de ósmosis inversa requieran lavados más constantes con

reactivos químicos, presiones de operación mayores a lo normal o la sustitución de las membranas.

Dependiendo de la cantidad de sólidos suspendidos en el agua (SST) es la vida útil de estos cartuchos, pudiendo variar desde 15 días para aguas regularmente sucias hasta 30 ó 60 días para aguas limpias.

Además de los filtros se necesita de un equipo llamado portafiltros cuya función principal es la de soportar a los filtros y, cuyos materiales de composición pueden ser el PVC, CPVC, PP, fibra de vidrio (FRP), etc; todos ellos tienen una buena resistencia a la corrosión proveniente del ambiente marino y del agua de mar. El tamaño depende del tamaño del equipo y el flujo que se maneje.

Para el diseño de las plantas desaladoras se considera como regla de dedo una velocidad de filtración de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ por cada 10" de longitud de cartucho. La longitud de los cartuchos varía de 10" hasta 40", por lo que si se maneja un cartucho de 40" se podrá aplicar un flujo de $4 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta velocidad de filtración nos da una buena filtración y una caída de presión baja, el cambio de los cartuchos se llevará a cabo cuando éstos se ensucien, para lo cual se instalan manómetros a la entrada y a la salida del filtro cartucho, éstos indicarán la caída de presión y cuando ésta se encuentre de 1 a 1.5 bar es indicativo de que se necesita un cambio de cartuchos, recordando siempre que éstos son desechables y no reutilizables. En la Grafica 2.8 se muestra las dos partes que forman la filtración.

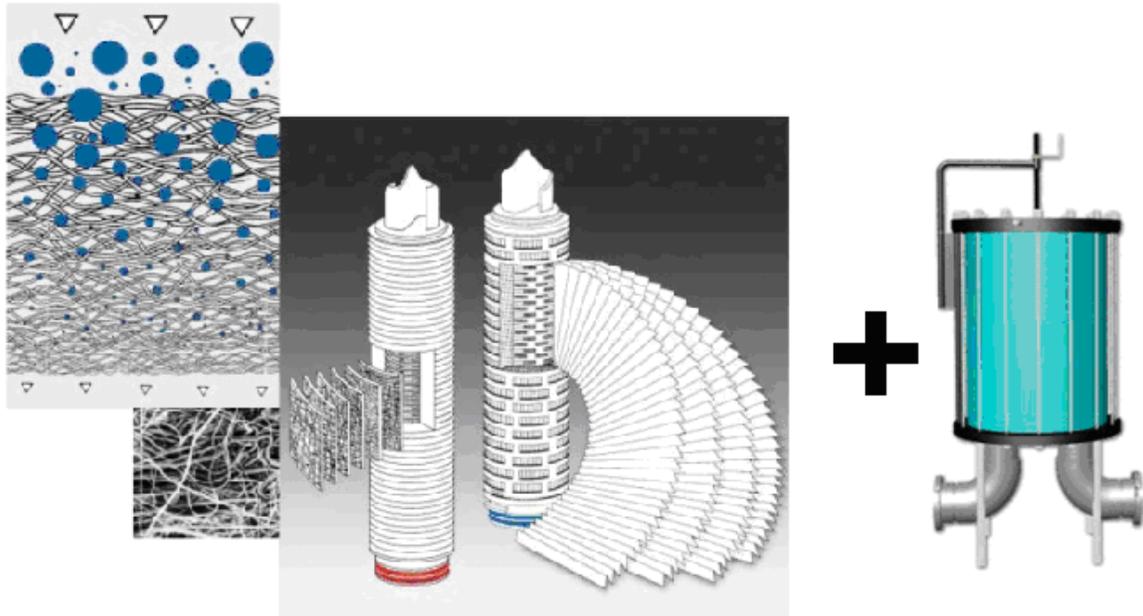


Figura 2.8 Filtro + portafiltro.

2.3.3.2 Bomba de alta presión

Existen disponibles dos tipos de bombas de alta presión: las centrífugas (Figura 2.9) y las de desplazamiento positivo (Figura 2.10). La diferencia entre estos dos tipos de bombas además del distinto principio de operación es la eficiencia, término muy importante a considerar cuando se requiere tener equipos con bajos consumos energéticos sobre todo en lugares donde la energía eléctrica es costosa. Por ejemplo, las bombas centrífugas tienen eficiencias por debajo del 70% y, por tanto, el precio de estas bombas es más bajo en comparación con una bomba de desplazamiento positivo con eficiencias arriba del 90%. La decisión en que tipo de bomba se usará, estará enfocada en el grado de inversión que se quiera tener pero usando por lo regular bombas centrífugas para plantas con producciones de hasta 10,000 m³/d y bombas de desplazamiento positivo para plantas con producciones mayores a 10,000 m³/d.

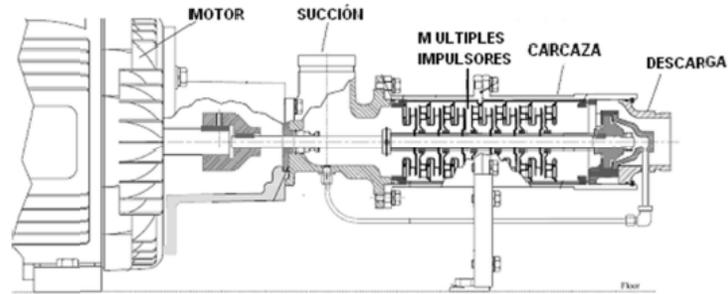


Figura 2.9 Bomba centrífuga de múltiples etapas (Bombas FEDCO, 2009).



Figura 2.10 Bomba de desplazamiento positivo (Bombas Danfoss, 2009).

La bomba se encarga de incrementar la presión del agua de mar hasta una presión mayor a la presión osmótica para poder realizar el proceso por ósmosis inversa (50 – 70 barg).

Algunas de las principales características que tienen estas bombas es que son fabricadas en materiales especiales resistentes a la corrosión. Son materiales con características distintas a los aceros inoxidable que usamos normalmente como los aceros tipo 304 ó 316. Los materiales utilizados son materiales relativamente nuevos en México, pero que en el extranjero son producidos y mucho más utilizados; con resistencias a la corrosión mucho mayores gracias al menor contenido de carbón y mayor contenido de Cr. Algunos ejemplos de estos materiales son acero inoxidable tipo 904, aceros inoxidable dúplex tipo 2205 ó 2207.

2.3.3.3 Válvula de regulación

Las válvulas de diafragma (Figura 2.11) aunque son de funcionamiento muy sencillo son esenciales para la operación de un equipo de ósmosis inversa. La válvula de diafragma se encarga de regular los flujos de agua permeada y agua de rechazo mediante la apertura y cierre. Son utilizadas en equipos que no usan recuperador de energía en su proceso.



Figura 2.11 Válvula de regulación.

2.3.3.4 Membrana de ósmosis inversa

Es el principal componente dentro del equipo de desalación, ya que es el encargado de rechazar las sales disueltas en el agua.

La membrana de ósmosis está constituida de una membrana delgada compuesta por tres capas, un soporte de poliéster, una capa intermedia de polisulfona porosa y una capa ultra delgada de poliamida que actúa como capa barrera en la superficie de la membrana y es la encargada de rechazar las sales disueltas. Materiales usados comúnmente en la construcción de membranas de ósmosis inversa.

La capa ultradelgada de poliamida puede tener un espesor que va desde 0.2 hasta 120 μm (Figura 2.12) ⁵.

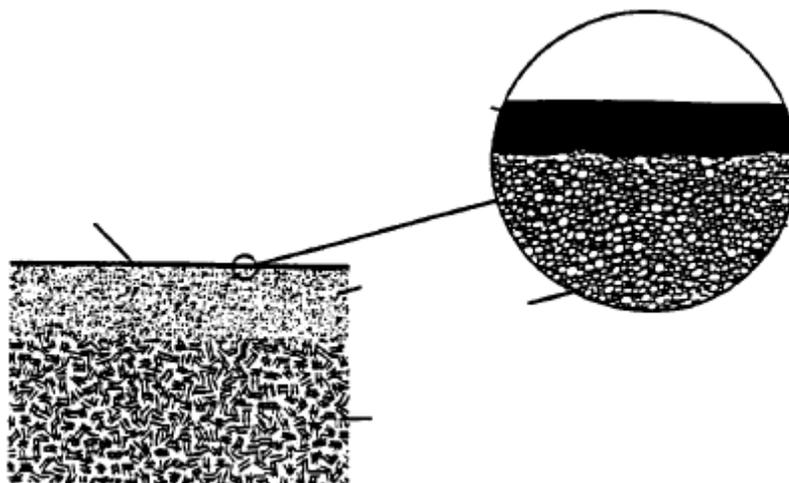


Figura 2.12 Corte transversal de la membrana de ósmosis (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

La forma en que el agua pasa a través de la membrana es de tipo tangencial, ya que el agua fluye paralelamente a la membrana de ósmosis (Figura 2.13).

Conforme el agua va permeando a lo largo de la membrana, las sales que quedan en la superficie son arrastradas por el agua que no pasó a través de ella, ésta agua recorre toda la membrana concentrándose más a medida que avanza.

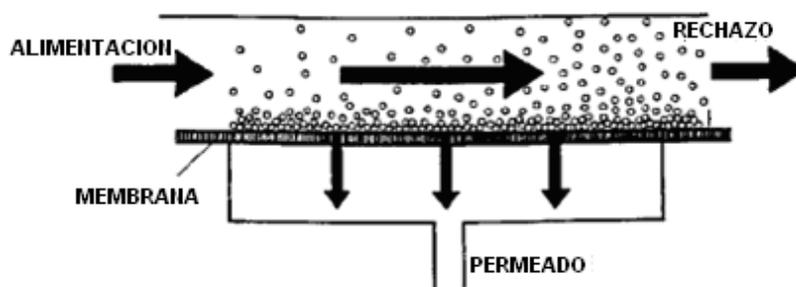


Figura 2.13 Trayectoria del agua a través de la membrana de ósmosis (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

La capa barrera de la ósmosis inversa se compone de 1,3 fenileno diamina y un triácido de cloruro de benceno (Figura 2.14). Este compuesto es muy resistente y estructuralmente fuerte ya que contiene ácidos carboxilo y aminos libres. Posee

gran estabilidad química, lo que hace que la membrana sea durable y tenga una fácil limpieza.⁵

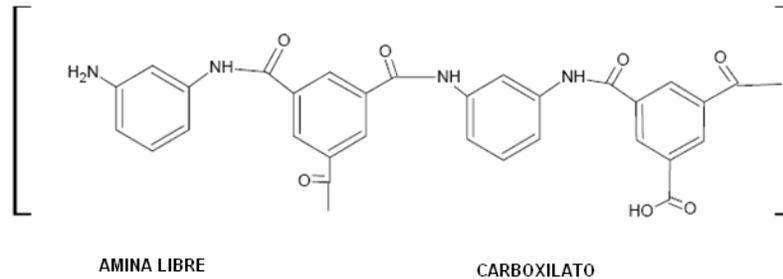


Figura 2.14 Estructura química de la capa barrera de la membrana de ósmosis inversa (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

Una membrana de ósmosis inversa está compuesta de membranas y separadores. Dentro de un par de membranas se coloca un separador llamado separador de permeado y a cada lado de las membranas se colocan otros dos separadores llamados separadores de alimentación. Cada par de membranas se encuentra sellado por tres de sus costados encerrando en el medio al separador de permeado, mientras en el cuarto costado el par de membranas están unidas a un colector central, que es el tubo que recolecta al permeado y lo lleva fuera del equipo (Figura 2.15 y 2.16).

Una membrana de ósmosis está constituida en promedio por 30 pares de hojas de membrana con sus respectivos separadores, es enrollada hasta alcanzar un diámetro de 100 mm a 200 mm (4"- 8"), que son las medidas de los diámetros comerciales⁵.

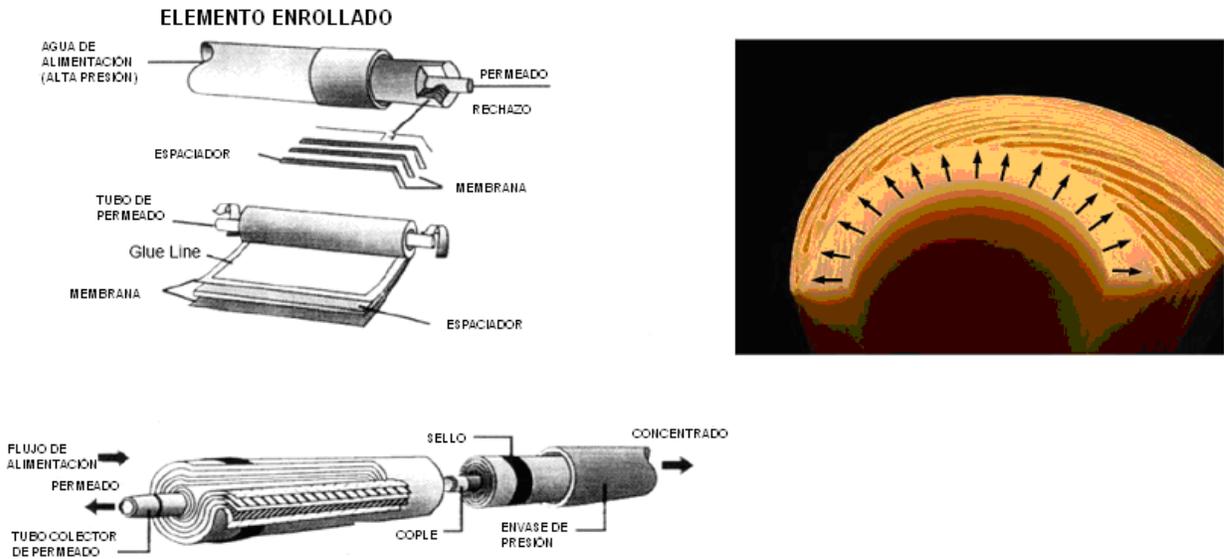


Figura 2.15 Elementos y composición de una membrana enrollada para ósmosis inversa (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

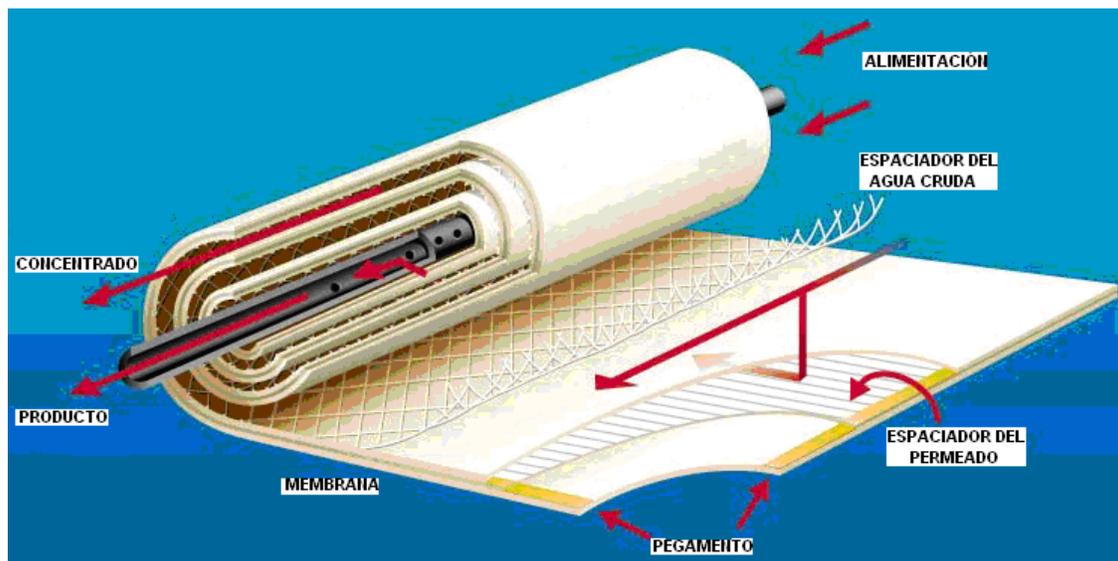


Figura 2.16 Detalles del funcionamiento y elementos de una membrana enrollada para ósmosis inversa (Franks, Dr. Craig Bartels, Wayne T. Bates, 2007).

2.3.3.4.1 Variables que influyen en el comportamiento de las membranas de ósmosis inversa

Los parámetros más importantes a controlar en el proceso de ósmosis inversa son dos: el flujo de permeado y el rechazo de sales; los cuales dependen de cuatro factores principalmente: presión, temperatura, % de recuperación y concentración de sales en el agua cruda⁵. Las figuras 2.17 y 2.18 muestran el impacto del flujo de permeado y del rechazo de sales en cada uno de los cuatro parámetros mencionados arriba.

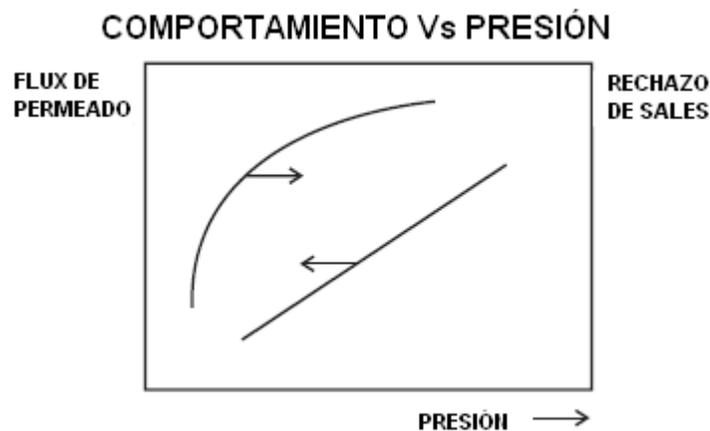


Figura 2.17 Comportamiento en función de la presión (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

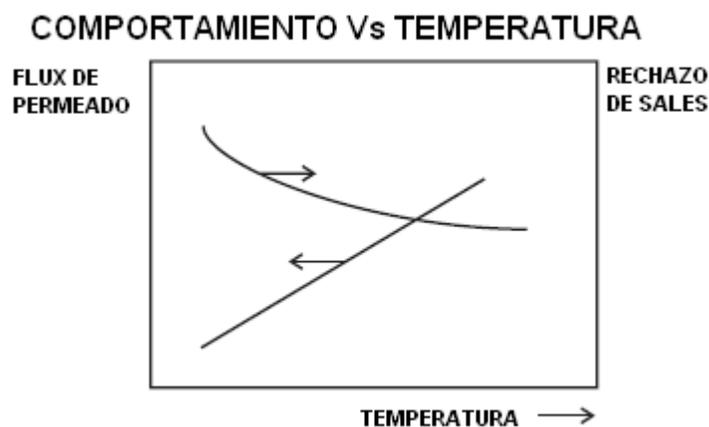


Figura 2.18 Comportamiento en función de la temperatura (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

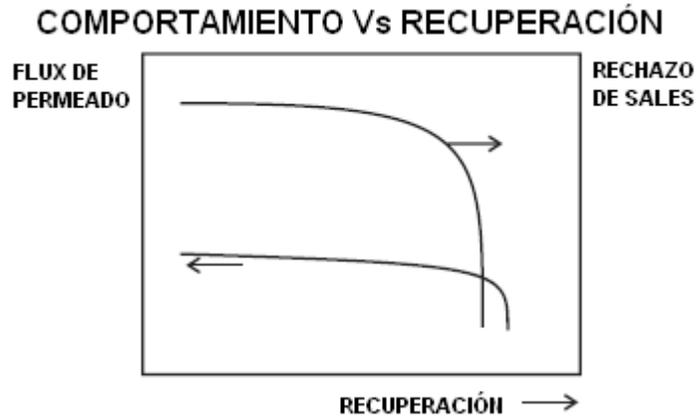


Figura 2.19 Comportamiento en función del % de recuperación (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

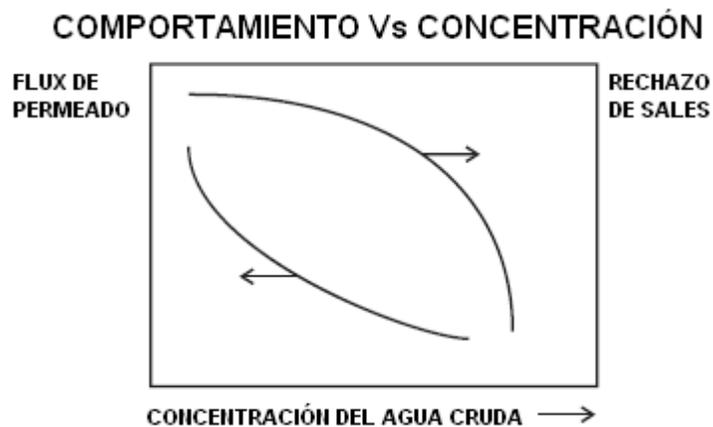


Figura 2.20 Comportamiento en función de la concentración de sales en el agua cruda (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

Analizando cada figura se obtiene:

- Que a mayor presión existe:
 - a) Un incremento del flujo de permeado, este flujo deberá estar limitado dentro de los límites de diseño.
 - b) Un aumento del rechazo de sales, en porcentajes muy bajos (0.01-0.02%).

- A mayor temperatura se presenta:
 - a) Un incremento del flujo de permeado (máximo 2%).
 - b) Una disminución del rechazo de sales (0.1% por cada °C).

- A mayor recuperación:
 - a) Disminuye el rechazo de sales. 0.5% por cada 10% en el incremento de la recuperación.

- A mayor concentración de sales en el agua cruda:
 - a) Disminuye el flujo de permeado. Ya que a mayor concentración de sales la presión requerida en el sistema es mayor.
 - b) Disminuye el rechazo de sales. Esta disminución se presenta pero de forma marginal.

2.3.3.5 Recuperadores de energía

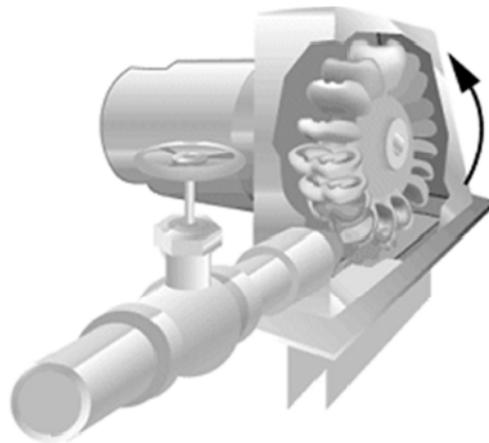
Conforme la tecnología ha avanzado en la desalación de agua de mar, se han incluido diferentes tipos de dispositivos de recuperación de energía. Por las presiones tan altas que se manejan para poder realizar el proceso de ósmosis inversa para el agua de mar, los dispositivos de recuperación de energía representan un ahorro de energía considerable dependiendo de la eficiencia de éstos.

El ahorro en consumo de energía que llegan a tener estos equipos es cercano al 50%, lo que significa un ahorro considerable en dinero por m³ de agua producida ya que la energía eléctrica es el principal consumible que tiene una planta desaladora por ósmosis inversa.

Dentro de los dispositivos para recuperación de energía encontramos tres: tipo Pelton, turbocargador e intercambiador isobárico ERI, que a continuación se describen.

2.3.3.5.1 Recuperador de energía tipo Pelton

Es uno de los tipos más eficientes de turbina hidráulica. Es una máquina de flujo transversal que consiste en una rueda (rotor) con cucharas en su periferia, las cuales están especialmente diseñadas para convertir la energía de un chorro de agua que incide sobre las cucharas (Figura 2.21).



2.21 Turbina Pelton (Ecodeposits, 2004).

Una desaladora por ósmosis inversa con recuperador de energía Pelton tiene un arreglo parecido al de un equipo tradicional de desalación por ósmosis inversa sin recuperador de energía (Figura 2.22), el cual consta de un prefiltro, una bomba de alta presión y membranas de ósmosis inversa.

Para este arreglo, la turbina está acoplada directamente al eje del motor de la bomba. El rechazo a alta presión se dirige hacia las paletas de la turbina, las cuales hacen girar el eje y al estar acoplado al motor transfiere energía y ayuda a disminuir el trabajo de la bomba haciendo que la bomba sea de menor potencia.

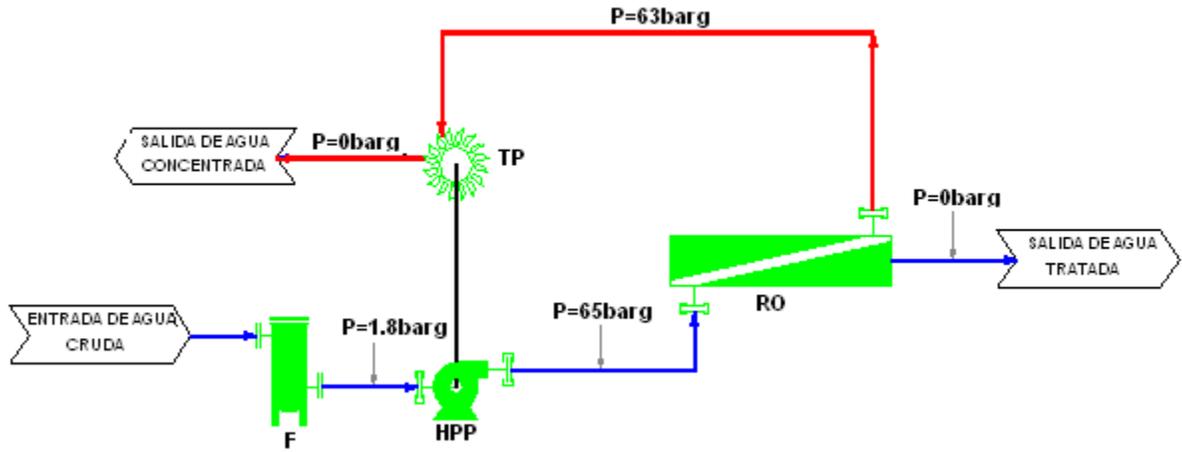


Figura 2.22 Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía Pelton.

2.3.3.5.2 Recuperador de energía tipo turbo cargador

Un recuperador de energía turbo cargador es otro tipo de turbina más eficiente que una turbina Pelton pero con diferencias en la instalación, funcionamiento y diseño de los impulsores; los cuales obtienen una mayor eficiencia en cuanto a la transmisión de la energía (Figura 2.23).

El turbo cargador es un equipo con un doble impulsor. El rechazo a alta presión entra en uno de los impulsores haciendo girar al eje mientras el otro impulsor está conectado del lado del agua cruda de mar, proveniente de la descarga de la bomba de alta presión. El agua impulsada por la bomba entra al recuperador de energía, el cual da un incremento final a la presión y al entrar al impulsor aumenta su presión gracias al giro que provoca el agua de rechazo en el otro impulsor (Figura 2.24).

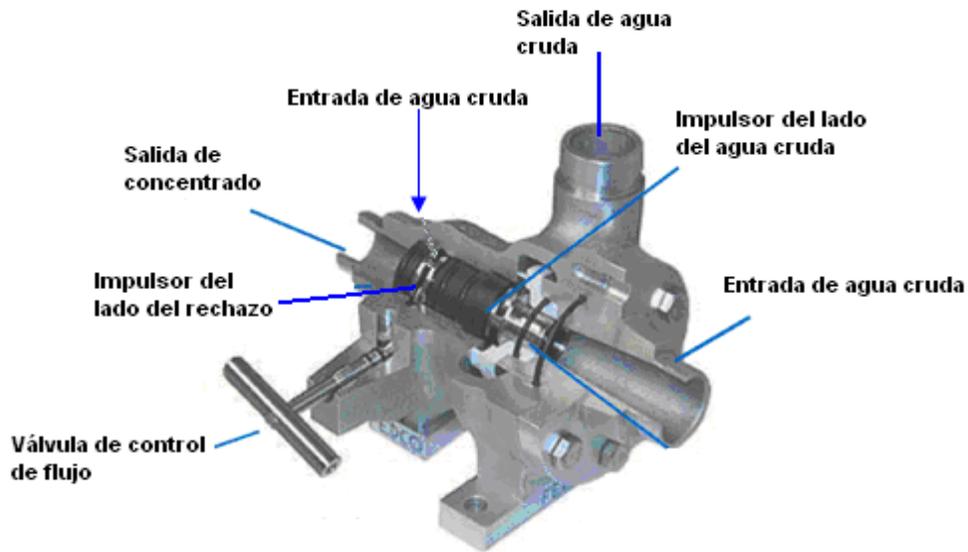


Figura 2.23 Turbo cargador (FEDCO, 2009).

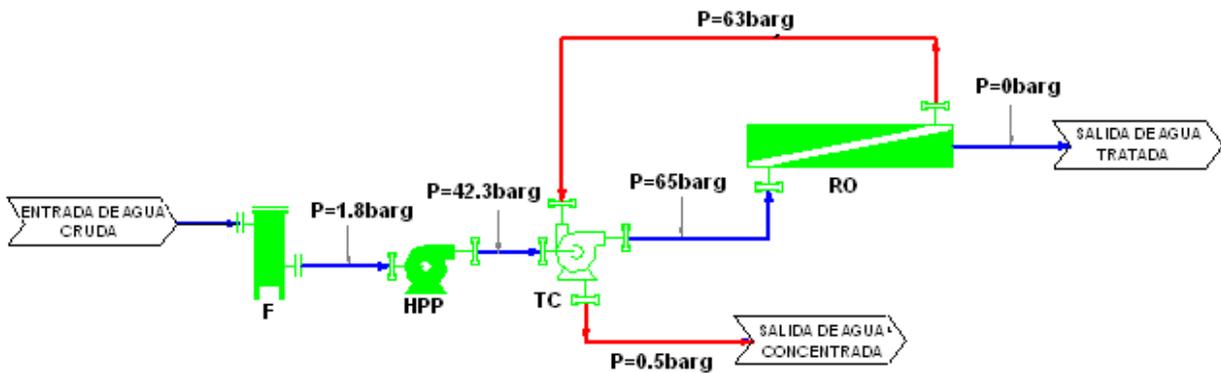


Figura 2.24 Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía turbo cargador.

2.3.3.5.3 Recuperador de energía tipo intercambiador isobárico ERI

El recuperador de energía de tipo isobárico es lo último en recuperación de energía para las desaladoras de agua de mar por ósmosis inversa, ya que incorporan un equipo de fácil funcionamiento y altas eficiencias en la transferencia de energía.

El intercambiador isobárico consiste en una cámara de fibra de vidrio y un cartucho cerámico interno que permite poner en contacto las corrientes de baja presión y alta presión para poder hacer el intercambio energético. El agua cruda que ingresa al equipo se divide en dos corrientes: una corriente que ingresa a la bomba de alta presión (flujo cercano al 40% del total) y otra que ingresa al equipo ERI (flujo cercano al 60 % del total). El agua que entra a la bomba de alta presión eleva su presión hasta el valor requerido para las membranas, mientras la corriente que entra al equipo ERI aumenta su presión debido al intercambio de energía quedando todavía por debajo de la presión requerida en las membranas por lo que se requiere de una bomba adicional para alcanzar dicha presión, mezclarse con el flujo que se descarga de la bomba de alta presión y así obtener el 100% del flujo (Figura 2.25).

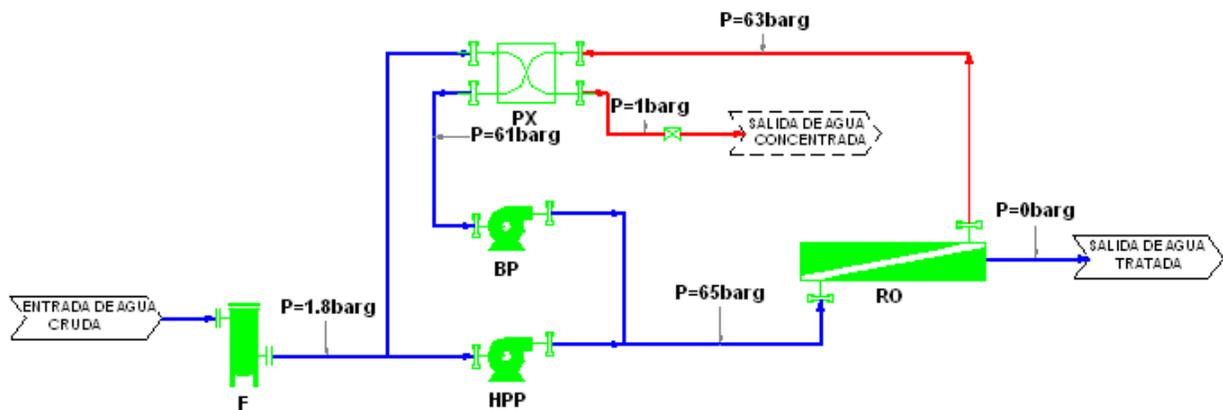


Figura 2.25 Arreglo de una ósmosis inversa de agua de mar con recuperador de energía ERI.

Funcionamiento del recuperador de energía isobárico ERI

- El agua de rechazo (color rojo) a alta presión presuriza y desplaza al agua de mar (color azul) de alimentación a baja presión, incrementando la presión de esta. (Figura 2.26).⁴⁴

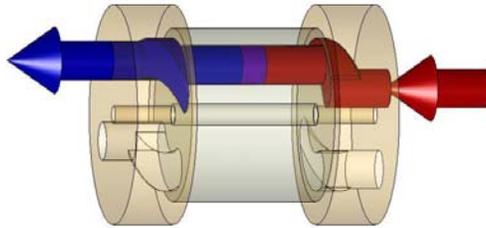


Figura 2.26 Funcionamiento ERI 01 (Energy recovery Inc, 2007).

- El rotor sella la cámara con agua concentrada a baja presión. (Figura 2.27).

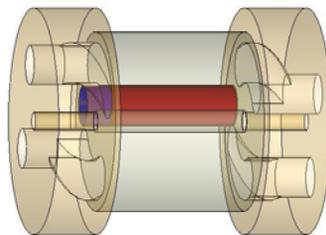


Figura 2.27 Funcionamiento ERI 02 (Energy recovery Inc, 2007).

- El agua de alimentación cruda llena la cámara del rotor desplazando el concentrado, como se ilustra en la Figura 2.28.

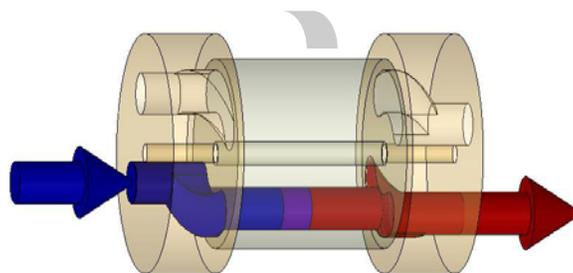


Figura 2.28 Funcionamiento ERI 03 (Energy recovery Inc, 2007).

- La cámara del rotor se sella con agua de alimentación. (Figura 2.29).

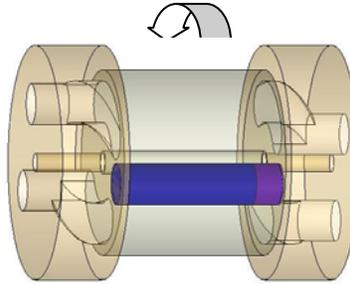


Figura 2.29 Funcionamiento ERI 04 (Energy recovery Inc, 2007).

- Nuevamente el agua de rechazo a alta presión presuriza y desplaza el agua de alimentación repitiendo el proceso (Figura 2.30).

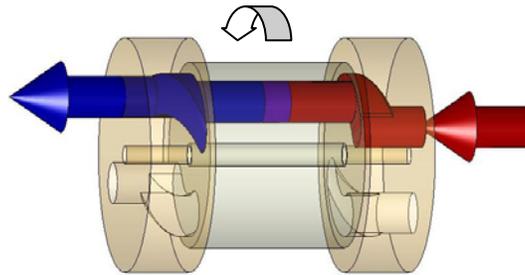


Figura 2.30 Funcionamiento ERI 05 (Energy recovery Inc, 2007).

En la actualidad la turbina Pelton es muy poco usada y el uso del recuperador de energía solo se limita al tipo ERI y turbocargador. La selección del tipo de recuperador de energía se basa principalmente en los costos de operación. En México debido al costo elevado de la energía eléctrica es preferido el tipo ERI, no así en Centro América donde es preferible el uso del turbocargador. La Tabla 2.7 presenta de manera comparativa los aspectos más importantes a considerar para la selección del mejor tipo de recuperador de energía de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

Tabla 2.7 Comparación de criterios de selección de tres diferentes recuperadores de energía de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa^{45, 48}.

Tipo de recuperador	ERI	Turbocargador	Pelton
Inversión	Alta	Mediana	Mediana
Nivel de programación	Alto	Mediano	Bajo
Nivel técnico del operador	Alto	Mediano	Bajo
Instrumentación	Alta	Mediana	Baja
Consumo energético	Bajo	Mediano	Mediano
Eficiencia de intercambio energético	95%	67%	75%

2.3.3.6 Materiales utilizados en los equipos de desalación de agua de mar

Adicionalmente, se necesita especificar el tipo de materiales que se usarán para estos equipos, ya que por manejar agua salada y estar instalados en ambientes salinos es necesario el uso de materiales resistentes a la corrosión, prefiriendo el uso de materiales plásticos en lugar de materiales metálicos.

Para la selección del tipo de material a usar en un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa (plástico o metal) se debe considerar la presión de operación. La presión es un indicador sencillo del tipo de material que se debe usar. En función de la presión de operación en todos los puntos del equipo, se puede identificar que existen dos zonas, una zona de baja presión y una zona de alta presión. Se identifican como zonas de baja presión la entrada y salida del filtro cartucho, salida a drenaje de los recuperadores de energía y la salida del agua de permeado.

Para la zona de baja presión será preferible el uso de materiales como el PVC, CPVC, PEAD, PP, PE, etc. (materiales disponibles en el mercado), siendo el PVC el usado con mayor frecuencia por ser uno de los más económicos.

Para las zonas de alta presión es necesario el uso de materiales metálicos debido a los valores altos de presión que se manejan. En este caso se hace uso de aleaciones de aceros inoxidable los cuales presentan mayor resistencia a la corrosión, conteniendo una alta concentración en Cr y baja concentración en C, ejemplos de éstos son el acero inoxidable 904L, acero inoxidable dúplex 2205, acero inoxidable dúplex 2207 ó titanio. La elección del material ya sea plástico o metálico dependerá de la inversión disponible.

En el Figura 2.31 se muestra el tipo de acero a utilizar en función de la concentración de cloruros en el agua. Para el caso de un agua de mar de 36000 ppm de SDT se tiene una concentración de más de 20000 ppm de cloruros, por lo que el material recomendado sería un acero inoxidable dúplex 2507.

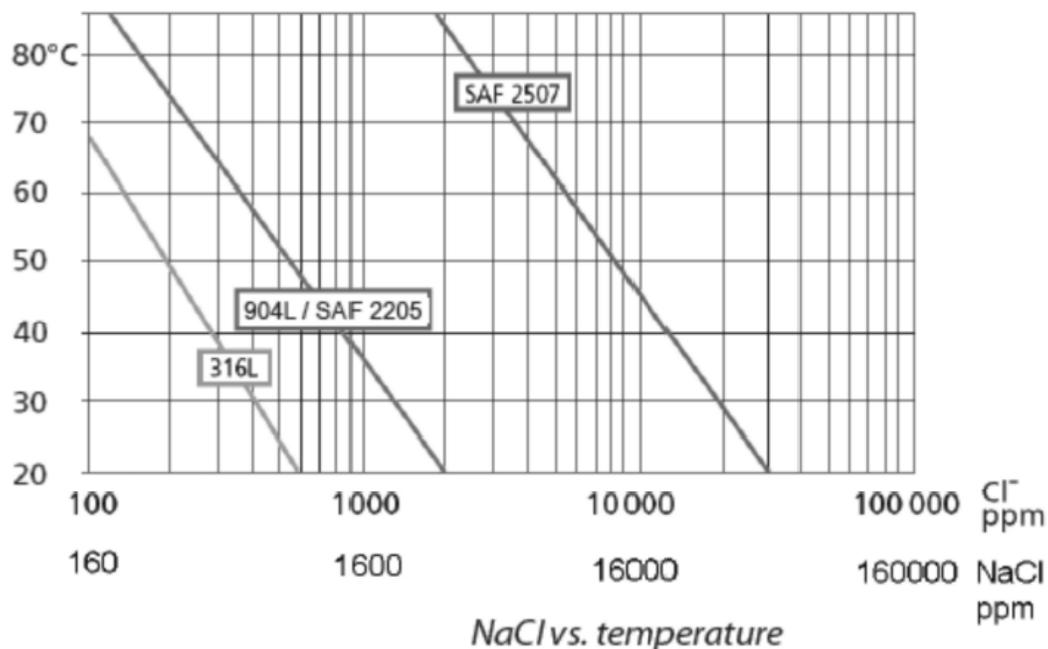


Figura 2.31 Resistencias de los inoxidables a los cloruros (Filmtec Reverse Osmosis Membranes, 2004).

El uso de estos materiales es igualmente aplicable para todos los equipos como bombas, recuperadores de energía, manómetros, analizadores, medidores de flujo, portafiltros, vasos portamembranas. Los cuales también deben tener resistencia a la corrosión.

2.4 Postratamiento

El agua permeada por la membrana de ósmosis inversa tiene una calidad que por lo regular se encuentra alrededor de los 500 ppm de SDT y un pH = 6. Dependiendo del uso que se le quiera dar podrá requerirse de un tratamiento adicional (postratamiento). Por ejemplo, la dosificación de un químico para el ajuste del pH si el agua es para beber, la dosificación de hipoclorito de sodio para evitar el crecimiento bacteriano, un segundo paso por ósmosis inversa para obtener agua con una concentración en sales más baja, para el uso de calderas (por ejemplo). En el Figura 2.32 se puede observar el diagrama de flujo de un proceso estándar por ósmosis inversa y en el Figura 2.33 se presentan los procesos adicionales que se le pueden dar al agua producto de la ósmosis inversa.

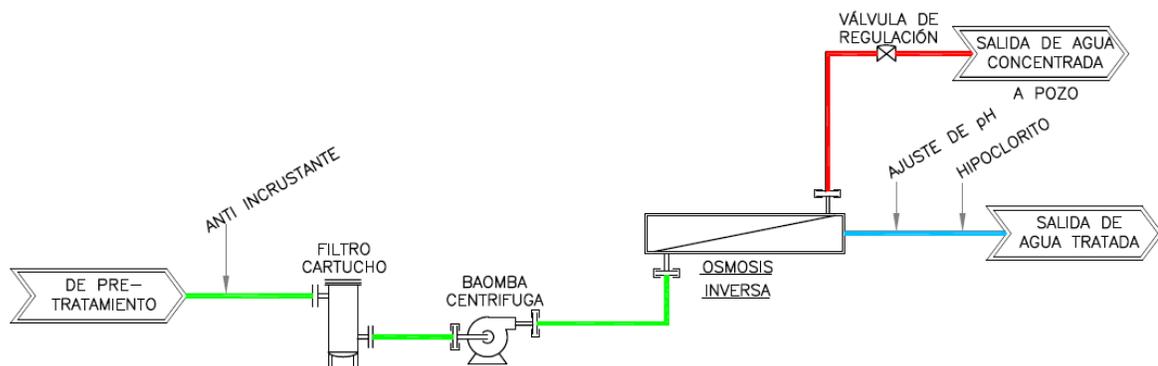


Figura 2.32 Postratamiento del producto con ajuste de pH y/o cloración.

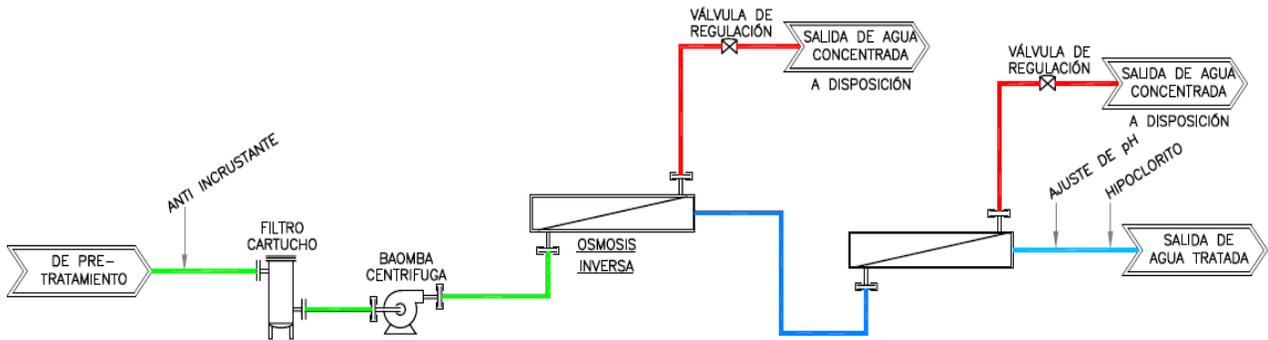


Figura 2.33 Postratamiento del producto, segundo paso de ósmosis inversa y/o ajuste de pH y/o cloración.

Es importante mencionar que los procesos de pretratamiento dependen de la calidad del agua a tratar (Tabla 2.8) y los del postratamiento implicados dependen del uso que se le quiera dar al agua o bien, de alguna especificación del agua producto que se requiera (Tabla 2.9).

Tabla 2.8 Selección del pretratamiento para los equipos de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

SST ppm	COT ppm	Turbidez UTN	Grasas y aceites ppm	Pretratamineto
<1000	<30	<2000	<120	COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + FLOTACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA
<1000	<30	<2000	<5	COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + SEDIMENTACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA
<50	<5	<20	<5	COAGULACIÓN + FLOCULACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA
<20	<5	<20	<5	COAGULACIÓN + FILTRACIÓN MULTIMEDIA
<10	<3	<5	0	FILTRACIÓN MULTIMEDIA

Tabla 2.9 Selección del tren de postratamiento para los equipos de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.

Uso	Pos tratamiento
Agua potable	Ajuste de pH y/o adición de hipoclorito de sodio y/o adición de un anticorrosivo
Agua para riego	Ajuste de pH
Agua para calderas o turbinas	Segundo paso de ósmosis inversa + Electrodeionización

2.5 Programas de cómputo comerciales para el diseño de sistemas de ósmosis inversa

Los programas de cómputo o cálculo, proporcionados por los proveedores de equipos y membranas de sistemas de desalación por ósmosis inversa, son indispensables en el dimensionamiento del sistema de desalación de agua de mar, ya que estos programas proporcionan información necesaria en el desarrollo de una ingeniería de detalle.

Algunos de estos programas de cómputo están disponibles en línea y pueden ser descargados libremente como lo son los programas para membranas y recuperadores de energía, no así para bombas, para el cual es necesaria la intervención del proveedor.

A continuación se presentan las páginas electrónicas de algunos programas disponibles en la red, en función de los componentes del sistema de desalación a diseñar o seleccionar.

a) Programas para cálculo de membranas:

- <http://www.membranes.com/index.php?pagename=imsdesign>
- http://www.dowwaterandprocess.com/support_training/design_tools/rosa_reg.htm
- http://www.kochmembrane.com/support_ropro_download.html

- <http://www.toray-membrane.com/application/page.aspx>

b) Programas para cálculo de recuperador ERI:

- <http://www.energyrecovery.com/index.cfm/0/0/56-Power-Model.html>

3 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE SISTEMAS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

El costo de inversión es el factor más importante en la implementación de una tecnología en la desalación de agua de mar y dentro de esta inversión inicial los principales costos son:

- Equipo principal de proceso.
- Tuberías.
- Bombas de alimentación, distribución, etc.
- Control del proceso.
- Obra de toma de agua de mar.
- Pre-tratamiento.
- Post- tratamiento.
- Sistema de limpieza.
- Distribución eléctrica.
- Construcción del lugar de instalación.
- Sistema de distribución.
- Disposición del concentrado.

Los principales factores que afectan el costo de inversión en el proceso de desalación son¹⁶:

- Calidad del agua de mar.
- Capacidad de la planta.
- Permisos y autorizaciones.
- Sitio de construcción (Principal factor).

En general, los procesos que implican un cambio de fase requieren un costo de inversión entre dos a seis veces mayor en comparación con el proceso por membranas, dependiendo del proceso y de la capacidad, esto debido probablemente a los altos costos de los equipos de proceso (sistemas complejos de vacío, sistemas de vapor, bombas y compresores) y a los elevados consumos

de energía. La Tabla 3.1 muestra que la destilación por evaporación súbita multietapa (DFM) es el proceso más costoso de todos. En comparación con los procesos de membranas la DFM resulta ser cinco veces más costoso que un proceso por membranas y dos veces más caro que los procesos térmicos para las capacidades reportadas.

Tabla 3.1. Intervalo de costos de inversión y de postratamientos para las principales tecnologías de desalación (White, 2005).

Tecnología	Intervalo de producción (m³/d)	Intervalo de inversión (millones de USD)	Intervalo de producción de pre y post tratamiento (m³/d)	Intervalo de inversión de pre y post tratamiento (millones de USD)
Ósmosis inversa (OI)**	4 000-200 000	5.16 – 195.5	4 000-200 000	0.367 - 10.45
Destilación por Compresión de Vapor (DCV)*	4 000-40 000	13.1 – 130.39	4 000–200 000	0.139 - 0.367
Destilación por Múltiple Efecto (DME)*	4 000-200 000	17.77 – 262.27	4 000–200 000	0.139 - 0.367
Destilación por evaporación súbita multietapa (DFM)*	4 000-200 000	27.31 – 391.08	4 000–200 000	0.139 - 0.367

* Los costos de pre y post tratamiento incluyen: desinfección con cloro, ajuste de pH, y re mineralización con cal.

** Los costos de post tratamiento incluyen: desgasificación, ajuste de pH, desinfección con cloro, filtración con cartuchos y remineralización con cal.

Los valores se encuentran actualizados mediante el Índice de Costos del *Chemical Engineering (ICCE)* correspondiente a octubre del 2011.

En la Tabla 3.1 también se presentan los costos de pre y post tratamiento para los procesos de térmicos y por membranas. Los procesos de membranas requieren la instalación de más operaciones unitarias para el pre tratamiento del agua salada como son la clarificación, filtración, el ajuste de pH, la desinfección con cloro, la

filtración con cartuchos, etc. Mientras que los procesos para el pre y post tratamiento de las tecnologías térmicas de desalación incluyen solamente desinfección con cloro y remineralización.

Los costos de pre tratamiento para los procesos de membranas son más costosos en comparación con los procesos térmicos, debido a que en los primeros se requiere de más operaciones unitarias dependiendo de la calidad del agua de mar que se vaya a tratar, lo que implica un costo adicional por la adquisición de esta tecnología.

Los costos totales de inversión y los costos del pre y post tratamiento son directamente proporcionales a la capacidad de producción de la planta desaladora.^{20, 21}

3.1 Costos de operación y mantenimiento de las plantas desaladoras

En la Tabla 3.2 se presentan los costos de operación y mantenimiento (O&M) para las tecnologías de desalación del agua de mar. Del lado derecho se presenta el costo de O&M sin tomar en cuenta el consumo de energía y del lado izquierdo se presenta el costo de O&M incluyendo el costo por energía.

La Tabla 3.2 muestra que los costos de operación y mantenimiento sin tomar en cuenta la energía son significativamente mayores para la destilación por evaporación súbita multietapa, destilación por múltiple efecto y la ósmosis inversa en comparación con la destilación por compresión de vapor. Uno de los inconvenientes de la ósmosis inversa es el costo de filtros cartucho que se requieren para su funcionamiento y el nivel de calificación que debe poseer el personal que la opera, lo cual incrementa los costos de O&M. En contraparte, el proceso térmico por compresión de vapor es el que presenta el costo de operación más bajo, debido a que esta tecnología generalmente se aplica a unidades de pequeña capacidad. Una de sus grandes ventajas es que la operación es sencilla y

el agua que produce es de alta calidad con valores de SDT en destilado de alrededor de 25 mg/L.

Tabla 3.2 Costos de operación y mantenimiento para las principales tecnologías de desalación (White 2005).

Tecnología	Intervalo de producción (m ³ /d)	Intervalo de Costos de O&M (Millones USD/año)	
		Sin incluir el costo energético	Incluyendo el costo energético
Destilación por Compresión de Vapor (DCV)	4 000 – 40 000	0.158 - 1.867	0.615 - 6.15
Destilación por Múltiple Efecto (DME)	4 000 - 200 000	0.566 - 28.3	0.923 - 62.26
Ósmosis inversa (OI)	4 000 - 200 000	0.615 - 29.19	0.824 - 41.61
Destilación por evaporación súbita multietapa (DFM)	4 000 - 200 000	0.645 – 31.97	1.43 – 71.99

Los valores se encuentran actualizados mediante el Índice de Costos del *Chemical Engineering* (ICCE) correspondiente a octubre de 2009.

Considerando los costos por energía en la O&M, los procesos térmicos DME y DFM son los más costosos en comparación con el proceso de membranas, esto debido al alto consumo de energía para su operación. El costo por energía oscila entre 50 kWh/m³ para el proceso de membranas y 69.44 kWh/m³ para procesos térmicos.^{22, 23.}

4 APLICACIÓN DE LA GUÍA DESARROLLADA EN UN EJEMPLO DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

Para el diseño de una planta desaladora por ósmosis inversa es necesario seguir ciertos pasos, a continuación se presenta un ejemplo de diseño.

Los datos inicialmente necesarios son:

- a. Selección de la capacidad de planta desaladora y la concentración de SDT del agua de mar.
 - Flujo de agua producto, $Q_{AP} = 800 \text{ m}^3 / d$. (Solo como ejemplo)
 - Concentración del agua de mar (Tabla 4.2), $C_{AS} = 36,000 \text{ ppm}$.

Tabla 4.1 Análisis químico típico del agua de mar con 36000 ppm de concentración (de Tabla 2.3).

Calcio	421.71 mg/L	Sílice	0.04 mg/L
Magnesio	1,347.43 mg/L	Cloruros	20,262.86 mg/L
Sodio	11,211.43 mg/L	Sulfatos	2,818.29 mg/L
Potasio	401.14 mg/L	Fluoruros	1.44 mg/L
Bario	0.05 mg/L	Bromuros	66.86 mg/L
Estroncio	13.37 mg/L	Nitratos	0.72 mg/L
Hierro	0.02 mg/L	Bicarbonatos	156.34 mg/L
Manganeso	0.01 mg/L	Boro	5.14 mg/L
SDT	36,000 mg/L	pH	8.1

- Recuperación estándar para desaladoras por ósmosis inversa de 42%.
- Temperatura promedio mínima de 20°C, temperatura máxima promedio de 26°C.
- Calidad del agua tratada, agua potable.

Con esta información se puede comenzar el diseño del equipo de ósmosis inversa teniendo en mente los elementos principales que conforman un equipo de ósmosis inversa para agua de mar.

b. Cálculo de los flujos de las corrientes involucradas en el proceso (Figura 4.1) por balance de masa.

$$Q_{AS} = \frac{Q_{AP}}{\text{Recuperación}} \quad Ec _ 4.1$$

$$Q_R = Q_{AS} \times (1 - \text{Recuperación}) \quad Ec _ 4.2$$

$$Q_{AS} = \frac{800 \text{ m}^3 / \text{d}}{0.42} = 1904.76 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$Q_R = 1904.76 \text{ m}^3 / \text{d} \times (1 - 0.42) = 1104.76 \text{ m}^3 / \text{d}$$

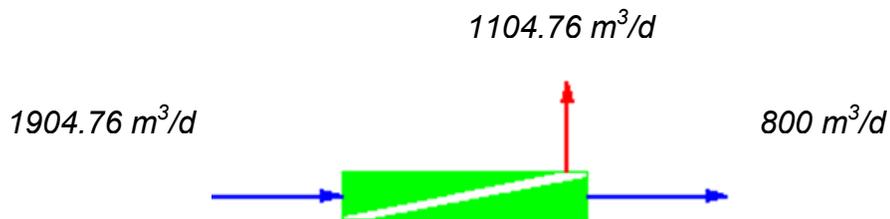


Figura 4.1 Flujos de trabajo de acuerdo a diseño.

$$Q_{AP} = \text{Flujo_de_agua_Producto}$$

$$Q_{AS} = \text{Flujo_de_agua_Salada}$$

$$Q_R = \text{Flujo_de_Rechazo}$$

Una vez calculados los flujos se procede a calcular y especificar cada una de los equipos de acuerdo al tipo de recuperador de energía que se requiera utilizar.

c. Selección del tipo de obra para toma de agua.

Si la planta tiene una capacidad menor a 20,000 m³/d de agua, producto se tiene la opción de usar pozos playeros (asumiendo que las características geológicas del lugar lo permiten) o una obra de toma abierta. Si se selecciona una obra de toma abierta se tiene que usar un pretratamiento más complejo dependiendo de qué tan sucia esté el agua (alto contenido de algas, grasa, aceite, etc.); en este caso se utilizará una obra de toma por pozo lo cual evitará la necesidad de un pretratamiento más complejo.

La producción de un pozo es cercana a los 50 Lps (180 m³/h)³, por lo que para producir 1904 m³/d se necesitarían 0.44 pozos, lo que indica que la opción de usar un pozo es muy razonable.

$$\frac{1904m^3 / d}{24 * 180m^3 / h * pozo} = 0.44 _ pozos$$

Cálculo del filtro cartucho.

El filtro cartucho es el mismo para ambos tipos de recuperador de energía, que de acuerdo al dato de diseño que se ha especificado que es de

$$\frac{4gpm}{10" _ de _ longitud _ de _ cartucho} \approx \frac{0.9m^3 / h}{10" _ de _ longitud _ de _ cartucho},$$

si el flujo de agua salada es de 1904 m³/d, se tiene que:

$$\frac{1904.76m^3 / d}{24 * 0.9m^3 / h} * 10" _ de _ cartucho = 88.2 _ cartuchos _ de _ 10" .$$

Para un filtro cartucho en desaladoras es común manejar longitudes de entre 30" y 40" que evita el manejo de muchos cartuchos.

Con lo que se tiene:

$$\frac{88.2 _ cartuchos _ de _ 10"}{4} = 20.04 \approx 20 _ cartuchos _ de _ 40" _ ó$$

$$\frac{88.2 \text{ _cartuchos _de _10"} }{3} = 29.4 \approx 30 \text{ _cartuchos _de _30"} , \text{ de los tama\u00f1os}$$

comerciales que se manejan se tienen portafiltros de 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 16, 20, 22, 24, 35, 54 y 80 cartuchos.

Para este ejemplo el resultado de usar 20 cartuchos de 40" parece ser mejor opci\u00f3n que utilizar 30 filtros de 30" de longitud, ya que con los cartuchos de 40" el dise\u00f1o se aproxima m\u00e1s a la velocidad de dise\u00f1o.

d. Membranas de \u00f3smosis inversa.

Para poder establecer las condiciones de operaci\u00f3n de las membranas se usa el programa de alguno de los principales fabricantes de membranas como son Hydranautics, Filmtec, Koch y Toray, de los cuales se obtiene informaci\u00f3n como: presiones en diferentes puntos, alertas por problemas de incrustaciones, paso de sales en el permeado, velocidad del agua a trav\u00e9s de la membrana, as\u00ed como alertas por alg\u00fan error en el dise\u00f1o.^{46, 47}

Una de las condiciones de dise\u00f1o que se debe cuidar es el flux, que es el flujo de permeado por unidad de \u00e1rea expresada en Lmh (litros por metro cuadrado por hora) o gfd (galones por pie cuadrado por d\u00eda) que para el caso del agua salada no debe exceder el valor de 17 Lmh \u00f3 10 gfd (valor tomado de la pr\u00e1ctica en dise\u00f1o de \u00f3smosis inversa para agua de mar).

Como aproximaci\u00f3n se utiliza el \u00e1rea de una membrana de 8" de di\u00e1metro, con esta \u00e1rea y el flux de dise\u00f1o se puede obtener el n\u00famero aproximado de membranas.

Para una membrana de 8" de di\u00e1metro tenemos 400 ft² (37.2 m²) y un flujo de

$$800 \frac{m^3}{d} = 33333 \frac{L}{h} \text{ se tiene:}$$

$$Flux = \frac{Q}{\#_{membranas} * A_m}$$

Ec _ 4.3

Donde:

Q = Flujo de agua permeada en L/h

#_{membranas} = número de membranas

A_m = Área de la membrana

Por lo que el número de membranas es igual a:

$$\# \text{ membranas} = \frac{Q}{\text{Flux} * A_m} \quad \text{Ec}_- 4.4$$

$$\# \text{ membranas} = \frac{33,333 \frac{\text{Lts}}{\text{h}}}{17 \frac{\text{Lts}}{\text{m}^2 \times \text{h}} \times 37.2 \text{m}^2}$$

$$\# \text{ membranas} = 52$$

Para agua de mar lo más común es usar vasos porta membranas con capacidad para almacenar 7 membranas (tamaño de vasos usado en el diseño de desaladoras), ya que se tratará de usar el mínimo número de vasos porta membranas, por lo que para este ejemplo se necesitan:

$$\frac{52 _ \text{membranas}}{7 \frac{\text{membranas}}{\text{portamembrana}}} = 7.42 _ \text{portamembrana} .$$

Se redondea el número de vasos a 8 para no exceder el diseño de un flux de 17 Lmh.

Con la información de flujos y el número de vasos portamembranas y membranas, se puede utilizar uno de los programas de cálculo de los fabricantes de membranas para poder proyectar el comportamiento del sistema⁴⁶. Para este ejemplo se utilizó el programa de cálculo del fabricante de membranas Hydranautics.

En una primera pantalla (Figura 4.2) se introduce la información obtenida anteriormente. Se introduce información general como es el nombre del proyecto, pH, temperatura, el tipo de agua a alimentar y el análisis del agua de mar ion por ion de acuerdo a la información que se obtiene de la Tabla 4.1.

Ion	Concentración (ppm)	Concentración (meq)
Ca	421.7	21.03
Mg	1347.4	110.90
Na	11211.4	487.45
K	401.1	10.28
NH4	0.0	0.00
Ba	0.050	0.00
Sr	13.370	0.31
CO3	5.1	0.17
HCO3	156.3	2.56
SO4	2818.3	58.71
Cl	20262.8	571.59
F	1.4	0.07
NO3	0.7	0.01
B	5.10	0.00
SiO2	0.0	0.00

Figura 4.2 Pantalla 1, información detallada del agua de mar.

Se pasa a una segunda pantalla (Figura 4.3) donde se introducen las condiciones de diseño a las que se deberá trabajar y a las que el programa proyectará el comportamiento de las membranas.

Dentro de estas condiciones están:

- Edad de las membranas (considera un taponamiento de la membrana y un aumento en el paso de sales hacia el permeado), se considera un primer factor de diseño de 3 años de operación para proyectar como se comportarán las membranas.⁵

- En este ejemplo se usará una recuperación del sistema del 42% para un agua de mar de 36,000 ppm de SDT. Esta recuperación es un estándar que se maneja para aguas con esta concentración, muchas veces la recuperación está limitada por la presión osmótica y si ésta lo permite en ocasiones pueden llegar a alcanzarse recuperaciones de hasta el 50%.
- Para este primer cálculo se considera la temperatura mínima del agua para obtener la presión máxima del sistema.
- El tipo de agua a alimentar. Dependiendo del tipo de obra de toma el programa por default dirá si el flux al que se está trabajando es adecuado.
- El tipo de membrana que se utilizará. Se selecciona un tipo de membrana para trabajar a altas presiones y normalmente usadas para agua de mar y denotadas en su nombre por las letras **SW** (sea water).
- Número de vasos portamembranas, que de acuerdo al cálculo son 8.
- Número de etapas. Siempre igual a 1 para agua de mar.
- El incremento de paso de sales por año.
- Disminución de flux por año.

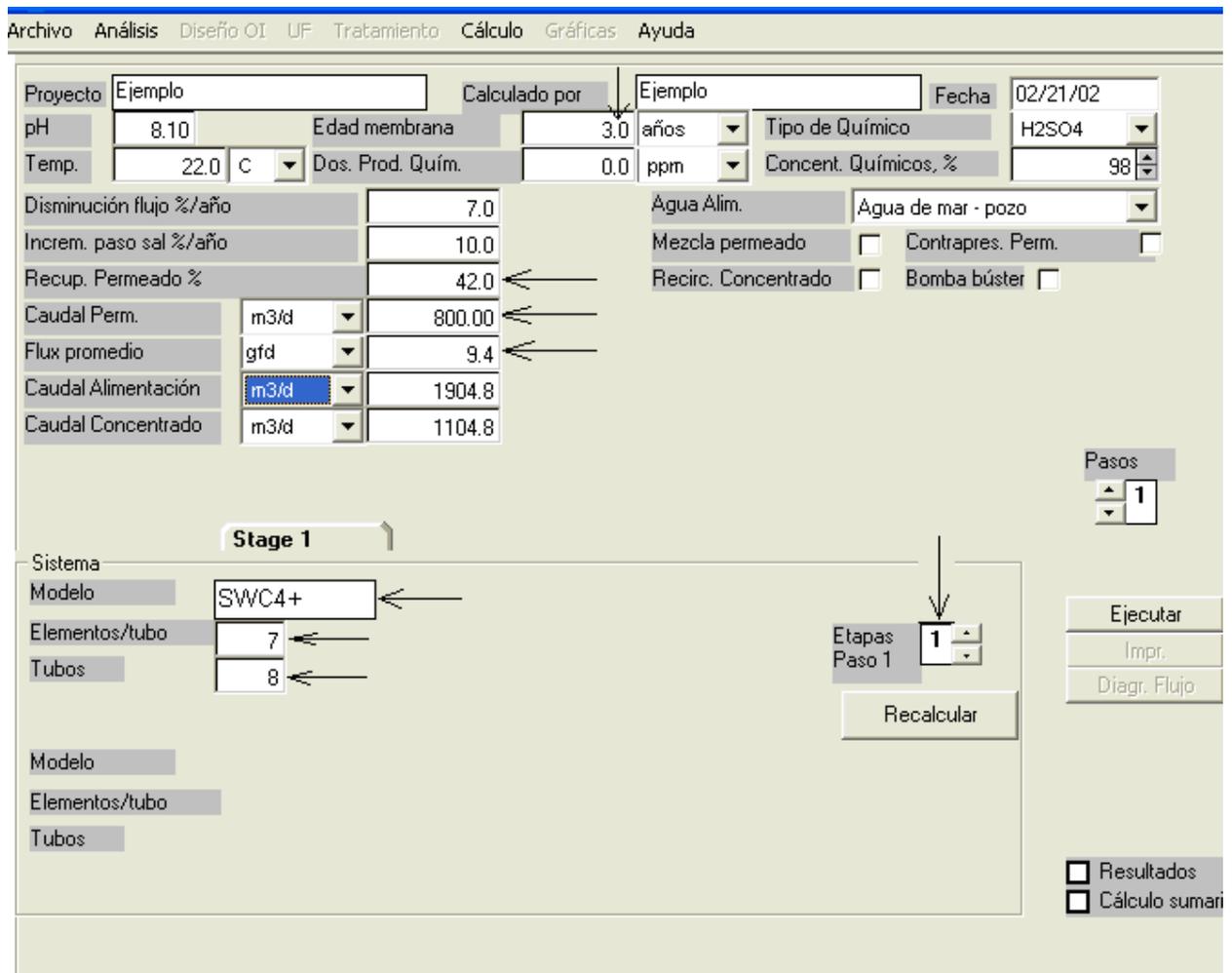


Figura 4.3 Pantalla 2, arreglo del equipo de ósmosis inversa.

Se selecciona la opción “Resultados” y posteriormente, “Ejecutar” (Figura 4.4).

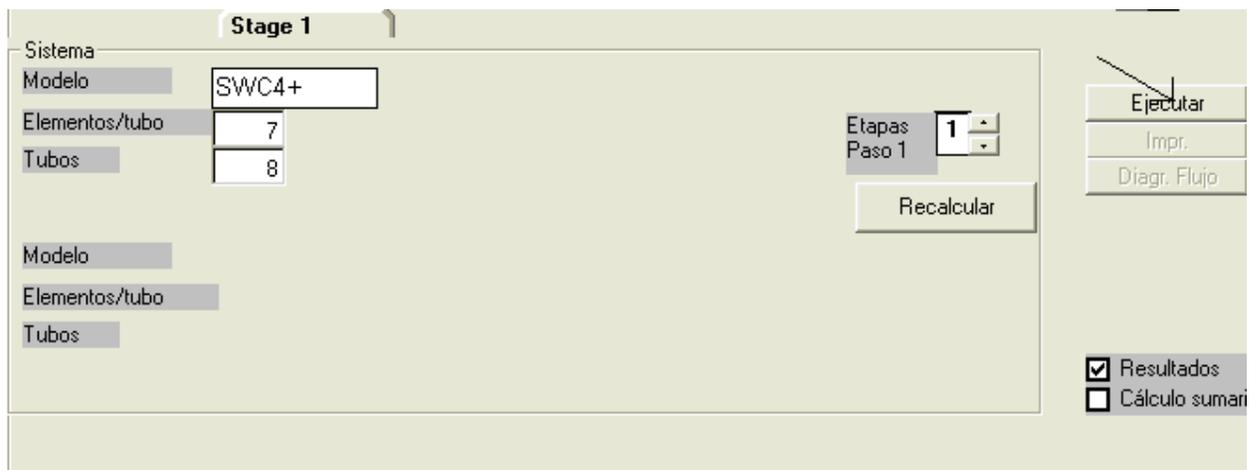


Figura 4.4 Ejecución del programa.

DISEÑO BASICO

Programa O.I. licenciado a:	Ejemplo		
Cálculo creado por:	Ejemplo		
Proyecto:		Caudal de Permeado:	800.00 m3/d
Caudal bomba alta pres:	79.4 m3/hr	Caudal agua cruda:	1904.8 m3/d
Presión recomendada para la bomba	65.3 bar		
Presión Alim.:	62.4 bar	Recuperación:	42.0 %
Temp. Agua Alim.:	22.0 C(72F)	Edad de las Membranas:	3.0 años
pH Agua Alim.:	8.1	Disminución flux %/año:	7.0
Dosis Químico, ppm (98%):	0.0 H2SO4	Incremento paso sales, %/año:	10.0
CO2 en alimentación:	1.43	Tipo de Alimentación:	Agua de mar - pozo
Flux promedio:	9.4 gfd		

Etapa	Perm. Caudal	Caudal/tubo Alim.	Conc. m3/hr	Flux gfd	Beta	Conc.&Contra. Presiones bar	bar	Elemento Tipo	Elem. N°	Arreglo
1-1	33.3	9.9	5.8	9.4	1.05	60.7	0.0	SWC4+	56	8x7

Ión	Agua cruda		Agua Alim.		Permeado		Conc.	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca	421.7	21.0	421.7	21.0	0.488	0.0	726.7	36.2
Mg	1347.4	110.9	1347.4	110.9	1.559	0.1	2322.0	191.1
Na	11211.4	487.5	11211.4	487.5	62.194	2.7	19285.0	838.5
K	401.1	10.3	401.1	10.3	2.780	0.1	689.5	17.7
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
Ba	0.050	0.0	0.050	0.0	0.000	0.0	0.086	0.0
Sr	13.370	0.3	13.370	0.3	0.015	0.0	23.041	0.5
CO3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
HCO3	156.3	2.6	156.3	2.6	1.392	0.0	268.5	4.4
SO4	2818.3	58.7	2818.3	58.7	3.494	0.1	4856.6	101.2
Cl	20262.8	571.6	20262.8	571.6	100.381	2.8	34863.2	983.4
F	1.4	0.1	1.4	0.1	0.014	0.0	2.4	0.1
NO3	0.7	0.0	0.7	0.0	0.026	0.0	1.2	0.0
B	5.10		5.10		0.641		8.33	
SiO2	0.0		0.0		0.00		0.0	
TDS	36639.6		36639.6		173.0		63046.5	
pH	8.1		8.1		6.2		8.3	

Figura 4.5 Pantalla 3, resultados del cálculo de la ósmosis inversa.

La Figura 4.5 presenta la serie de datos que despliega el programa, se observa la presencia de los datos introducidos en el programa así como información importante que es:

- Presión recomendada en las membranas.
- Flux de trabajo en gfd.
- Presión en el rechazo de las membranas.
- Calidad del agua tratada.
- Calidad del agua de rechazo.
- Selección del tipo de recuperador de energía a usar.

Con la información de la proyección se puede continuar con el diseño del equipo. Se tiene la opción de elegir entre dos recuperadores de energía:

- a. Recuperador de energía tipo ERI.
- b. Recuperador de energía tipo Turbo cargador.

Opción a.

Para esta opción se tiene la posibilidad del uso de otro programa proporcionado por el fabricante ERI. ⁴⁵

En este programa se introducen los valores obtenidos del programa de membranas como son (Figura 4.6):

1. Presión recomendada en las membranas.
2. Presión en el rechazo de las membranas.
3. Recuperación del sistema.

INPUT DESCRIPTIONS		INPUTS
Units Metric or English	M or E	M
Manual or auto efficiencies	m or a	m
Permeate flow	m ³ /day	800
RO recovery rate	%	42%
RO feed pressure	bar	65.3
Membrane differential pressure	bar	5.4
PX LP discharge pressure	bar	1.0
Feedwater salinity	mg/l	36,000
Motor power Hz	50 or 60	60
Cost of power	\$/kWh	\$0.10
HP pump efficiency	%	65%
HP pump motor efficiency	%	94%
Circulation pump efficiency	%	63%
Circulation pump motor efficienc	%	94%
Circulation pump VFD efficiency	%	97%
PX device design margin	%	6%

Figura 4.6 Programa de cálculo del recuperador de energía tipo ERI. Pantalla 1, suministro de información para el cálculo.

El programa calcula automáticamente los flujos y presiones en todos los puntos así como el modelo y número de equipos recuperadores de energía que se necesitan en el sistema (Figura 4.7).

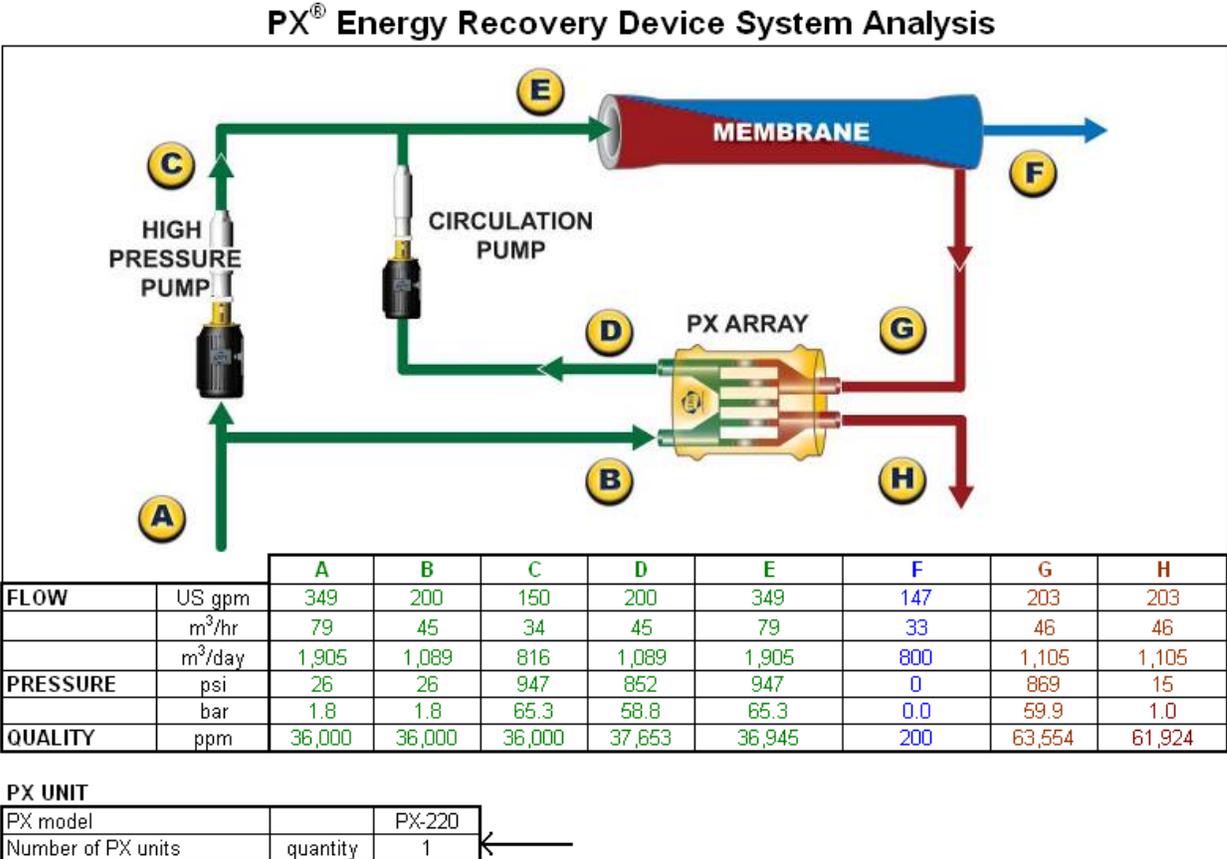


Figura 4.7 Pantalla 2, resultados del recuperador de energía.

Con esta información se pueden especificar los equipos restantes:

- Bomba de alta presión para un flujo **C** de 34 m³/h y una presión **C** en las membranas de 65.3.
- Bomba Booster para un flujo **D** de 45 m³/h, con una presión en la entrada **D** de 58.8 bar y una presión **E** de descarga de 65.3 bar.
- Recuperador de energía ERI igual a un equipo modelo PX-220. El número indica el flujo máximo en gpm que puede manejar el equipo y generalmente se diseñan a un 90 % de su capacidad.

Por lo que para una desaladora para producir 800 m³/d de agua permeada con recuperador de energía tipo ERI se resume a continuación:

- Filtro de cartucho, para 20 cartuchos de 40" de longitud.
- Bomba de alta presión, para un flujo de 34 m³/h a una presión de 65.3 bar. Para este caso el tipo de bomba más económica es la bomba centrífuga de múltiples etapas.
- Bomba Booster; para un flujo de 45 m³/h a una presión de 6.5 bar (65.3-58.8). Para este caso el tipo de bomba más económica es la bomba centrífuga de múltiples etapas.
- Número de vasos portamembranas; igual a 8.
- Número de membranas, igual a 56 membranas (7x8).
- Recuperador de energía, igual a 1 equipo ERI PX-220.
- Materiales
 - Tuberías:
 - PVC para las zonas de baja presión (presiones < 6 barg).
 - Acero inoxidable dúplex 2205 para zonas de alta presión (presiones > 6 barg).
 - Instrumentos:
 - Materiales en contacto con el agua de mar; Monel, materiales plásticos, titanio o algún acero al carbón o inoxidable con recubrimiento plástico.
 - Materiales en contacto con el agua producto; Acero inoxidable 316 y/o materiales plásticos.

Opción b.

Para esta existe la posibilidad del uso de otro programa, pero a diferencia del recuperador de energía ERI el programa no está disponible en Internet para uso libre.

Para poder obtener la información de cómo se comportará el sistema es necesaria la ayuda del fabricante para poder conocerla.

Al igual que en el otro programa en este es necesario suministrar la siguiente información:

1. Presión recomendada en las membranas.
2. Presión en el rechazo de las membranas.
3. Recuperación del sistema.
4. Flujo de agua producto.
5. SDT del agua de mar.

Con esta información el fabricante puede correr el programa y retornar la corrida con el comportamiento de los equipos dentro de este sistema. Además de proveer el número de unidades y modelo del turbo cargador (Figura 4.8 y 4.9).

Model: HPBe-30	Part# 1-0030-0-0
Duty Point	
Feed flow	79.4 m ³ /hr
Brine flow	46.1 m ³ /hr
Membrane pressure	65.3 bar
Brine pressure	60.7 bar
Brine outlet pressure	1.0 bar
Feed TDS	36,000 ppm
Feed SG (calc)	1.031
Performance	
Feed boost pressure	36.2 bar
Pump outlet pressure	29.1 bar

Figura 4.8 Ejemplo de cómo presenta el fabricante la Información necesaria para poder correr el programa.

Hydraulic Performance Diagram

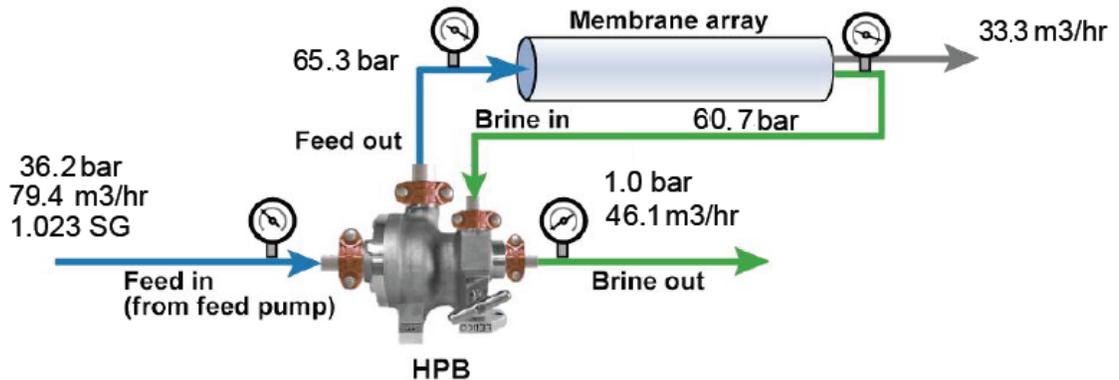


Figura 4.9 Ejemplo de los resultados que presenta el programa con recuperador de energía tipo turbo cargador.

Por lo que para una desaladora para producir 800 m³/d de agua permeada con recuperador de energía tipo turbo cargador se resume a continuación:

- Filtro de cartucho, para 20 cartuchos de 40" de longitud.
- Bomba de alta presión, para un flujo de 79.4 m³/h a una presión de 36.2 bar. Para este caso el tipo de bomba más económica es la bomba centrífuga de múltiples etapas.
- Número de vasos portamembranas, igual a 8.
- Número de membranas; igual a 7 x 8 = 56 membranas.
- Recuperador de energía, igual a 1 equipo turbo cargador HPBe-30. De acuerdo a proyección de proveedor.
- Materiales
 - Tuberías:
 - PVC para las zonas de las zonas de baja presión (presiones < 6 barg).
 - Acero inoxidable duplex 2205 para zonas de alta presión (presiones > 6 barg).
 - Instrumentos:

- Materiales en contacto con el agua de mar; Monel, materiales plásticos, titanio o algún acero al carbón o inoxidable con recubrimiento plástico.
- Materiales en contacto con el agua producto: Acero inoxidable 316 y/o materiales plásticos.

4.1 Cálculo de consumos de energía

La energía es el principal consumible de las desaladoras de agua de mar, por lo que una comparación en el consumo de energía de estos equipos proporciona un dato muy importante en cuanto al tipo de recuperador de energía a utilizar.

4.1.1 Cálculo de consumos energéticos con los diferentes recuperadores de energía

Teniendo los datos de operación con cada recuperador de energía se puede hacer el cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida y se puede hacer el comparativo entre estos equipos y ver cual es más eficiente y por tanto, cual es más económico en su operación.

De acuerdo a la siguiente fórmula, el consumo de energía se calcula como sigue:

$$KWh = 0.0278 \frac{Q * H * S}{\eta_{Bomba} * \eta_{Motor}} \quad Ec_4.5$$

Donde:

Q = Flujo en **m³/h**.

H = Presión de descarga de la bomba en **bar**.

S = Gravedad específica.

η_{Bomba} = Eficiencia de la bomba.

η_{Motor} = Eficiencia del motor.

4.1.1.1 Cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida para un recuperador tipo ERI

A continuación se ejemplifica el cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida de un recuperador de energía tipo ERI (ver Figura 4.7).

Partiendo del principio de que con este arreglo se trabaja con dos bombas, se tiene:

$$KWh = 0.0278 \left[\frac{Q_{HPP} * H_{HPP}}{\eta_{Bomba-HPP} * \eta_{Motor-HPP}} + \frac{Q_{BP} * H_{BP}}{\eta_{Bomba-BP} * \eta_{Motor-BP}} \right] * S \quad Ec _ 4.6$$

$$KWh = 0.0278 \left[\frac{34 * (65.3 - 1.8)}{0.64 * 0.94} + \frac{45 * (65.3 - 58.8)}{0.64 * 0.94} \right] * 1$$

$$KWh = 113.28$$

$$Consumo = \frac{KWh}{Q_{AP}} \quad Ec _ 4.7$$

$$Consumo = \frac{113.28 \text{ KWh}}{33 \frac{m^3}{h}}$$

$$Consumo = 3.43 \frac{KW}{m^3}$$

4.1.1.2 Cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida para un recuperador tipo Turbo cargador

A continuación se ejemplifica el cálculo del consumo de energía por metro cúbico de agua producida de un recuperador de energía tipo Turbocargador se tiene (ver Figura 4.9).

$$KWh = 0.0278 \frac{Q_{HPP} * H_{HPP} * S}{\eta_{Bomba-HPP} * \eta_{Motor-HPP}}$$

Ec _4.8

$$KWh = 0.0278 \frac{79.4 * (36.2 - 1.8) * 1}{0.64 * 0.94}$$

$$KWh = 126.21$$

$$Consumo = \frac{126.21 \text{ KWh}}{33 \frac{m^3}{h}}$$

$$Consumo = 3.82 \frac{KWh}{m^3}$$

Tabla 4.2 Comparación de consumos energéticos con los diferentes tipos de recuperador de energía.

Tipo de recuperador	Flujo Producto (m ³ /h)	Consumo de energía KW/m ³
ERI	33	3.43
Turbocargador	33	3.82

Como se puede ver en la tabla 4.3 es más eficiente el recuperador de energía tipo ERI con un consumo de 3.43 KWh/m³ y más ineficiente el turbocargador con un consumo de 3.82. KWh/m³.

En resumen las especificaciones técnicas de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, para producir 800 m³/d de agua permeada se presenta a continuación:

- Tipo de obra de toma de agua de mar: Pozos playeros
- Tipo de pretratamiento: Ninguno
- Elementos del sistema de ósmosis inversa:

- Filtro de cartucho, para 20 cartuchos de 40" de longitud.
- Bomba de alta presión y recuperador de energía de acuerdo al tipo de recuperador de energía a usar.
- Número de vasos portamembranas, igual a 8.
- Número de membranas; igual a $7 \times 8 = 56$ membranas.
- Postratamiento (para llegar a agua potable):
- Ya sea por la NOM-127 donde es necesaria una concentración < 1000 ppm de SDT o por la Organización Mundial de la Salud que recomienda una concentración < 500 ppm de SDT solo será necesario:
 - Ajuste de pH
 - Cloración

Con esta información se tendrán los equipos principales que intervienen en el proceso de desalación, a esta información será necesario agregar ingeniería de detalle como es el dimensionamiento de tuberías, detalles específicos de válvulas, instrumentos y equipos, el modelo 3d del equipo, la programación, el modo de transporte del equipo, el diseño de una estructura, tratamientos adecuados para los materiales metálicos para hacerlos más resistentes a la corrosión, etc. Es decir, faltaría aún una ingeniería completa con detalle del sistema.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se desarrolló una guía para el diseño y los parámetros de operación de sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. La guía elaborada es una herramienta simple y de fácil uso para ayudar a los tomadores de decisiones en el área de desalación de agua de mar, en particular porque estos sistemas presentan un crecimiento elevado dada la alta factibilidad que muestran sobretodo en zonas de carencia de fuentes de abastecimiento de agua dulce.

La elaboración de la guía se basa en la identificación y descripción de los principales componentes de los sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa: obra de toma de agua de mar, pretratamiento, equipo de ósmosis inversa (cartuchos de filtros, bomba de alta presión, membranas, recuperador de energía) y postratamiento.

De especial importancia es la determinación de las características fisicoquímicas del agua de mar a tratar, y la aplicación que se le dará al efluente del sistema de desalación debido a que esta información determina varios criterios que se proponen para la selección y diseño de los componentes mencionados.

Los criterios que se proponen en esta guía, para el diseño y operación de los principales componentes identificados para los sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, se basan en manuales y programas de cómputo desarrollados por los fabricantes y proveedores más reconocidos a nivel mundial.

La desalación de agua de mar por ósmosis inversa se presenta como una opción mas económica tanto en su inversión inicial como en su operación y mantenimiento ya que aunque el pretratamiento que usan estos equipos es más robusto y más costoso al incluir el equipo principal de desalación (ósmosis

inversa o destiladores) el costo total de inversión es menor para una planta que usa una tecnología por membranas en comparación con la tecnología por destilación para plantas con capacidad de 4000 a 200000 m³/d.

Aunque la destilación por compresión de vapor presenta costos de operación más económicos en su operación, sigue siendo preferida la tecnología por ósmosis inversa al no tener limitantes en cuanto al tamaño de la planta a diseñar, mientras que la DCV está limitada a equipos con producciones de hasta 3800 m³/d lo cual encarece el costo de inversión al tener que hacer uso de más equipos.

La aplicación de la guía elaborada en el diseño de un sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, confirmó las bondades que presenta la metodología propuesta, sin embargo, es importante reconocer que dicha guía requiere de una continua actualización de la misma.

6 REFERENCIAS

1. Del Castillo LF. (2003), *El fenómeno mágico de la Ósmosis*, Fondo de Cultura Económica, 2ª ed, México, 91 p.
2. Buross OK. (2000), *The ABC's of Desalting*. International Desalination Association, EUA, 32 p.
3. Pankratz T. (2009), *An Overview of Seawater Intake Facilities for Seawater Desalination*. EUA, 22 p.
4. Escudero C. (2006) , *Agua y desalación en México*. Biblioteca Jurídica Virtual del instituto de investigaciones Jurídicas de la UNAM. México, 22 p.
5. Dow Liquid Separations. (2004), *FILMTEC Reverse Osmosis Membranes Technical Manual*, EUA , 179 p.
6. Krishna H.J. (2005), *Introduction to desalination technologies*, Texas A&M University, EUA, 70 p.
7. Department of Agriculture, Fisheries & Forestry, (2002), *Introduction to Desalination Technologies in Australia*, Australia, 46 p.
8. Pique G. (1990), *Potabilización de Agua de Mar por Ósmosis Inversa*, San Diego California, 15 p.
9. International Desalination Association. (2008), *Desalination in 2008 Global Market Snapshot*, EUA, 8 p.
10. SEMARNAT. (1996), *Norma oficial Mexicana NOM-001*, SEMARNAT, México, 35 p.

11. SEMARNAT. (1996), *Norma oficial Mexicana NOM-002*, SEMARNAT, México, 18 p.
12. SEMARNAT. (1997), *Norma oficial Mexicana NOM-003*, SEMARNAT, México, 17 p.
13. SEMARNAT. (1994), *Norma oficial Mexicana NOM-127*, SEMARNAT, México, 8 p.
14. *Comisión Nacional del Agua. (2001), Programa nacional hidráulico 2001-2006, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 140 p.*
15. *Comisión Nacional del Agua. (2008), Programa nacional hidráulico 2007-2012, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 166 p.*
16. Younos T. (2005), *The economics of desalination". Journal of Contemporary water research & education*, EUA, 8 p.
17. Jones AT. (2006), *Seawater Intakes for Desalination*, The International Society of offshore and polar Engineers. EUA, 565 p.
18. Taft E P. (2000), *Fish protection technologies: a status report*, Environmental Science & Policy. EUA, 359 pgs
19. Cartier G., Corsin P. (2007), *Description of different water intakes for SWRO plants*, IDA World Congress-Maspalomas, España, 185 pgs
20. U.S. Department of the Interior. (2003), *Desalting handbook for planners*, 3a ed. U.S. Department of the Interior. EUA, 310 p.

21. Whithers A. (2005), *Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants*, Reino Unido, 24 p.
22. Borsani L. (2005), *Fundamental and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies*, Elsevier, EUA, 37 p.
23. Ettouney H, El-Dessouky H, Faibish R, Gowin P. (2002), *Evaluating the Economics of Desalination*, American Institute of Chemical Engineers, EUA, 39 p.
24. Miller JE. (2003), *Review of Water Resources and Desalination Technologies*, Sandia National Laboratories, EUA, 52 p.
25. Wiley & sons. (2004), *Planning guide for water utilities*, American Water Works Association, EUA, 62 p.
26. Department of agriculture, fisheries & forestry. (2002) *Introduction to desalination technologies in Australia*, Agriculture, fisheries & Forestry – Australia. Australia 2002, 46 p.
27. Fritzmann C, Löwenberg J. (2006), *State of the art of reverse osmosis desalination*, Techn EAU, EUA, 115 p.
28. Medina SJ. (1999), *Desalación de aguas salobres y de mar*, Mundi Prensa Libros S.A. España, 397 p.
29. Caballero CV. (2005), *Descripción del funcionamiento de la desaladora de agua de mar del canal de alicante*, España, 15 p.
30. Draft Guidelines for Drinking-water Quality Management. (2005), *Treatment Process, Filtration*, Ministry of Health, Nueva Zelanda, 31 p.

31. Tech Brief. (1996), *A National Drinking Water Clearinghouse Fact Sheet*, National Environmental Services Center, EUA, 20 p.
32. Mourato D. (1995), *Applications of Immersed Membranes in the Drinking Water Field*, ZENON Environmental, Canada, 17 p.
33. Organización panamericana Salud. (2005), *Guía de procedimientos para la operación y mantenimiento de sedimentadores*, Organización panamericana Salud, Perú, 9 p.
34. AWWA. (1996), *Water treatment - Membrane Process*, 1a ed, McGraw-Hill International, EUA, 320 p.
35. Ribeiro RM, Bergamasco R, Gimenes ML, Müller C. (2007), *Preparación de Membranas para producción de agua potable*, Universidade Estadual de Maringá, Brasil, 8 p.
36. Buvisa PI. (2009), *Ultrafiltración*, Condorchem water waste air. Barcelona, 10 p.
37. Jacangelo J, Adham SA, Laine J. (1995), *Mechanism of Cryptosporidium, Giardia, and MS2 Virus Removal by MF and UF*, Journal AWWA, EUA, 121 p.
38. Fernández L. (2002), *Desarrollo de membranas de permeación para la separación de emulsiones oleosas*, Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Argentina, 28 p.

39. Malki, M. (2005), *Caso de estudio: Optimización de costos en la inhibición de incrustaciones en plantas desalinizadoras de ósmosis inversa*, American Water Chemicals, EUA, 8 p.
40. García A, Rojas A. (2006), *Comparación de los floculantes*, Universidad de Oriente, Cuba, 22 p.
41. McJunkin FE. (1985), *Agua y salud humana*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Perú, 195 p.
42. Greenlea L, Lawler D, Freeman B, Marrot B, Mollin P. (2009), *Reverse osmosis desalination, Water sources, technology, and today's challenges*, University of Texas, EUA, 2348 p.
43. Exclusive Seawater Desalination Separation Technology. [en línea] <http://waterdesalination.com/introduction.htm>. 11 de Agosto 2009.
44. How it works. [en línea] http://www.es.energyrecovery.com/px_technology/how_it_works.php4. 11 de Agosto 2009.
45. Power Model Selector. [en línea] <http://www.energyrecovery.com/index.cfm/0/0/56-Power-Model.html>. 3de Febrero 2009.
46. IMS design. [en línea] <http://www.membranes.com/index.php?pagename=imsdesign>. 8 de Junio 2009.
47. ROSA. [en línea] <http://www.dow.com/liquidseps/design/rosa.htm>. 17 de Julio 2009.

48. Bombas Fedco. [en línea] http://www.fedco-usa.com/prod_hpb.html. 4 de Junio 2009.
49. Mecánica Virtual, Artículos técnicos. [En línea] 2005. <http://www.mecanicavirtual.iespana.es/images-hazlo/filtr>. 4 de Febrero 2010.
50. Hoyos, R. Proceso de la filtración en América latina. [En línea] <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/1-2-02hoyos.pdf>. 4 de Febrero 2009.
51. Elregante. "Filtro de arena, propiedades y mantenimiento". [En línea] <http://elregante.galeon.com/aficiones1485906.html>. 13 de Abril 2010.
52. Aqua-Latina. "Descripción de los procesos". [En línea] <http://www.aqualatina.info/spanisch/produktsuche/prozess.php?id=9>. 12 de Junio 2009.
53. Cartuchos multicapa de filtración en profundidad para eliminación de partículas. [En línea] <http://www.psfiltracion.com/pdf/Broch%20Sartofine-PP.pdf>. Agosto 2009
54. Emalsa. [En línea] http://www.emalsa.es/3/3_10_6.php . Marzo 2010
55. Hoyos R. "Progreso de la Filtración Casera en América Latina". [En línea] <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/1-2-02hoyos.pdf>. 4 de Febrero 2009.
56. Aguamarket Productos y servicios para la industria del agua. [En línea] www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?l. 22 de Agosto 2010.

57. Museo de Ciencias Naturales (CSIC), (2006) *Informe sobre la influencia en el medio marino del agua hipersalina sobrante del proceso de desalación por ósmosis inversa y su tipificación como vertido y/o efluente*, Museo de Ciencias Naturales (CSIC), España, 156 p.
58. Aquakiosk Urbano. Aqua Technique. [En línea]
<http://www.danasa.com/aqua2.pdf>. 10 de Enero 2010.
59. Agape Water solutions, Inc. Reverse Osmosis Electrodeionization Membrane Experts. [En línea]
www.agapewater.com/WhatisTubularMicrofiltration. 13 de Agosto 2009.
60. Organización de Usuarios y Trabajadores de la Química del Cloro. Biología.org. [En línea] <http://www.biologia.org/revista/pdfs/92.pdf>. 9 de Junio 2009.
61. Process water. [En línea] <http://www.lenntech.com/espanol/Mezclador-estatico.htm>. 1 de Septiembre 2009.
62. El funcionamiento de una desalinizadora. [En línea]
<http://energyconsulting.wordpress.com/2009/04/03/el-funcionamiento-de-una-desalinizadora-iii-pretratamiento-del-agua/>. 14 de Abril 2009.

ANEXOS

A.1. Procesos Térmicos para desalación de agua de mar

A.1.1. Destilación por evaporación súbita multietapa (DFM)

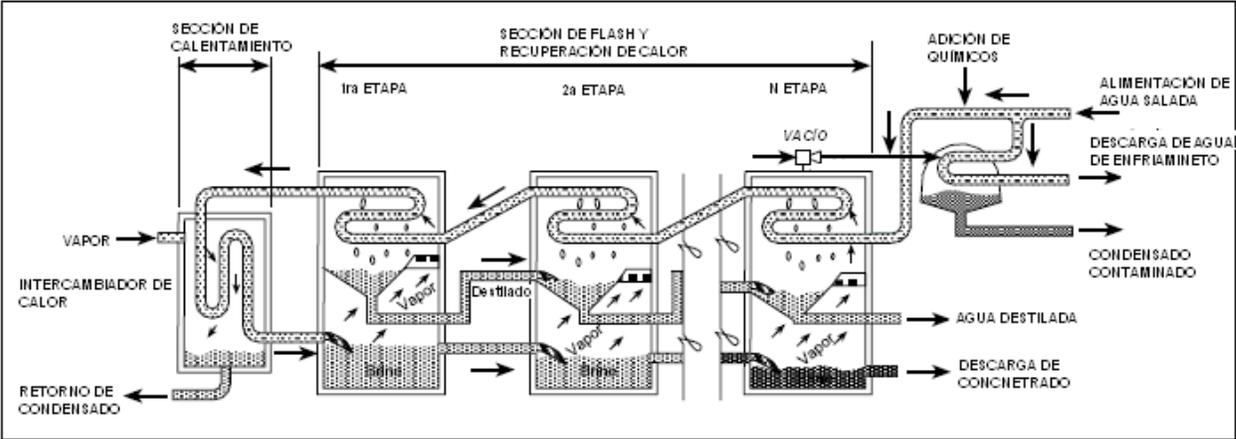
El proceso de destilación por evaporación súbita multietapa es usado ampliamente en el Medio Oriente (particularmente en Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos y Kuwait), correspondiendo al 40% de la capacidad de mundial².

El proceso se basa en la destilación de agua de mar a presiones menores a la atmosférica, ya que así la temperatura de ebullición del agua es menor a lo normal, variando entre 60 y 70 °C. La separación de las sales se lleva a cabo cuando el agua es evaporada, ya que la mayor parte de las sales permanece en solución.

El proceso se lleva a cabo en un equipo de múltiples etapas o cámaras donde el agua se separa básicamente en dos corrientes, la corriente de agua que es evaporada y la corriente de agua que no es evaporada, la cual es concentrada arrastrando las sales que deja el vapor en la solución.

El agua es introducida en una primera etapa por medio de un intercambiador de calor que circula vapor a alta presión y, cuando el agua cruda entra en contacto, parte de esta agua es evaporada, el vapor producido ingresa a la segunda etapa en donde por medio de un intercambiador de calor el vapor intercambia su energía con agua cruda que se usa para enfriar y es condensado, el agua cruda de enfriamiento es evaporada. El vapor condensado sale del equipo como agua producto y el agua cruda que se evaporó pasa a la siguiente cámara, en otro intercambiador es condensada con agua cruda y sale como agua producto, y parte del agua cruda es evaporada y enviada a la siguiente cámara. Y así sucesivamente, el agua se irá evaporando y condensando hasta pasar por todas las etapas del equipo.

Del agua cruda que ingresa generalmente solo un pequeño porcentaje del agua es convertida en vapor y después en condensado. Los equipos por destilación por evaporación súbita multi-etapa (DFM) han sido construidos desde 1950, algunas de estas plantas contienen de 15 hasta 25 etapas, pero usualmente no son de más de 56,000 m³/d (15 mgd) de capacidad (Figura A.1).



Destilación flash multi-etapa (MFD)

USAID

Figura A.1 Arreglo básico de un proceso por DFM para desalación (Buros, 2000)

A.1.3. Destilación por compresión de vapor (DCV)

Existe otro proceso de desalación por evaporación menos usado, para rangos de producción de pequeña escala (190 - 3800 m³/d), pero más eficiente conocido como destilación por compresión de vapor.

En este proceso el agua cruda ingresa a un primer intercambiador, en donde el agua que se rechaza como agua concentrada y el agua producto, precalientan el agua cruda que ingresa, de ahí el agua se mezcla con parte del agua concentrada que se rechaza y es inyectada a una única cámara donde es rociada sobre un serpentín que lleva por dentro vapor comprimido que reencuentra a una temperatura más alta. En la cámara se encuentra un compresor que succiona el vapor formado y lo comprime haciendo que su temperatura se eleve, el vapor comprimido es reinyectado a la cámara por dentro de un serpentín sobre el cual es rociada el agua cruda que ingresa a la cámara, entonces intercambia la energía que lleva a el agua cruda, evaporando parte de esta y el agua en forma de vapor que va por dentro del serpentín es condensada y llevada fuera del equipo como agua producto² (Figura A.3 y A.4).

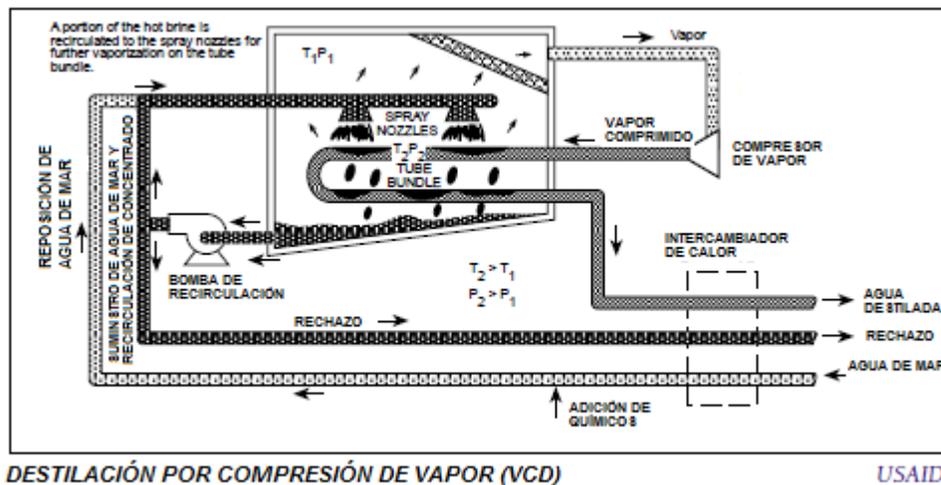


Figura A.3 Arreglo básico de un proceso por DCV para desalación (Buros, 2000)

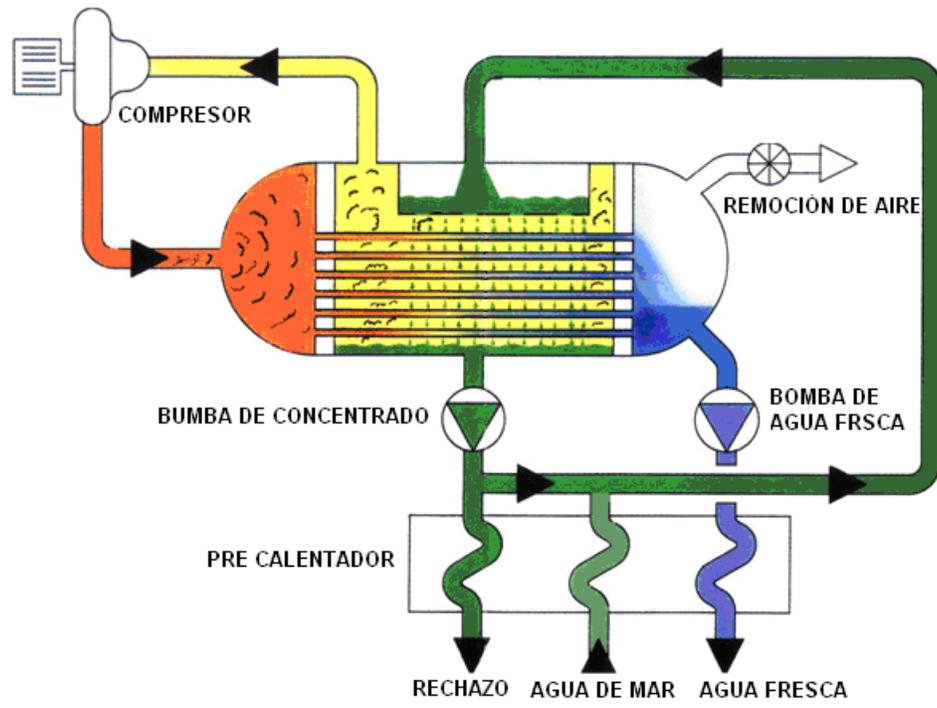


Figura A.4 Arreglo básico de un proceso DCV para de agua salada (Buros, 2000)

A.1.4. Ventajas

Los procesos de tipo térmico remueven cerca de todos los minerales disueltos presentes en el agua de alimentación. Los principales contaminantes removidos en este proceso son: de tipo inorgánico, pesticidas y compuestos orgánicos sintéticos, compuestos orgánicos volátiles, orgánicos clorados, compuestos microbiológicos y radiológicos²⁵. La Tabla A-1 presenta los porcentajes de remoción típicos para un proceso DFM.

Tabla A-1 Eficiencia de remoción de un proceso DFM (AWWA, 2004)

Contaminante regulado	por DFM (%)	por CV (%)
Inorgánicos	>99.9	>99.9
Pesticidas y compuestos sintéticos volátiles	50-90*	50-90*
Compuestos orgánicos volátiles	50-90*	50-90*
Organo clorados	50-90*	50-90*
Microbiológicos	>99	>99
Radiológicos	>99	>99

* Con un adecuado pretratamiento y postratamiento se puede llegar a remover casi la totalidad

Las ventajas de usar sistemas por destilación son las siguientes²⁶:

- a. La salinidad en el agua de alimentación no tiene impacto en los costos de operación.
- b. Tiene bajos requerimientos en el pretratamiento del agua.
- c. No requiere procedimientos de operación y mantenimiento tan rigurosos como otros procesos.
- d. Produce agua de muy alta calidad (menos de 10 mg/L en SDT).

Las desventajas de usar sistemas por destilación son las siguientes²⁶:

- e. Las plantas DFM presentan altos costos de construcción y operación, y requieren de un alto nivel técnico de conocimiento.

- f. Altos consumos de energía debido a los requerimientos para llevar el agua a punto de ebullición, aunque la eficiencia energética es sustancialmente mayor gracias al proceso de recuperación de calor.
- g. La relación de recuperación es baja, ya que se requiere una gran cantidad de agua salada a la entrada del proceso para la producción de agua dulce, La planta no se puede operar en capacidades de diseño más bajas al 70-80% (6).
- h. La planta es susceptible de presentar problemas de corrosión especialmente en las zonas de intercambio calorífico como los tubos del intercambiador, se recomienda emplear titanio o combinaciones de Cobre/Níquel (70/30).
- i. El agua producida se encuentra a altas temperaturas y requiere de enfriamiento natural o por dispositivos de disipación de energía antes de que pueda ser usada como agua potable.

A.2. Obras de toma de agua de mar

A.2.1. Obra de toma superficial de agua

Las obras de tomas implican el suministro de agua tomada directamente del mar (Figura A.5), de acuerdo a la profundidad del agua de mar generalmente se considera como:

- Toma de agua poco profunda de 0 a 15 m.
- Toma de agua profunda de 20 a 35 m.

La profundidad de la toma es de gran importancia en lo que respecta a la calidad del agua debido a que entre más profunda sea la toma los rayos del sol penetran débilmente, lo que limita la fotosíntesis y por tanto la cantidad de algas; además se encuentran menos sólidos en suspensión.

La desventaja de la toma profunda es que la temperatura del agua de mar disminuye con la profundidad, lo cual aumenta la presión de operación de las membranas y por tanto los costos de operación.

La toma de agua profunda puede ser económicamente viable sólo si la profundidad requerida está cerca de la línea costera (a no más de 50 m). Es por esto que la mayoría de las tomas de agua de mar están a poca profundidad, a pesar de las desventajas que esto conlleva: ²⁵

- Turbulencia que mantiene a los sólidos en suspensión.
- Riesgo de proliferación de algas en las estaciones cálidas.
- Variación de la temperatura del agua de mar.
- Presencia de microorganismos y nutrientes.
- Riesgos de contaminaciones accidentales por efluentes provenientes de otros lugares y/o mezcla con el rechazo del concentrado de la planta rechazado.



Figura A.5 Obra de toma abierta para sistemas de desalación por ósmosis inversa

A.2.1.1. Filtros móviles

Estos filtros han sido empleados desde los años 90's. Los filtros están equipados con paneles con una apertura de 6 a 9.5 milímetros. ³

Conforme el filtro gira y sale fuera de la corriente de agua, agua a alta presión en rociada sobre los paneles removiendo las impurezas acumuladas, los filtros son regularmente instalados en tierra al final de un canal o una tubería que se extiende dentro del mar, Figura A.6.

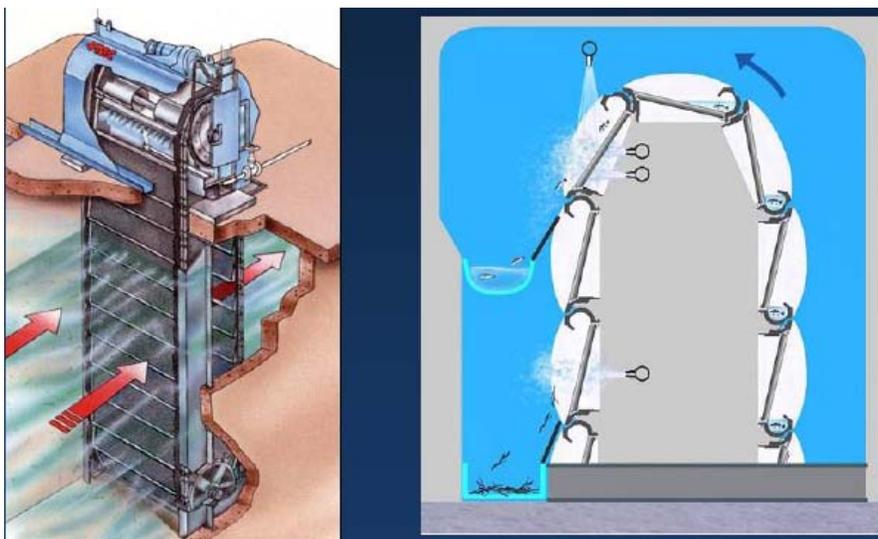


Figura A.6 Filtro móvil

A.2.1.2. Filtros pasivos

Los filtros pasivos son láminas ranuradas construidas en forma trapezoidal (Figura A.7). Estos filtros cilíndricos tienen rangos de apertura de 0.5 a 10 milímetros, son orientados horizontalmente hacia el flujo y son dimensionados para mantener una velocidad constante menor a 15 cm/seg para minimizar el paso de desechos y reducir el impacto en la vida marina. Los filtros estáticos son los mejores para áreas en donde es necesaria la limpieza con aire para limpiar los filtros si la acumulación de desechos llega a ocurrir (Figura A.8). Como con todos los equipos sumergidos, la selección de materiales debe de considerar la corrosión y la formación de una biopelícula debidas al agua de mar. Los filtros pasivos tienen la habilidad de reducir el impacto y el arrastre de micro organismos marinos. Su efectividad está vinculada a la apertura del filtro y la velocidad del agua. Este filtro ha demostrado que a aperturas de 1 milímetro es altamente efectivo para el rechazo de larvas y reducir el impacto por microorganismos en un 80%.³

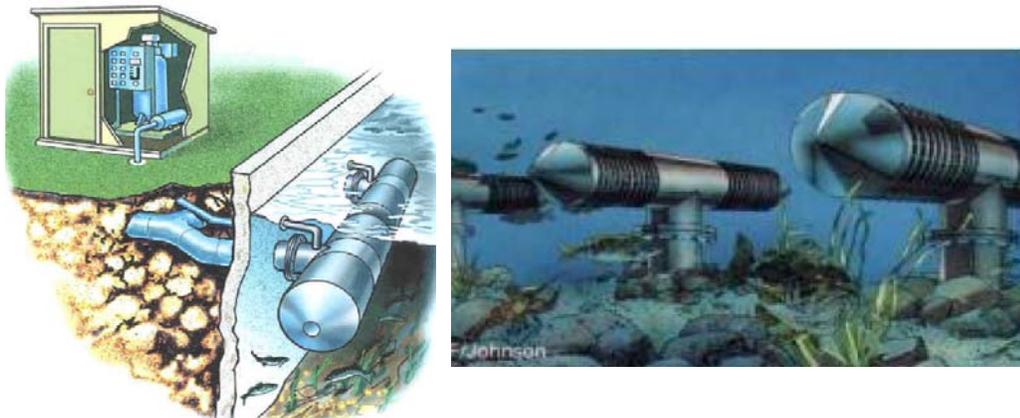


Figura A.7 Filtro pasivo 01



Figura A.8 Filtro pasivo 02

A.2.1.3. Velocidad tope

Una cubierta colocada por encima de una tubería vertical en el fondo del mar es llamada “velocidad tope” (Figura A.9 y A.10). La cubierta convierte el flujo vertical en un flujo horizontal a la entrada de la toma, esto para reducir el impacto en la mortandad de los peces. Se ha observado que los peces pueden prevenir rápidos cambios en un flujo horizontal. Las tomas de velocidad tope han demostrado reducir de un 80 a un 90% el impacto en la mortalidad de los peces contra una toma de agua de mar convencional.³

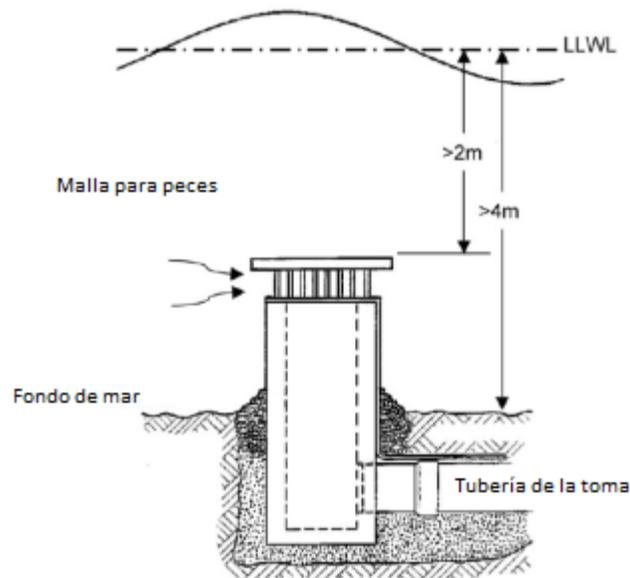


Figura A.9 Velocidad tope 01



Figura A.10 Velocidad tope 02

Para las obras de toma de agua de mar abiertas se presentan dos principales problemas en el diseño, el impacto y el arrastre:

- El Impacto ocurre cuando organismos marinos son atrapados contra el filtro de la toma de agua de mar por la velocidad y fuerza del agua que fluye a través del filtro. Algunas especies pueden llegar a sobrevivir al impacto y ser retornados al mar. La sobrevivencia de los organismos disminuye en las especies jóvenes y puede ser menor al 15%.
- El Arrastre ocurre cuando los microorganismos pasan a través del filtro de la toma y entran al proceso de desalación. Los organismos dentro del proceso tienen generalmente una mortalidad del 100%.

El número de organismos afectados varía considerablemente en función del volumen de agua, la velocidad del agua y el uso de medidas de mitigación para minimizar su impacto. Si las velocidades de la toma son suficientemente bajas los peces tal vez podrán ser capaces de nadar fuera y prevenir el impacto ó el arrastre sobre el filtro. Temperaturas bajas, variaciones estacionales, edad de los peces, etc. también son factores a considerar.³

A.2.2. Obra de toma de agua de mar a través de pozos

La filtración natural de los alrededores de la tierra en un pozo minimiza la necesidad de complicados sistemas de pretratamiento. La profundidad, locación y geología del lugar constituyen factores más importantes en la efectividad de la filtración natural.

Las obras de toma de agua subterránea consisten en pozos verticales y galerías de infiltración o sistemas de filtración por cama de mar. En cada uno de estos diseños, el agua de mar es separada del punto de toma por una unidad geológica. Una toma subterránea puede ser utilizada en donde las condiciones geológicas bajo la superficie del agua son relativamente impermeables y el espesor y profundidad soportan la extracción de agua. Además de proveer una filtración natural, este arreglo tiene la ventaja de separar la mayoría de los organismos marinos del agua tomada directamente del mar.³

Para las obras de tomas de agua mar a través de pozo se encuentran los siguientes arreglos:

A.2.2.1. Pozo playero vertical

Los pozos playeros pueden ser utilizados como una alternativa económica contra la toma superficial para plantas desaladoras con capacidades menores a 20,000 m³/d, tienen la ventaja de entregar agua prefiltrada que puede reducir en gran medida el pretratamiento.

Un pozo vertical consiste en una carcasa, un filtro de pozo y una bomba vertical (Figura A.11 y A.12). La adecuación del sitio está determinada por la perforación de los pozos de prueba al llevar una detallada investigación hidrológica para determinar las transmisividad y las características del sustrato. Es preferible

localizar los pozos cerca de la playa tan cerca de la costa como sea posible y obtener el máximo rendimiento de los pozos que va desde 0.1 a 4000 m³/d. ^{3, 8}

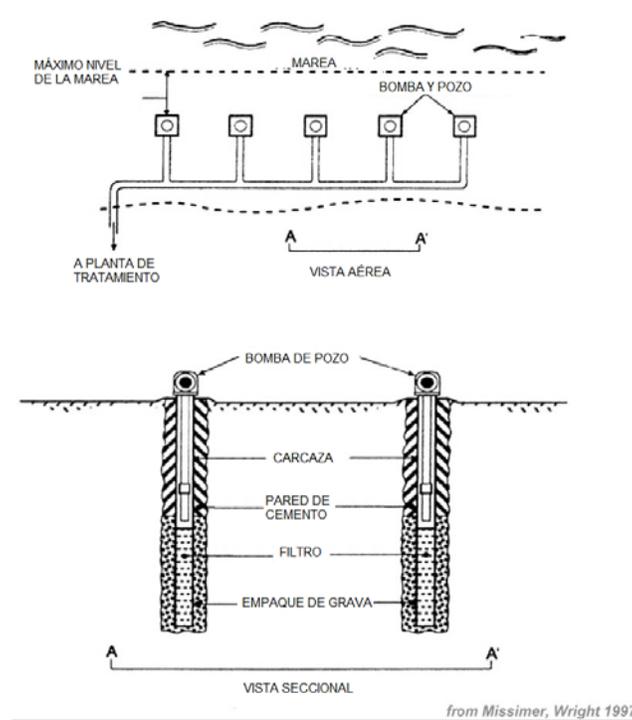


Figura A.11 Pozo vertical 01

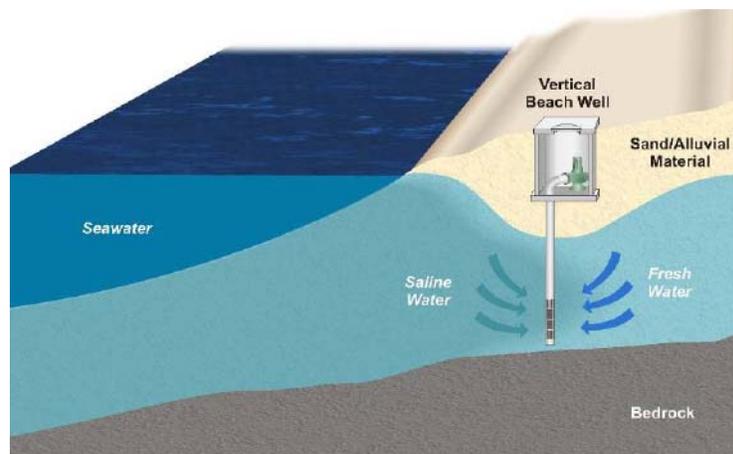


Figura A.12 Pozo vertical 02

A.2.2.2. Pozo radial

Los pozos radiales son una variación del pozo vertical. Aquí colectores múltiples horizontales son conectados a un colector central (Figura A.13 y A.14), el cual actúa como pozo húmedo o estación de bombeo en donde el agua es bombeada a la planta desaladora. El uso de colectores radiales representa que la producción de cada pozo es significativamente más grande que la de un pozo vertical ya que se aumenta el área de extracción del agua de mar.

El colector central tiene un diámetro de 2.75 a 6 metros y de 9 a 45 metros de profundidad, los colectores radiales tienen usualmente un diámetro de 200 a 300 milímetros.^{3,8}

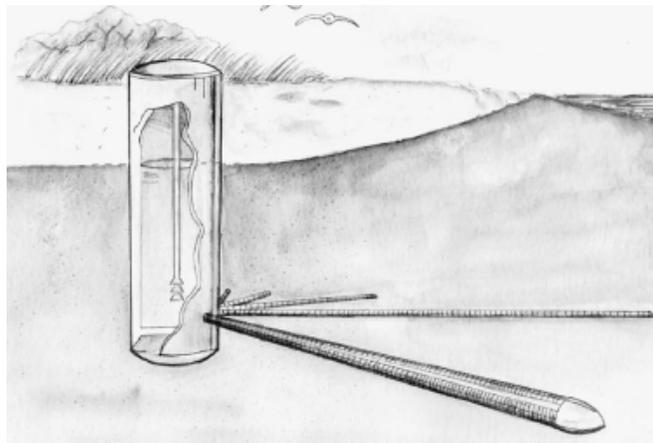


Figura A.13 Pozo radial 01

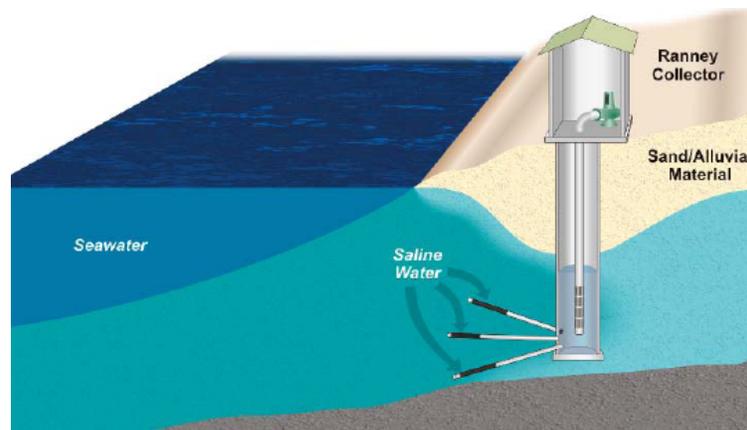


Figura A.14 Pozo radial 02

A.2.2.3. Galerías de infiltración

Una obra de toma por galería de infiltración es una variación del arreglo por colectores radiales u horizontales y es utilizado en lugares donde las condiciones geológicas son relativamente impermeables, el espesor y profundidad deben ser suficientes para soportar la extracción del agua superficial. En estos sitios es necesario instalar los colectores horizontales y filtros en trincheras que son rellenas con grava y/o materiales filtrantes después de que los colectores son instalados.^{3, 8} (Figura A.15 y A.16)

Una velocidad promedio de 0.2 m/s en la toma de agua puede ser considerada en una aproximación preliminar, a ésta velocidad los sólidos retenidos en la superficie de la arena son regularmente removidos por las corrientes de agua a una velocidad de 0.02 m/s.¹⁹

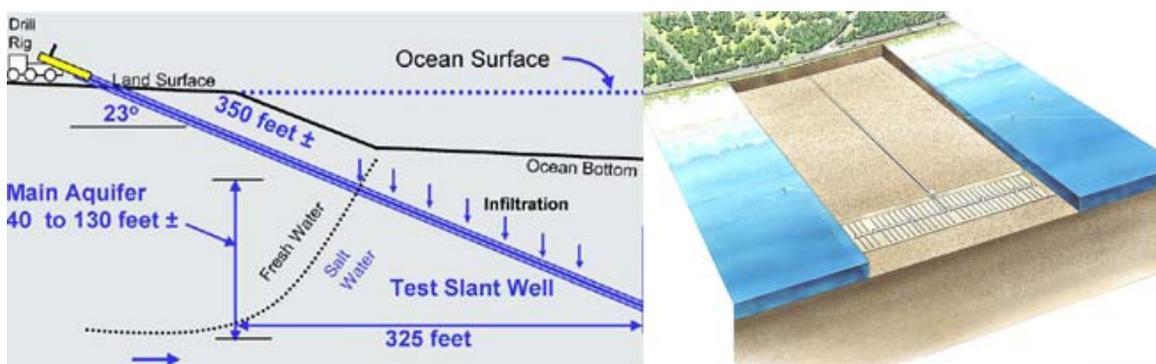


Figura A.15 Galería de infiltración 01

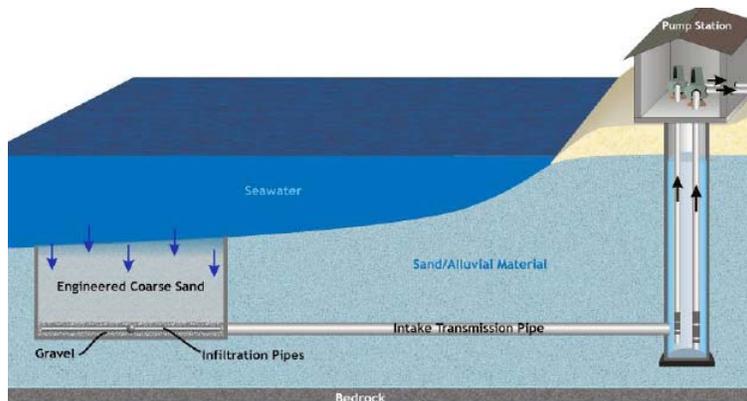


Figura A.16 Galería de infiltración 02

El uso de obras de toma de agua subterránea ofrece una ventaja sobre el medioambiente en relación a la toma de agua superficial, la cual está asociada con el impacto y el arrastre de la vida marina y que en las obras de toma por pozo son virtualmente eliminados.

A.3. Tipos de pre tratamiento en desalación de agua de mar por ósmosis inversa

A.3.1. Filtración en medio poroso

La filtración es una operación unitaria que consiste en la separación de sólidos en suspensión, haciendo pasar el agua a través de un lecho de un medio poroso empacado en una columna o filtro. Los distintos medios porosos utilizados son: arena y arena-antracita, con una variedad en tamaños y pesos específicos de partículas. Los filtros se pueden clasificar por su velocidad de filtrado, en filtros de gravedad (filtros lentos) con un flujo de filtrado menores a $5\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ o filtros de presión (filtros rápidos) con flujos mayores a $5\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, estos últimos son los que se utilizan comúnmente en la de agua de mar.

Los filtros se pueden proveer en diversos tamaños y ambos se pueden operar manualmente o de manera automática⁴⁹. Los filtros de medio poroso que se utilizan en las plantas desaladoras que tienen coagulación operan generalmente a presión, y son similares a los que se emplean en cualquier instalación de tratamiento de aguas²⁷.

Generalmente, los filtros de arena presurizados son los más empleados con un lecho de aproximadamente de 91 a 122 centímetros de profundidad y requiere de un sistema de recolección de agua en la parte baja del filtro (bajo dren). Entre el lecho de arena y el drenaje, se utiliza un lecho de soporte con grava cuyo espesor oscila alrededor de 30 cm.

El flujo del agua en los filtros de presión es en sentido vertical, cuya entrada es por la parte superior del filtro, y el agua desciende a través del medio o medios filtrantes, que retienen los materiales sólidos y algas que transporta. En su parte inferior llevan un colector o plataforma provista de boquillas que recogen el agua

filtrada. El tamaño del filtro debe ser acorde con el volumen a tratar, generalmente se colocan por conjuntos (en paralelo) para poder operar en continuo.

Las partículas retenidas por la arena incrementan las pérdidas de carga dentro del filtro, por lo que cuando se alcanza un determinado valor se procede a la sustitución del medio filtrante, debido a que estas partículas no se desprenden fácilmente mediante simples retro-lavados.

Los filtros de arena suelen ser depósitos cilíndricos, dispuestos de manera vertical, rellenos de un mineral o medio filtrante como se muestra en la Figura A.17. El material empleado en su construcción puede ser de acero al carbón, con un recubrimiento epóxico dada la corrosividad o poder oxidante del agua a tratar, de manera que garantice el total aislamiento del metal con el agua o de un material plástico resistente para trabajar bajo presión como puede ser la fibra de vidrio.



Figura A.17 Esquema simplificado de los filtros a presión. (Izq.) filtro de arena y (der.) filtro con diferentes medios (El Regante,2010).

Tabla A.2 Principales características de filtros (El Regante,2010)

Características	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	120 m/d	180-480 m/d
Medio	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: grueso
Duración carrera	12-36 horas	12-36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0.3 m Final: 2.4-3.0 m	Inicial: 0.3 m Final: 2.4-3.0 m
Agua de lavado	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0.6-0.75 m	Antracita 0.4-0.6 m Arena 0.15-0.3 m
Profundidad de grava	0.3-0.45 m	0.3-0.45 m

A.3.1.1. Aplicación de la filtración con medio poroso

En general, la aplicación principal de la filtración es la eliminación de materia suspendida presente en el agua que pueda perturbar el funcionamiento del proceso de . Por lo tanto, la filtración mejora la calidad del agua a ser desalada, ayudando a que éste sea altamente eficiente, ya que en el caso de los procesos de membranas y los térmicos es crucial una buena calidad de agua de alimentación a este proceso.

Por otro lado, una aplicación importante de los filtros es la remoción de hierro y manganeso insolubles del agua a tratar. La remoción del hierro y manganeso consiste en una previa aireación, oxidación y precipitación del hierro y el manganeso, los cuales pasan a un estado insoluble (materia suspendida) para su posterior eliminación en el filtro de arena²⁷.

Los filtros de arena remueven partículas con densidades mayores a 2 g/cm^3 , alcanzando valores de eficiencia de remoción hasta de 90% de la materia suspendida presente en el agua³⁴ y logrando niveles de remoción menores a 1 UTN²⁸.

Ventajas de los filtros de medio poroso:

1. Facilidad de operación y mantenimiento, ideales para sistemas pequeños (con caudales de $30 \text{ a } 60 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (4) con baja turbidez en el efluente).
2. Bajo costo de mantenimiento y operación.
3. El único mantenimiento de rutina necesario, es el retro lavado con o sin aireación.
4. Algunas arenas pueden ser utilizadas en repetidas ocasiones, lo que representa un funcionamiento más económico.

Limitantes o desventajas de los filtros de medio poroso:

1. El agua cruda a la entrada debe poseer baja concentración de sólidos sedimentables.
2. Su uso no es adecuado para agua con alta turbidez. Las aguas que contienen una alta turbidez ($>30 \text{ UTN}$) deben pasar por un pretratamiento (como la clarificación)⁵².
3. El flujo de agua que se usa en los retrolavados es tres veces mayor a los flujos de agua que se tratan.

A.3.1.2. Operación y mantenimiento

Como parte fundamental de la operación de un filtro de arena, se encuentra la operación de retro-lavado, la cual tiene lugar en el momento que el filtro se obstruye, según el aumento de la pérdida de carga a través del lecho del filtro, producto de la dificultad que tiene el líquido para cruzar el medio filtrante. En dicho momento, la dirección del flujo es invertida para lograr el desprendimiento de la torta formada sobre el lecho, la cual contiene materia suspendida retenida cuya evacuación será depositada fuera de línea para su tratamiento⁵⁰.

A.3.2. Filtración en cartuchos

La función principal del pretratamiento es garantizar que las propiedades químicas y físicas, sean las adecuadas u óptimas del agua de alimentación a los procesos principales. Para mejorar la calidad del agua, en el aspecto de partículas sólidas, se recurre fundamentalmente a distintos procesos de filtración la cual se encargará de la separación de los sólidos contenidos en el líquido como se muestra en la Figura A.18

Los filtros de cartuchos son clasificados sobre la base del mecanismo de remoción: de superficie y de profundidad en:

1. Filtros de superficie: El medio actúa como un tamiz, donde la captura de sólidos se da en la superficie únicamente. Un ejemplo de este tipo de cartuchos son las membranas tipo malla de alambre.
2. Filtros de profundidad: Estos tienden a atrapar las partículas dentro de su estructura interna. Por ejemplo, los cartuchos de fieltro, cerámica porosa, almohadas de asbesto⁴⁹.

Con respecto al objetivo del pretratamiento, en el caso de con ósmosis inversa, los fabricantes de membranas imponen el nivel de filtración de 5 micras para garantizar el buen funcionamiento de las membranas e inclusive se llega a

descender este nivel hasta 1 micra²⁸. Estos tamaños de partícula deben ser producto de los pretratamientos (agua de salida de los filtros), como sería el caso de cualquier tipo de filtración.

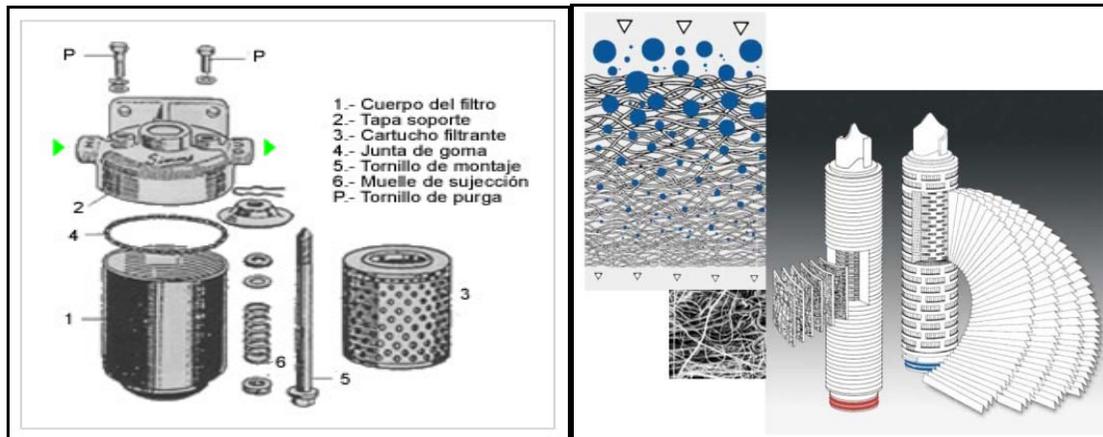


Figura A.18 Esquema simplificado de los filtros de cartuchos (Hoyos, 2003).

El eje deberá ser de un material resistente a la corrosión, por lo que se emplean productos plásticos (polímeros). Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga del mismo, por lo que cuando se alcanza un determinado valor se procede a su sustitución, debido a que éstas no se desprenden fácilmente, como ocurre en los filtros.

Según su uso, existen dos tipos de filtros de cartuchos: filtros de cartucho desechable y filtros de uso prolongado que pueden ser limpiados y reutilizados. Comúnmente los materiales con los que son construidos los filtros en caso de cartuchos desechables son de algodón, celulosa, polipropileno, nylon, asbesto, cerámica, lana, rayón, fibra de vidrio, acrílico y ésteres de celulosa. Los cartuchos que se pueden limpiar y reutilizar son hechos de cerámica, acero inoxidable, aleaciones de metales polímeros de hidrocarburos fluorados³⁰.

Se recomienda utilizar algún desinfectante para evitar el crecimiento microbiano en la superficie del cartucho²⁹.

A.3.2.1. Aplicación de la filtración con cartuchos

En general, el uso de filtros formados por una o más capas de material filtrante resuelve la separación de material no coloidal y se logra retener buena parte del material coloidal en un 50% aproximadamente.

La necesidad de retener la mayor parte de sólidos presentes en el agua obliga a la implementación de etapas de filtración que corresponden esencialmente a lo siguiente:

1. Filtración gruesa.
2. Filtración fina.

La primera se encarga de la separación de materiales de tamaños y de estructuras gruesas, mientras que la segunda realiza una separación de tamaño micrométrico.

El grado de selectividad del filtro varía según el tamaño de poro nominal del medio filtrante, un tamaño de poro de 5 μm es adecuado para la protección a sistemas de ósmosis inversa.

Ventajas de los filtros de cartucho:

1. Los filtros de cartucho son fáciles de operar y mantener y tienen una baja turbidez de efluente (partículas no mayores a 5 micras)²⁸.
2. Los filtros de profundidad están asociados a una larga vida útil al manejar contaminantes comprimibles o gelatinosos.
3. Los procesos de filtración son de bajo costo de mantenimiento, operación mínima y poca atención o cuidado; así como bajos requerimientos de espacio.

Desventajas o limitantes de usar filtros de cartucho:

1. Los sistemas de filtración de cartucho requieren agua cruda de baja turbidez⁵⁴.

2. Los cartuchos de polipropileno se ensucian con relativa rapidez y deben ser sustituidos por nuevas unidades.
3. Los cartuchos de filtración deben ser sustituidos en lugar de su remplazo o lavado.
4. En ocasiones, se requieren bombas adicionales para proporcionar la presión necesaria para el funcionamiento adecuado de la filtración.

A.3.2.2. Insumos requeridos

Los consumos de energía para este tipo de filtros son relativamente bajos, de igual forma los requerimientos para el cambio de los cartuchos son también bajos, si las condiciones de operación y mantenimiento son adecuadas. Se recomienda utilizar algún tipo de desinfectante para evitar, el crecimiento microbiano en el cartucho y la reducción del paso de los microbios a través de los filtros³¹.

A.3.2.3. Operación y mantenimiento

Las propiedades de filtración de los cartuchos de filtración dependen de su diferencia de presión, las características del caudal y la eficiencia de remoción de las partículas. Los siguientes parámetros son importantes para la selección del filtro: tamaño, peso, costo, compatibilidad con los fluidos usados, fuerza, bajos costos de mantenimiento, limpieza, y la vida útil del medio filtrante³¹.

El ensuciamiento de los cartuchos se controla mediante la medición de presión diferencial, esta caída de presión no debe ser mayor a la recomendada por el fabricante o proveedor generalmente se establece en 0.7bar.

A.3.3. Sedimentación

La sedimentación se aplica cuando los índices de ensuciamiento de las membranas producto del agua coagulada son mayores a 5, con el objeto de complementar los procesos de coagulación-floculación previos a la etapa de desalación, si se tiene un índice de ensuciamiento menor a 5 no se requiere la aplicación de esta tecnología.

La sedimentación frecuente en de agua salobre procedente de ríos y lagos. Se basa en retener el agua durante un período de tiempo suficientemente largo en un depósito, en el que el agua circula a una velocidad muy lenta, con la finalidad de que los sólidos que están suspendidos puedan depositarse en el fondo, obteniendo en la parte superior del depósito un líquido clarificado. En la Figura A.19 se muestra un esquema simplificado de un sedimentador con rastras móviles⁵³.

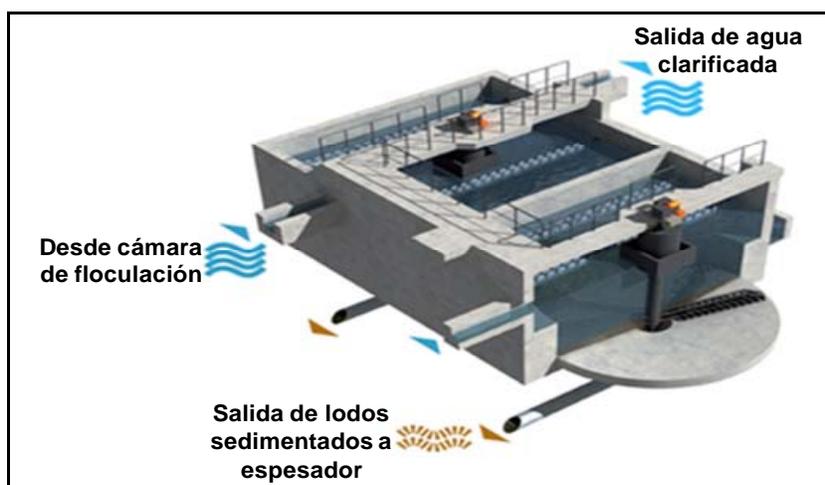


Figura A.19 Esquema simplificado de un sedimentador en pretratamientos de (Información proporcionada por vendedor).

Un tipo de arreglo muy común en los pretratamientos de son los sistemas de coagulación-floculación seguidos de un sedimentador para remoción de partículas floculadas⁵⁵ como se muestra en la Figura A.20.

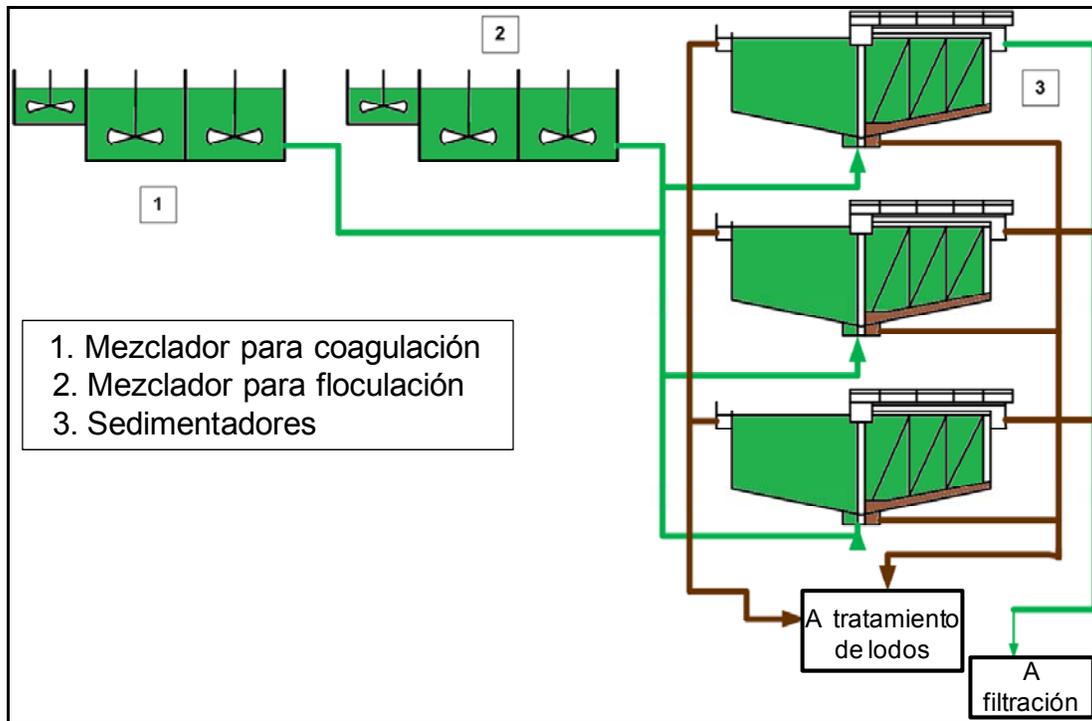


Figura A.20 Diagrama de un tren de pretratamiento de agua salada por coagulación, floculación y sedimentación (Información proporcionada por vendedor)

Los sedimentadores circulares son normalmente alimentados por el centro, a través de un tubo central, ascendente que en su parte superior presenta un deflector, (barrera o separador), cuyo propósito es disipar la energía del influente y garantizar una distribución homogénea en el tanque clarificador⁵⁶, como se muestra en la Figura A.21.

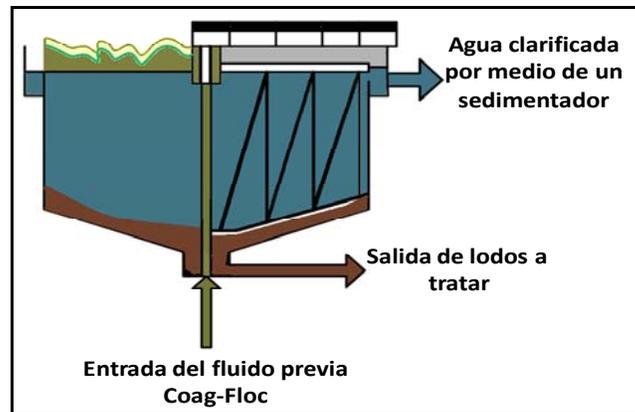


Figura A.21 Diagrama de proceso de un sedimentador circular en (Mourato, 1995)

A.3.3.1. Aplicación de la sedimentación

En los sedimentadores se remueve entre 50%-60% de los sólidos suspendidos (partículas con una velocidad de sedimentación entre 1 – 2 minutos). Los lodos removidos de este proceso pueden contener materia orgánica (de fácil degradación) y materia inorgánica como arena, sílice, etc.

El contenido de sólidos de dichos lodos oscila alrededor del 5%. Los sedimentadores se dimensionan de tal forma que se obtenga una eliminación de sólidos suspendidos superior al 65%, hasta valores de 70% de sólidos totales.

Las ventajas y limitantes de la aplicación de los sedimentadores son:

1. Mayor simplicidad de operación de la planta.
2. Homogeneidad en la calidad del lodo.
3. Remoción del lodo en un solo punto.
4. Su elevado costo sólo permite su aplicación en instalaciones grandes.

A.3.3.2. Generación de residuos

Los residuos generados en los sistemas de sedimentación son lodos fisicoquímicos, que contienen altas concentraciones salinas, por lo que se recomienda tratarlos por medio de la deshidratación; este tipo de residuos de una planta desaladora debe gestionarse como residuo sólido y desecharse en vertederos controlados. El proceso industrial de desalación, genera una serie de residuos los cuales pueden ser tratados de manera distinta, según las características de estos distintos residuos o sustancias de desecho en que puede descomponerse la salmuera⁵⁷.

A.3.3.3. Operación y mantenimiento

La operación de los sedimentadores es sencilla, su seguimiento se centra en la vigilancia de la eficiencia de remoción de los sólidos totales para proceder a la evacuación de los lodos acumulados en el fondo de la unidad. Esta vigilancia está relacionada con el control del caudal que ingresa a la unidad y el control de la calidad de agua del efluente³³.

A.3.4. Microfiltración

Una membrana es una fina capa de material capaz de separar las sustancias cuando una fuerza se aplica a través de ella³¹.

En ocasiones se puede encontrar en las instalaciones de sistemas de microfiltración, sobre todo si el agua de mar contiene altos valores de sólidos suspendidos, mayores a 35 000 mg/L y turbiedades de hasta 200 UTN⁵⁰. Este tipo de problemas obliga a lavados o retrolavados continuos y paros frecuentes en las instalaciones si no se cuenta con sistemas de micro y ultrafiltración²⁸.

En la microfiltración se utilizan membranas similares a las que se usan en ósmosis inversa, están constituidas por un haz de fibras huecas de 2 mm de diámetro, por tanto son mucho más gruesas y están constituidas de otros materiales que las de ósmosis inversa. El tamaño de los poros es suficientemente pequeño para retener también las bacterias, pues éstas se aglutinan unas con otras adquiriendo un tamaño superior al de los poros⁵⁰.

El paso del agua se realiza desde el exterior hacia el interior de la membrana, depositándose las partículas sobre la superficie de ésta. Una variación al arreglo de microfiltración antes mencionado es la de tipo cruzado, donde el flujo de fluidos es tangencial a la superficie de filtración como se muestra en la Figura A.22. Este diseño proporciona turbulencia en la superficie de la membrana que impide la acumulación de partículas en un solo lugar de la membrana.

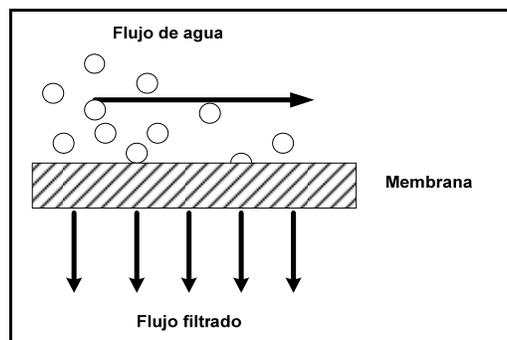


Figura A.22 Membranas de filtración con flujo tangencial (Ribeiro, 2009)

Otro tipo de arreglo de las membranas de microfiltración, se realiza en un tubo donde la membrana se encuentra en el interior de éste, como se muestra en la Figura A.23 y el fluido filtrado sale por un costado de la membrana ³⁵.

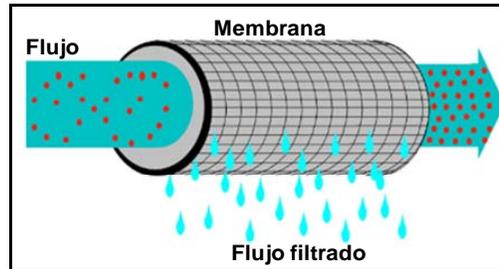


Figura A.23 Membranas tubulares de microfiltración (Ribeiro, 2009)

La microfiltración se lleva a cabo mediante el proceso de bombeo del agua de alimentación a presión alta a lo largo de la superficie de la membrana, donde la retención de solutos (como partículas) se acumula en una sola parte de la superficie de la membrana como se muestra en la Figura A.24 ⁵⁹.

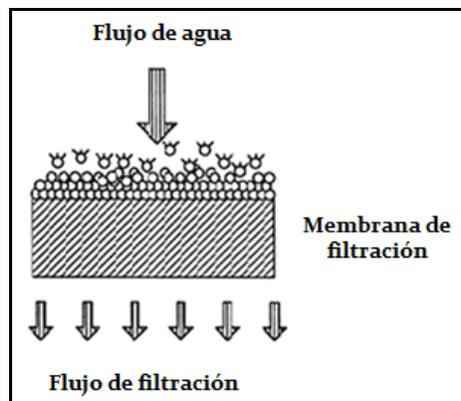


Figura A.24 Membranas de filtración de flujo perpendicular (Ribeiro, 2009)

Existen dos tipos de operación de membranas, las membranas operadas a presión (presión positiva) y las membranas operadas al vacío (presión negativa). Se aplican cuando el objetivo no es la retención de sólidos, como sucede en la de agua salobre y agua de mar por medio de la nanofiltración u ósmosis inversa.

Existen dos tipos de membranas de fibra hueca operadas a presión:

1. Membranas con flujo de adentro hacia afuera (Figura A.25^a).
2. Membranas con flujo de afuera hacia adentro (Figura A.25^b).

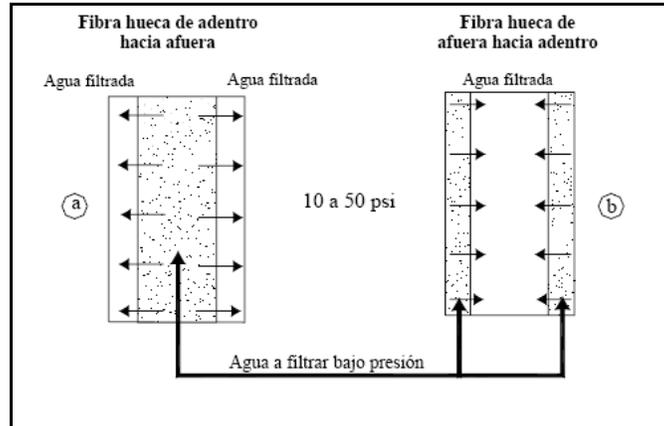


Figura A.25a Membranas de filtración de fibra hueca (Ribeiro, 2009)

Las membranas al vacío operan con una succión creada dentro de las fibras huecas por medio de una bomba. El agua tratada pasa a través de la membrana, entra a las fibras huecas y es bombeada para su distribución. Se introduce un flujo de aire en el fondo del módulo de la membrana para crear una turbulencia que frota y limpia el exterior de las fibras de la membrana y les permite funcionar con una tasa de flujo alta (Figura A-13b)²⁷.

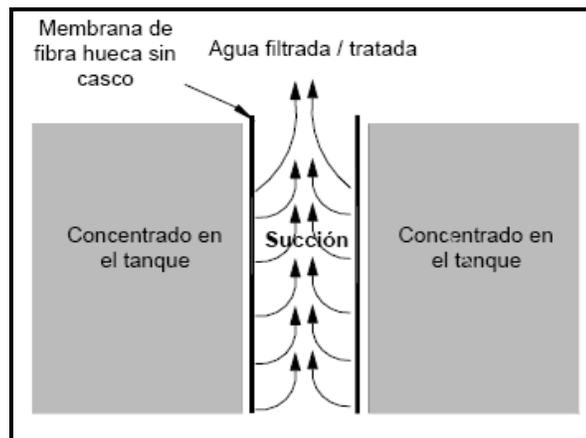


Figura A.25b Membrana de filtración de fibra hueca sin casco (Ribeiro, 2009)

La microfiltración permite su utilización con aguas muy sucias e incluso con una carga orgánica importante, como las aguas residuales. Sin embargo cuanto más sucia está el agua a tratar se ensucian más rápidamente las membranas, por lo que los periodos entre limpieza se acortan. Esto da lugar no solo a paradas frecuentes del equipo, sino también a un incremento en los costos energéticos y a una pérdida de eficiencia de la instalación.

A.3.4.1. Aplicación de la microfiltración

La remoción de los contaminantes en las membranas de microfiltración son:

1. Remoción completa de quistes de *Giardia*, *Cryptosporidium*, coliformes y huevos de parásitos.
2. Se han observado eliminaciones de virus hasta de 4 log de remoción⁵⁰.
3. Remoción de sólidos suspendidos con tamaño mayor a 0.1 micrómetros.

La Tabla A.3 presenta resultados típicos obtenidos en el tratamiento de aguas a través de la microfiltración³².

Tabla A.3 Resultados obtenidos por microfiltración (Buvisa, 2010)

Elemento en agua de filtración	Calidad del agua tratada
<i>Giardia</i> y <i>Cryptosporidium</i>	No detectables > 6 los de remoción
Coliformes	< 10UFC/100mL
Sólidos suspendidos	No detectables
Conteo de partículas	< 3 partículas/mL
Turbiedad	<0 .1 UTN

En la microfiltración se pueden remover algas y bacterias debido al tamaño de poro que tiene la membrana. La microfiltración realiza una separación de partículas hasta 0.1-0.2 micras³⁷.

Las ventajas de la aplicación de microfiltración son las siguientes³⁵:

1. Por el tamaño del poro es posible remover algas y bacterias en la superficie de la membrana, obteniendo una desinfección y lográndose turbiedades menores a las que se obtienen con una filtración convencional con un lecho de arena.
2. Reducción de color y diferentes tipos de olores.
3. Bajos requerimientos de espacio asociado a obras civiles sencillas, ya que las unidades son compactas.
4. Reduce la presencia de precursores de trihalometanos que puedan formarse con la cloración secundaria.
5. Otra ventaja importante es la remoción de las formas hidrosolubles de hierro y manganeso.

En el uso de las membranas de microfiltración se deben tomar en cuenta las siguientes limitantes o desventajas³⁵:

1. Es un sistema costoso, en construcción y mantenimiento, que sólo en casos muy especiales puede justificarse, como sería en determinadas instalaciones de uso industrial.
2. Debido a las incrustaciones producidas sobre la membrana, la eficiencia del proceso disminuye.
3. Para operación y mantenimiento, se requiere personal altamente capacitado.

A.3.5. Ultrafiltración

La Ultrafiltración se basa en el mismo principio de operación y funcionamiento que la Microfiltración. La diferencia entre éstas radica en el diámetro de poro de las fibras, el material de fabricación de las membranas y la forma de filtración. Las membranas de ultra filtración eliminan los contaminantes orgánicos, virus, bacterias, parásitos etc. por debajo de las 0.04 micras. Este sistema trabaja a través de un procedimiento completamente mecánico, el agua a tratar se filtra bajo presión a través de membranas de alta tecnología⁵⁰.

En general, existen dos tipos de membranas tanto para microfiltración como para ultrafiltración, las cuales son de enrollamiento en espiral (selectividad de 0.01 micras) y de fibra hueca, cuando las membranas son del tipo de enrollamiento en espiral se colocan dentro de un tubo de presión³. Las membranas de fibra hueca se agrupan en haces, en el interior de un recipiente.

El material con que están construidas estas membranas es PVDF o polisulfona principalmente, son resistentes a la cloración, lo que no sucede con las otras membranas²⁸.

Las membranas se dividen en dos grandes grupos: orgánicas e inorgánicas. En general las orgánicas son más fáciles de procesar y por lo tanto más baratas, mientras que las inorgánicas suelen ser más caras pero presentan ventajas tales como la resistencia a agentes químicos agresivos. La mayoría de las membranas son de naturaleza orgánica, fabricadas en materiales poliméricos tales como polisulfona (resistentes a la cloración⁵), fluoruro de polivilideno, poliamida, acetato de celulosa, etc. Por otro lado también existen membranas inorgánicas, de tipo cerámico multicanal, a base de óxido de zirconio, aunque son empleados más bien en tratamientos de aguas industriales.

Las unidades de ultrafiltración utilizan membranas como se muestra en la Figura A.26. El agua circula por el exterior de las fibras y atraviesa la pared hacia el interior para ser filtrada⁵⁸.

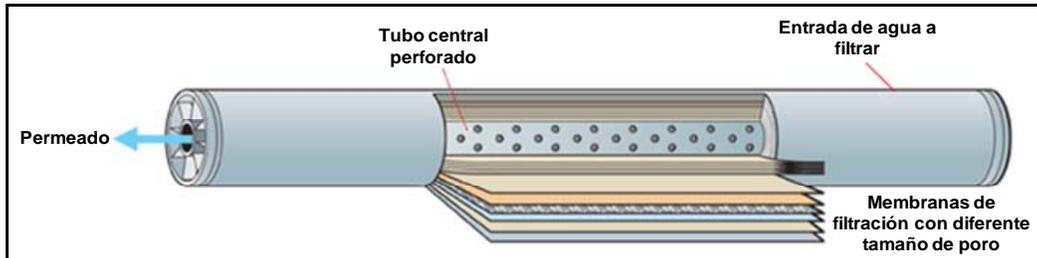


Figura A.26 Diagrama de proceso de una membrana espiral enrollada de ultrafiltración (EUP de Sevilla, 2003)

Las membranas de ultrafiltración se utilizan en sistemas, tanto en flujo cruzado como de flujo directo, aunque este último es el más utilizado debido a su menor consumo energético.

En el modo de filtración tangencial, el flujo del permeado está condicionado básicamente por la velocidad de circulación del fluido a través de los canales de filtración que son de 5 ó 6 m/s en las membranas³⁰.

A.3.5.1. Aplicación de la ultrafiltración

Las membranas que se emplean en la ultrafiltración tienen un tamaño de poro de 0.01 micras, separando partículas, proteínas y sustancias orgánicas con un peso molecular de corte entre 1 000 y 100 000 Kmol. Esta clase de membranas pueden ser tanto de fibra hueca como de enrollamiento en espiral. La ultrafiltración remueve ácido húmico, taninos, proteínas, coloides, partículas en suspensión, coloides y virus; también pueden remover prácticamente un 99% de bacterias³⁵.

Las ventajas de la aplicación de las membranas de ultrafiltración son las siguientes:

1. El consumo de energía normalmente es bajo.
2. Los procesos de separación con membranas son fáciles de combinar con otros procesos de separación.
3. Muy eficaz para remover pirógenos, bacterias, virus y partículas.
4. Requiere una presión menor a la requerida en la ósmosis inversa²⁸.

Las desventajas o limitaciones de usar membranas de ultrafiltración para la son:

1. Disminución de la productividad de flujo filtrado de la membrana, causada por el ensuciamiento de la membrana (adsorción, formación de una capa de gel, colmatación de los poros de la membrana, etc.)⁵³.
2. Su costo de inversión es alto ya que las membranas comerciales tienen un costo aproximado de 3 000 a 6 000 \$dólares/membrana dependiendo el material de la membrana, las membranas de acetato de celulosa son más baratas que las fabricadas con polímeros³⁸.
3. Su mantenimiento es costoso, similar a las membranas de ósmosis inversa.

4. El ensuciamiento de la membrana provoca largos ciclos de limpieza y pueden ocasionar la reducción de la vida útil de la membrana.

A.3.6. Desinfección

La EPA o Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud (OMS) define la desinfección como el proceso que permite obtener un agua en la que están ausentes las bacterias coliformes (totales y fecales). A diferencia de la esterilización que implica la completa destrucción de todas las formas de vida.

La desinfección presenta un desempeño adecuado de pretratamiento para procesos de tipo térmico de desalación, pero para los procesos de membranas, se requiere la instalación de un paso adicional para la eliminación de los oxidantes presentes en el agua de alimentación para evitar dañar las membranas de ⁵⁸.

Este pretratamiento consiste en la adición de productos químicos en la corriente de proceso de la etapa de de agua de mar o de agua salobre. El tipo de pretratamiento físico instalado tiene una influencia significativa en la cantidad de productos químicos que se tengan que agregar en la corriente de proceso²¹.

Cabe destacar que la desinfección con cloro es necesaria, independientemente del pretratamiento físico aplicado, para desinfectar el agua y también para prevenir el crecimiento biológico que causa ensuciamiento de filtros y membranas, así como una reducción en el funcionamiento del proceso.

El cloro se agrega al agua cruda como hipoclorito de sodio (NaOCl) o cloro gas (Cl_2), que en un proceso de hidrólisis del agua (reacción con el agua) se forma el ácido hipocloroso (HOCl). La suma del Cl_2 , NaOCl , HOCl y OCl^- (ion dissociado

después de la hidrólisis) es referida como el cloro residual libre. Para que la cloración continúe correctamente desde el punto de entrada, una concentración de cloro libre residual de 0.5-1.0 mg/L se debe mantener a lo largo de la línea del pretratamiento para evitar la contaminación biológica²¹.

Otra técnica utilizada para la desinfección es por medio de luz Ultravioleta (UV). El espectro de UV está dividido en 4 regiones, que son designadas como sigue: Vacío, UV-A, UV-B, y UV-C. La última región, UV-C es una luz ultravioleta de pequeña longitud de onda (200-295 nm), es en la cual ocurre la acción germicida más efectiva. La acción germicida óptima de la UV ocurre con una longitud de onda de 265 nm.

Generalmente la desinfección que utiliza cloro se realiza antes de la adición de los coagulantes y floculantes. Cuando se utilizan otros métodos de desinfección como el uso de rayos UV, el equipo de desinfección se coloca antes de la entrada a las membranas de ósmosis inversa ya que los microorganismos se encuentran libres después de los procesos de filtración ya sea microfiltración, ultrafiltración y filtración en cartuchos.

A.3.6.1. Aplicación de la desinfección

Se ha demostrado que el uso del cloro reduce el nivel de ciertos microorganismos patógenos en el agua hasta niveles casi imposibles de medir. El cloro oxida muchas sustancias que se presentan naturalmente, tales como las secreciones malolientes de algas y los olores de la vegetación en descomposición. La potente acción germicida del cloro elimina las bacterias, mohos y algas. El cloro en el tratamiento del agua oxida el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y otros compuestos nitrogenados que tienen sabores desagradables⁶¹.

La luz UV a través de la pared celular y el citoplasma de los microorganismos, causa un reordenamiento molecular del ADN del microorganismo que hace imposible que se reproduzca. Por lo tanto, si una célula no se reproduce se le considera muerta. La eficacia germicida aumenta por lo tanto de un valor de pH de 6.5 a 7.5, así como de una temperatura de 5 °C a 25°C, pero disminuye con el aumento de salinidad ²⁷.

Las ventajas de utilizar desinfección con cloro ó de utilizar luz UV como pretratamiento químico son las siguientes:

1. El cloro produce una acción desinfectante residual sostenida que es “única entre los desinfectantes de agua en gran escala disponibles”.
2. La cloración del agua reduce los sabores y olores. Controla el crecimiento biológico. La potente acción germicida del cloro elimina las bacterias, mohos y algas ⁶⁰.
3. Costo de capital inicial bajo así como también se reducen los gastos de operación comparándolos con las tecnologías similares como el ozono.
4. En el uso de UV no se necesita tanque de almacenamiento, y la desinfección depende de la intensidad de la lámpara y el tiempo de contacto del agua con ésta.
5. En la desinfección con UV no se añaden químicos a la alimentación por tanto no hay subproductos de formación como sucede cuando se aplica cloro y que junto con los orgánicos forman los llamados trihalometanos.
6. Con el uso de luz UV, no hay ningún cambio en el color, olor, pH o en la conductividad, ni tampoco en la química general del agua.
7. Operación automática sin atenciones especiales o mediciones.
8. Simplicidad y facilidad de mantenimiento.

Por otra parte sus limitantes para la desinfección con luz UV ó la desinfección con cloro son las siguientes:

1. Un problema en el que los microbios se esconden tras la coraza de partículas suspendidas y así pueden pasar a través de los esterilizadores sin tener una penetración directa de la UV. Este riesgo puede reducirse por medio de filtración de al menos 5 micras de tamaño.
2. El uso de hierro/manganeso causa incrustación en el tubo de cuarzo a niveles bajos de 0.03 mg/L de fierro y 0.05 mg/L de manganeso. Un pretratamiento adecuado es requerido para eliminar este problema.
3. La dureza de calcio y magnesio permite la incrustación en la lámpara o en el tubo de cuarzo, este problema se nota especialmente a bajos flujos cuando el calcio y magnesio se unen a los carbonatos y sulfatos para formar la incrustación dentro de la cámara del esterilizador y en la lámpara o tubo de cuarzo.
4. El uso de cloro genera la formación de subproductos llamados trihalometanos (compuestos orgánicos mezclados con partículas de cloro).

A.3.7. Ajuste de pH con ácidos

El agua que se va a desalar generalmente tiene un pH elevado, aproximadamente un pH de 8 en el agua de mar y valores superiores en el agua salobre, por lo que es necesario neutralizar para obtener una mayor eficiencia en el proceso de desalación.

El valor del pH generalmente se ajusta a valores bajos donde las membranas utilizadas, por ejemplo en el proceso de ósmosis inversa (OI) muestran un mejor funcionamiento. El ajuste del pH es necesario también para prevenir la incrustación del carbonato de calcio (CaCO_3). Los ácidos tales como el ácido sulfúrico se utilizan para alcanzar el valor de pH deseado.

La función de los anti-incrustantes es la de mejorar la solubilidad de algunas sales y prevenir su precipitación (uno de los factores limitantes de la conversión de las plantas desaladoras)²⁸. Para las condiciones de operación de las plantas desaladoras se ha adoptado un polímero orgánico como dispersante (hexametáfosfato sódico), siendo la dosificación de 1 mg/L ²⁹.

En una planta de ósmosis inversa promedio se dosifica entre 50 – 350 mg/L de ácido sulfúrico para ajustar el pH, rápidamente se vuelve aparente que este no es un método de bajo costo para la inhibición de incrustaciones. Con el uso de anti-incrustantes se puede rebajar el costo relacionado con el ácido ajustando el pH del agua de alimentación a 7.0 ³⁹.

A.3.8. Decloración

La decloración tiene que ser realizada antes del proceso de ósmosis inversa (OI) porque el cloro residual en el agua de alimentación al módulo de ósmosis inversa daña las membranas.

La resistencia al cloro varía dependiendo del material de la membrana, los principales fabricantes de membranas esperan la degradación de la membrana después de una exposición de 200 – 1 000 horas con una concentración de 1 mg/L de cloro libre para membranas compuestas.

El grado del daño del cloro también depende del valor de pH, la degradación es más rápida en agua alcalina (con pH mayor a 8) que en agua neutra o ácida, las temperaturas altas también aceleran la degradación de la membrana por oxidación. El metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) se utiliza comúnmente para la decloración debido a su alta rentabilidad ⁶¹. En agua el metabisulfito de sodio reacciona formando bisulfito de sodio (NaHSO_3).

En la práctica, la dosis típica que se utiliza de metabisulfito de sodio es de 3.0 mg para remover 1 mg de cloro libre, en contraste con lo teóricamente calculando de 1.34 mg de metabisulfito de sodio por 1 mg de cloro; además del metabisulfito de sodio, el carbón activado es muy eficaz en la reducción del cloro libre. En un lecho de carbón activado, el agua reacciona con el carbón y el cloro produciendo ácido clorhídrico (HCl). El punto en el que se realiza la desinfección con cloro en el tren del pretratamiento, tiene influencia en el funcionamiento de la membrana.

A.3.9. Coagulación-floculación

La coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión y facilitar su aglomeración. Se realiza mediante la dosificación y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene como objetivo favorecer, mediante una mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar flóculos que pueden eliminarse fácilmente mediante filtración, decantación, sedimentación, etc. ⁴⁰.

El agua de mar se trata a partir de un coagulante que es ayudado por el proceso de floculación, se añaden en casos muy particulares, floculantes como micropartículas de arena que permite la formación de flóculos de mayor peso específico, aumentando la velocidad de sedimentación hasta 20 veces más que otros procesos convencionales, si es que el agua contiene un alta cantidad de partículas suspendidas o turbiedades altas ^{40, 41}.

Cuando el agua de alimentación tiene un alto índice de ensuciamiento (mayor a 10), se utiliza la coagulación-floculación en línea seguido por la operación de filtración. Los mezcladores estáticos son apropiados y usualmente empleados para la mezcla de coagulantes y floculantes en línea en los procesos de ya que proporcionan toda la energía necesaria para una mezcla completa, obteniendo el máximo de eficiencia ⁶¹.

A.3.9.1. Aplicación de la coagulación-floculación

Los procesos de coagulación-floculación se usan para aglomerar y remover del agua salina la materia suspendida y coloidal, incluyendo a las bacterias y virus. Varios estudios extensos han indicado que con sistemas de coagulación-floculación y sedimentación cuidadosamente operados se puede conseguir la remoción de virus en un porcentaje mayor al 99% de eficiencia ⁴¹.

A.3.9.2. Insumos requeridos

Los coagulantes se dividen principalmente en inorgánicos y orgánicos. Los coagulantes inorgánicos más comúnmente utilizados son el cloruro férrico y el sulfato de aluminio, mientras que los coagulantes orgánicos más comunes son las poliaminas y el policloruro de aluminio ⁴².

Las dosis típicas para pretratamiento de los coagulantes inorgánicos son mayores (5-30 mg/L) que las dosis requeridas de los coagulantes orgánicos (0.2-1.0 mg/L)⁴².

El sulfato de aluminio no se utiliza comúnmente como coagulante en pretratamientos de por membranas debido al gran potencial de dañar al sistema de ósmosis inversa, mientras que el cloruro férrico es el reactivo químico frecuente en los pretratamientos por ya que reduce el índice de ensuciamiento a un valor igual o menor a 3, necesario para el sistema de OI, su dosificación está regulada en función del caudal de agua a tratar ⁶².

En relación con los coagulantes orgánicos el policloruro de aluminio (0.1-1.0 mg/L) se dosifica en ocasiones separadamente ó junto con el cloruro férrico ya que con su adición se reduce la dosificación de cloruro férrico (dosis menores a 10 mg/L)⁶². Los floculantes dosificados son principalmente polielectrolitos de carácter aniónico como la poliacrilamida en un rango de 4 a 8 mg/L⁴².

El grado óptimo del pH para llevar a cabo la coagulación-floculación para añadir cloruro férrico debe ser mayor a 5, posterior a la adición del cloruro férrico se requiere el ajuste de pH, ácidos tales como el ácido sulfúrico se utilizan para alcanzar el valor de pH deseado, y a veces se utiliza ácido clorhídrico cuando la adición del ácido sulfúrico causa precipitados de sulfato ⁴².