

01121  
57



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

## DISEÑO DE SISTEMAS DE DESALACION POR OSMOSIS INVERSA

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**  
P R E S E N T A :  
FRANCISCO GUTIERREZ GALICIA

ASESOR:

M. I. ENRIQUE CESAR VALDEZ



MÉXICO, D. F.

2003



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/110/01

Señor  
FRANCISCO GUTIÉRREZ GALICIA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de

"DISEÑO DE SISTEMAS DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA"

- INTRODUCCION
- I. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA
  - II. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA
  - III. DISEÑO DE SISTEMAS DE DESALACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA
  - IV. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS
  - V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 20 de junio de 2001.

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
MP/mstg.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Francisco Gutierrez Galicia  
FECHA: 03/03/2003  
FIRMA: Francisco Gutierrez

b

Con un sincero agradecimiento al Ing. Enrique César Valdez por su dedicación y por la confianza que me brindó al realizar esta tesis.

A la Ing. Alba Vázquez y al Ing. Miguel Ángel González por brindarme su apoyo incondicional durante mi estancia en el departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

A todas y cada una de las personas que con sus consejos y observaciones han enriquecido este trabajo.

A mi alma mater, por mi formación y por brindarme el enorme privilegio de ser universitario.

Quiero agradecer a mis papás. A él, porque decidió quedarse unos años más por este mundo y espero sinceramente que sean muchos y a ella, porque me alienta a seguir superándome.

A mis abuelos que me han brindado tanto cariño a lo largo de mi vida y me han apoyado en cada una de mis decisiones.

A mis tías y tíos, por sus consejos y a Emilio, por el cariño que me demuestra con la convivencia.

A Claudia por quererme mucho.

Mil gracias a mis amigos porque hicieron más amena mi estancia en la Universidad.

Quiero agradecer a mis papás. A él, porque decidió quedarse unos años más por este mundo y espero sinceramente que sean muchos y a ella, porque me alienta a seguir superándome.

A mis abuelos que me han brindado tanto cariño a lo largo de mi vida y me han apoyado en cada una de mis decisiones.

A mis tías y tíos, por sus consejos y a Emilio, por el cariño que me demuestra con la convivencia.

A Claudia por quererme mucho.

Mil gracias a mis amigos porque hicieron más amena mi estancia en la Universidad.

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentos del proceso de ósmosis inversa.</b>	
<b>2.1</b>	<b>Características de las soluciones.</b>	<b>3</b>
2.1.1	Propiedades de la materia.	
2.1.2	Propiedades de las soluciones.	
<b>2.2</b>	<b>Fenómeno de ósmosis.</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Presión osmótica</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Ósmosis inversa</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>Elementos de un sistema de ósmosis inversa.</b>	
<b>3.1</b>	<b>Antecedentes históricos.</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Desalación por medio de ósmosis inversa</b>	<b>22</b>
3.2.1	Sistemas de desalación por ósmosis inversa	
3.2.2	Definiciones	
<b>3.3</b>	<b>Transporte a través de las membranas.</b>	<b>27</b>
3.3.1	Fundamentos	
3.3.2	Ecuaciones del proceso	
<b>3.4</b>	<b>Membranas.</b>	<b>31</b>
3.4.1	Estructura	
3.4.2	Materiales	
<b>3.5</b>	<b>Configuraciones</b>	<b>38</b>
3.5.1	Módulos de placas	
3.5.2	Módulos tubulares	
3.5.3	Módulos espirales	
3.5.4	Módulos de fibra hueca	
<b>3.6</b>	<b>Unidad de ósmosis inversa</b>	<b>46</b>
3.6.1	Definiciones	
3.6.2	Etapas	
<b>3.7</b>	<b>Bombas de alta presión.</b>	<b>51</b>
3.7.1	Bombas de desplazamiento positivo	
3.7.2	Bombas centrifugas	
<b>3.8</b>	<b>Equipos de recuperación de energía</b>	<b>61</b>

<b>4 Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa.</b>	
4.1 Análisis de la calidad y aportación de agua salobre.	66
4.1.1 Muestreo.	
4.1.2 Caracterización	
4.1.3 Características de las aguas salobres.	
4.1.4 Calidad requerida.	
4.2 Captación	82
4.2.1 Captación abierta	
4.2.2 Captación cerrada	
4.3 Pretratamiento físicos	89
4.3.1 Filtros de arena	
4.3.2 Filtros de cartucho	
4.4 Pretratamiento químico	97
4.4.1 Coagulación	
4.4.2 Cloración	
4.4.3 Ajuste de pH	
4.4.4 Decloración	
4.4.5 Inhibición	
4.5 Selección de la membrana	110
4.5.1 Características de las membranas	
4.5.2 Membranas comerciales	
4.5.3 Selección de membranas	
4.6 Módulos	118
4.6.1 Parámetros técnicos	
4.6.2 Módulos comerciales	
4.6.3 Diferencias entre los módulos	
4.6.4 Selección de módulos	
4.7 Etapas	128
4.7.1 Bastidores	
4.7.2 Número de módulos	
4.7.3 Agrupación de las etapas	
4.8 Equipo de bombeo	140
4.8.1 Presión de bombeo	
4.8.2 Bombas de alta presión	
4.9 Ejemplo de diseño	144
4.9.1 Condiciones de la zona	
4.9.2 Tamaño de la palanta	
4.9.3 Selección de membranas	
4.9.4 Diseño	

---

<b>5 Operación y mantenimiento</b>	
5.1 Arranque inicial	160
5.2 Válvulas	166
5.3 Monitoreo	170
5.3.1 influencia de la presión	
5.3.2 influencia de la temperatura	
5.3.3 Influencia de la salinidad	
5.3.4 Influencia del pH	
5.4 Limpieza	175
5.4.1 Filtros	
5.4.2 Membranas	
5.5 Consideraciones económicas	185
5.5.1 Estructura de los costos	
5.5.2 Costos fijos	
5.5.3 Costos variables	
5.5.4 Costos totales	
<b>6 Conclusiones</b>	<b>197</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>199</b>

## 1 Introducción

En este trabajo se presenta el informe de una investigación bibliográfica acerca de la tecnología de ósmosis inversa aplicada en la desalación de agua para destinarla al uso y consumo humanos. El objetivo general es evaluar el estado del arte de dicha tecnología y la posibilidad de su aplicación en determinadas zonas del país. Para tal efecto, también se realizó la recopilación de información acerca de los principales fabricantes y operadores relacionados con dicha tecnología.

Como resultado de lo anterior se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Investigar, estudiar y describir los principios teóricos en los que se basa la tecnología de ósmosis inversa.
2. Investigar y estudiar las características de las aguas a tratar y los principales componentes de un sistema.
3. Establecer y aplicar una metodología para el diseño.
4. Plantear recomendaciones para el funcionamiento eficiente del sistema.

Para cumplir con los objetivos planteados, el presente trabajo se dividió en cuatro secciones.

En el Capítulo 2 se incluye un resumen de la investigación documental enfocada a describir los principios físicos y químicos en los cuales se basa la ósmosis inversa.

En el Capítulo 3 se describe el desarrollo de la tecnología de ósmosis inversa desde sus inicios hasta nuestros días. Posteriormente se describen los elementos que componen un sistema así como sus funcionamiento.

En las páginas de internet, en manuales y en catálogos de los fabricantes se consultaron las características de los elementos comerciales descritos en el capítulo anterior. También se estudiaron los requerimientos necesarios para su instalación, para de esta forma poder establecer una metodología que permita realizar el diseño de una planta desaladora. Finalmente, con base en estos requerimientos y en las herramientas proporcionadas por los fabricantes se realizó el diseño de un sistema desalación por medio de ósmosis inversa. Todo esto se trata en el Capítulo 4.

En el Capítulo 5 se describen las actividades que incluyen la operación y mantenimiento de los sistemas de desalación por ósmosis inversa. Esto se realizó con base en las recomendaciones hechas por distintos operadores de plantas de ósmosis inversas actualmente en funcionamiento.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Se propone la creación de este tipo de plantas en México, como una alternativa viable para el abastecimiento de agua potable en regiones costeras en las que existen problemas críticos de intrusión salina. Si bien es cierto que la tecnología no se produce en el país, la información recopilada en este trabajo nos hace pensar que este no es un factor decisivo en la implantación de estos sistemas, ya que su eficiencia probada ha sido en otros lugares del mundo bajo circunstancias similares.

## 2 Fundamentos del proceso de ósmosis inversa

La tecnología de ósmosis inversa se basa en el fenómeno de ósmosis, que es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana tienden a igualar sus concentraciones.

Para ello se produce un movimiento de la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando alcanza un equilibrio entre ambas concentraciones, dando lugar al fenómeno de la ósmosis. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

Se puede invertir este proceso, si aplicamos una presión por arriba de la presión osmótica en la solución más concentrada, el movimiento se produce desde la solución más concentrada hacia la más diluida, originándose el fenómeno de ósmosis inversa.

En este capítulo se describe cada uno de los fundamentos teóricos en los cuales se basa la ósmosis inversa, empezando con las propiedades de las soluciones de entre las que destaca la presión osmótica la cual da lugar al fenómeno de ósmosis, y posteriormente se explica el fenómeno de la ósmosis y la ósmosis inversa.

### 2.1 Características de las soluciones

#### 2.1.1 Propiedades de la materia

Según Brown *et al* (1993) la mayor parte de la materia que encontramos consiste en combinaciones de diferentes sustancias. Se emplea el término de mezcla para referirse a combinaciones de dos o más sustancias en las cuales cada una de ellas retiene su propia identidad química. Algunas mezclas, como la arena, las rocas y la madera, no tienen la misma composición, propiedades y apariencia en cada parte. Tales mezclas son heterogéneas. Las mezclas que son uniformes en todas sus partes son homogéneas: el aire es una mezcla homogénea de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua y bióxido de carbono, además de cantidades menores de otras sustancias. Las mezclas homogéneas también se llaman soluciones.

La composición de las mezclas puede variar ampliamente; debido a que cada componente conserva sus propiedades, podemos, sin embargo, separar una mezcla en sus sustancias componentes, aprovechando las diferencias de sus propiedades físicas.

Las sustancias tienen a su vez, una composición constante invariablemente. Podemos

clasificar a las sustancias como elementos o compuestos. Elementos son sustancias que no se pueden descomponer en sustancias más simples por medios químicos. Los compuestos, en cambio se pueden descomponer por medios químicos en dos o más elementos.

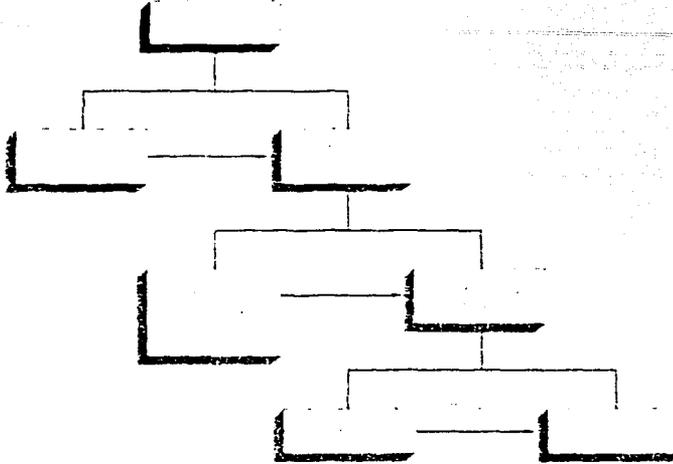


Figura 2.1. Clasificación de la materia (Brown *et al.* 1993).

### 2.1.2 Propiedades de las soluciones

Una solución es la mezcla homogénea de dos o más sustancias, una de ellas se denomina *disolvente*; suele ser el componente que se encuentra en mayor cantidad. Las otras sustancias en la solución se conocen como *solutos*, se dice que están *disueltas* en el disolvente.

Las soluciones pueden ser gaseosas, líquidas o sólidas. Como se muestra en la tabla 2.1. El disolvente suele ser el componente que se encuentra en mayor cantidad. Los otros componentes se denomina solutos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 2.1. Ejemplos de disoluciones (Brown *et al.* 1994)

Estado de la solución	Estado del disolvente	Estado del soluto	Ejemplo
Gaseosos	Gaseosos	Gaseosos	Aire
Líquido	Líquido	Gaseosos	Oxígeno en agua
Líquido	Líquido	Líquido	Alcohol en agua
Líquido	Líquido	Sólido	Sal en agua
Sólido	Sólido	Gaseosos	Hidrógeno en platino
Sólido	Sólido	Líquido	Mercurio en plata
Sólido	Sólido	Sólido	Plata en oro

La concentración de una disolución se puede expresar ya sea cualitativa o cuantitativamente. Los términos *diluida* o *concentrada* se utilizan para describir una solución en forma cualitativa. Una solución con una concentración relativamente pequeña de soluto se dice que está diluida; una solución con una alta concentración se dice que está concentrada.

Se utilizan también diversas expresiones cuantitativas de la concentración. Una de las más sencillas es el porcentaje en peso. El porcentaje en peso de un componente en una solución está dado por la siguiente expresión.

$$\text{Porcentaje en peso del componente} = (\text{masa del componente en solución} / \text{masa total de la solución}) * 100 \quad (2.1)$$

Para concentraciones muy diluidas, las concentraciones se suelen expresar en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/l)

$$\text{ppm del componente} = (\text{masa del componente en la solución} / \text{masa total de la solución}) * 10^6 \quad (2.2)$$

Una solución se forma cuando una sustancia se dispersa uniformemente en otra. Con excepción de las mezclas gaseosas, todas las soluciones comprenden una fase condensada. Se sabe que las sustancias en el estado líquido y en el sólido experimentan fuerzas de atracción que mantiene juntas las partículas individuales. Las fuerzas intermoleculares (dipolo-dipolo, ion-dipolo, fuerzas de dispersión de London) actúan también entre una partícula del soluto y el disolvente que la rodea.

Cualquiera de las diversas fuerzas intermoleculares pueden actuar entre las partículas del soluto y del disolvente de una solución. Como regla general, esperamos que se formen soluciones cuando las fuerzas de atracción entre soluto y disolvente son comparables en

magnitud con las que existen entre las partículas del soluto o entre las del disolvente. Esta generalización puede expresarse en forma sencilla como "lo semejante disuelve a lo semejante". Las sustancias no polares son solubles en disolventes no polares; los solutos iónicos y los polares son solubles en los disolventes polares. Por ejemplo la sustancia iónica NaCl se disuelve fácilmente en agua debido a la interacción de los iones y las moléculas polares del H<sub>2</sub>O (Brown *et al.*, 1993).

La cantidad de sustancia que se disuelve en otra no sólo depende de las fuerzas intermoleculares del soluto y del disolvente, sino también de la temperatura y la presión.

Los cambios en la temperatura o presión originan que se rompa el equilibrio dinámico de la solución, disminuyendo o aumentando la capacidad de disolución del disolvente. La solubilidad de un gas en cualquier disolvente aumenta a medida que se incrementa la presión del gas sobre el disolvente. En cambio, la solubilidad de los sólidos y líquidos no se afecta notablemente por la presión. Contrario a la presión un aumento de temperatura disminuye la solubilidad de los gases en disolventes líquidos, sin embargo, la solubilidad de los compuestos iónicos aumenta al aumentar la temperatura.

De igual forma se debe considerar que algunas de las propiedades físicas de las soluciones difieren en mucho de las del disolvente puro, estas propiedades se denominan coligativas (Coligativa significa "depende de la colección"; las propiedades coligativas dependen del efecto colectivo de las partículas del soluto).

Las propiedades físicas que dependen de la concentración existen de soluto y que por ende se denominan coligativas son:

- Abatimiento del punto de congelación
- Abatimiento del punto de ebullición
- Reducción de presión de vapor
- Ósmosis

El conocimiento de estas propiedades es fundamental, debido a que podemos determinar su concentración del soluto mediante parámetros físicos. En general, con referencia a estas propiedades podemos invertir el proceso de disolución, modificando la presión y la temperatura. Se dejará para una explicación más detallada el caso de la ósmosis, ya que en dicho caso, mediante la modificación de la presión, podemos lograr cierta concentración o modificar la existente sin revertir totalmente el proceso de disolución, y con base en esta propiedad se desarrolla el proceso de ósmosis inversa.

Un soluto disuelto hace descender la presión de vapor del líquido. La presión de vapor sobre un líquido es el resultado del equilibrio dinámico. La velocidad a la cual las moléculas dejan la superficie del líquido y pasan a la fase gaseosa, es igual a la velocidad

a la cual las moléculas de la fase gaseosa regresan al líquido. Un soluto no volátil que se añade al líquido, reduce la capacidad con que las moléculas del disolvente pasan de la fase líquida a la fase gaseosa, como se muestra en la figura 2.2.

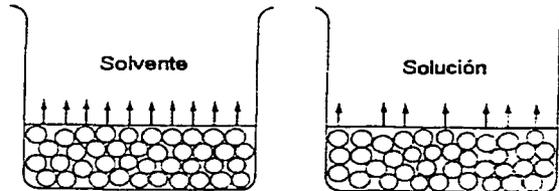


Figura 2.2. Un soluto no volátil reduce la velocidad de evaporación del disolvente (Brown *et al.* 1993).

Al mismo tiempo, sin embargo, no hay cambio en la velocidad a la que las moléculas del disolvente en la fase gaseosa regresan a la líquida. El desplazamiento del equilibrio debido al soluto, reduce la presión de vapor sobre la solución. El grado al cual un soluto no volátil abate la presión de vapor es proporcional a su concentración. Duplicando la concentración del soluto se duplica su efecto.

Las soluciones que contienen solutos no volátiles hierven a temperaturas más elevadas que las del disolvente puro y, de la misma forma se congelan a menor temperatura. Esto en ambos casos se debe a una disminución de la presión de vapor, es decir, el disolvente en solución se vuelve más resistente a abandonar la fase líquida.

En el caso del aumento del punto de ebullición, se debe a que la presión de vapor de un líquido se incrementa al aumentar la temperatura; hierve cuando su presión de vapor es la misma que la presión que se ejerce en su superficie. Debido a que los solutos no volátiles abaten la presión de vapor de la solución, se requiere de una temperatura más elevada para lograr que una solución hierva.

El punto de congelación disminuye, ya que corresponde a la temperatura a la cual la presión de vapor de la fase sólida y líquida son iguales. Al abatir la presión de vapor abatimos el punto de congelación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.2 Fenómeno de ósmosis

Ciertos materiales (incluyendo muchas membranas de los sistemas biológicos y sustancias sintéticas como el celofán) son semipermeables. Es decir, cuando están en contacto con una solución, permiten el paso de algunas moléculas, pero no de otras. Con frecuencia permiten el paso de pequeñas moléculas de disolvente, como las del agua, pero bloquean el paso de moléculas o iones de soluto de mayor tamaño. Este carácter semipermeable se debe a la presencia de finos poros dentro de la membrana.

En una situación en la que sólo las moléculas del disolvente pueden pasar a través de la membrana, si ésta se coloca entre dos soluciones con concentraciones diferentes, las moléculas del disolvente se mueven en ambas direcciones a través de la membrana. No obstante, la concentración del disolvente es más elevada en la solución que contiene menos soluto que en la que está más concentrada. Por consiguiente, la velocidad de paso del disolvente de la solución menos concentrada a la más concentrada es mayor que la velocidad en la dirección opuesta. Por tanto hay un movimiento neto de moléculas del disolvente de la solución menos concentrada hacia la más concentrada. Este proceso se denomina ósmosis (Brown *et al.*, 1993).

La ósmosis juega un papel muy importante en los sistemas vivos, por ejemplo, las membranas de los glóbulos rojos son semipermeables. Si se colocan estas células en una solución de menor concentración en relación a la solución intracelular, se provoca que el agua salga de la célula, como se muestra en la figura 2.3.a. Esto causa que la célula se arrugue, proceso que se conoce como crenación. Si se colocan estas en una solución de mayor concentración respecto al líquido intracelular se ocasiona que el agua penetre en la célula. Esto causa la ruptura de la célula, proceso que se denomina hemólisis. A las personas que necesitan el remplazo de sus fluidos corporales nutrientes, y que no pueden ser transmitidos por vía oral, se les administran soluciones por infusión intravenosa la cual provee los nutrientes directamente al interior de las venas. Para evitar crenación o hemólisis de los glóbulos rojos, las soluciones deben ser de la misma concentración que la de los líquidos en el interior de las células.

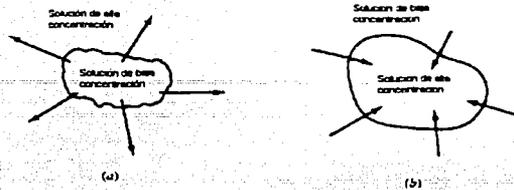


Figura 2.3. Ósmosis a través de la membrana semipermeable de un glóbulo rojo. (Brawon *et al.*, 1993).

Una manera más clara de ejemplificar el fenómeno de ósmosis, se puede lograr realizando un sencillo experimento. Se preparan dos soluciones con los mismos constituyentes (agua y azúcar) pero diferentes concentraciones. Si separan estas dos soluciones, de manera que la concentración del azúcar en el compartimiento 2 fuese mayor que en el compartimiento 1 ( $C_2 > C_1$ ), como se muestra en la figura 2.4, con una membrana semipermeable que solo permitirá el paso de uno de los dos constituyentes, como el disolvente (agua), impidiendoselo al soluto (azúcar).

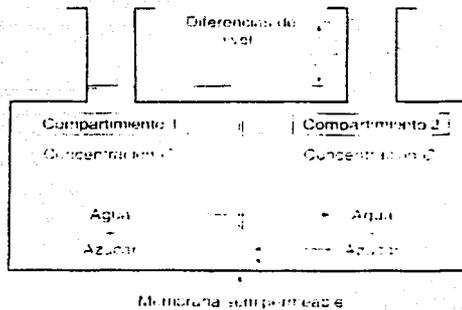


Figura 2.4. Difusión a través de una membrana (Farifias, 1999).

En esta situación, el agua se pasa del compartimiento 1 al 2, produciendo un aumento del nivel en este último, mientras que el soluto no podría difundirse del 2 al 1 al impedírselo la membrana.

Como muestra la figura 2.5 la difusión del agua pararía, cuando la presión generada por el aumento de nivel contrarrestase la que tiende a hacer que el agua se difunda y pase a través de la membrana, produciéndose el fenómeno de ósmosis.

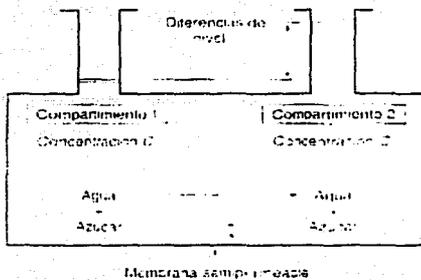


Figura 2.5. Fenómeno de ósmosis (Fariñas, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.3 Presión osmótica

Como se vio en la figura 2.6, la diferencia de presión resultante de las alturas desiguales del líquido en los dos compartimientos llega a ser tan grande, que el flujo del disolvente cesa. Por otro lado podemos aplicar una presión sobre el compartimento 2 para detener el flujo del disolvente, como se muestra en la figura 2.6: La presión requerida para evitar la ósmosis se conoce con presión osmótica ( $\pi$ ), de la solución.

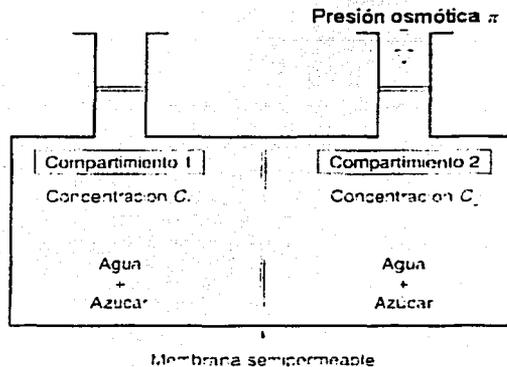


Figura 2.6. Presión osmótica de la solución. (Fariñas, 1999).

Pfeffer (1877) hizo los primeros ensayos cualitativos para determinar la presión osmótica, utilizando una membrana de ferrocianuro cúprico precipitado sobre los poros de una porcelana. Esta membrana fue la base de un gran número de ensayos precisos sobre la ósmosis a finales del siglo XIX y a principios del XX (César, 1988).

La serie de mediciones más extensa sobre presiones osmóticas de soluciones acuosas la realizaron Berkeley y Hartley (1906-1909) en Inglaterra y Frazer, Morse y sus colaboradores (1901-1923) en Estados Unidos. La figura 2.7 presenta un diagrama esquemático del aparato usado por Berkeley y Hartley.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

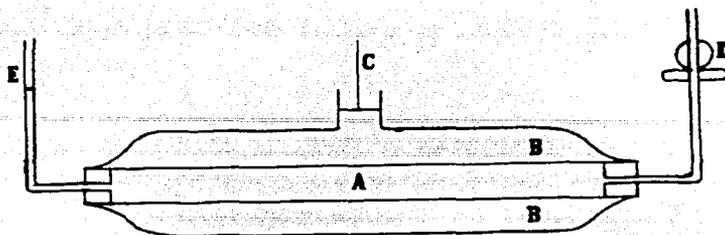


Figura 2.7. Aparato de presión osmótica de Berkeley y Hartley. (Maron *et al.* 1968).

"A" es un tubo poroso sobre cuya cara extrema se ha depositado por una técnica especial una capa de ferrocianuro de cobre. Este tubo fue montado por medio de juntas a prueba de agua dentro de una camisa metálica B, que lleva un ajuste C con el cual se aplica presión. Por D se llena A con agua pura hasta una señal fija sobre el capilar E, y en B se coloca la solución problema, entonces se sumerge el aparato en un termostato. Como resultado de la ósmosis, el nivel del líquido tiende a descender en E. Al aplicar presión por C el nivel en E se restablece y la presión que es necesaria aplicar para lograr dicha restauración es una medida de la presión osmótica de la solución. Con este procedimiento se establece pronto el equilibrio y no varía la concentración de la solución (Maron *et al.* 1968).

La tabla 2.2 presenta datos exactos de las presiones osmóticas de las soluciones de sacarosa en agua a diferentes temperaturas, según mediciones realizadas por Berkeley, Hartley y Morse, Frazer y colaboradores, y son muy características de las soluciones acuosas obtenidas con sustancias no electrolíticas (Ander *et al.* 1977).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 2.2. Presiones osmóticas de las soluciones acuosas de la sacarosa (Ando *et al.* 1977).

m (moles/100 gH <sub>2</sub> O)	Presión osmótica (atm)				
	0°	20°	40°	60°	80°
0.100	2.46	2.59	2.66	2.72	
0.200	4.72	5.06	5.16	5.44	
0.300	7.09	7.61	7.84	8.14	
0.400	9.44	10.14	10.60	10.87	
0.500	11.90	12.75	13.36	13.67	
0.600	14.38	15.39	16.15	16.54	
0.700	16.89	18.13	18.93	19.40	
0.800	19.48	20.91	21.80	22.33	23.06
0.900	22.12	23.72	24.74	25.27	25.92
1.000	24.38	26.64	27.70	28.87	28.00

Los resultados obtenidos por estos investigadores indicaron que la presión osmótica es proporcional a la concentración y a la temperatura absoluta.

Más tarde, con base en estos resultados, Van't Hof describió la presión osmótica como resultado de las colisiones de las moléculas del soluto con la membrana semipermeable, y supuso que las moléculas del disolvente no contribuyen de ninguna forma. Con este modelo, la presión osmótica de una disolución es la misma presión ejercida por un gas ideal ejercida si éste ocupara el mismo volumen de la disolución.

Así Van't Hof supuso que si la presión osmótica, varía con la concentración y la temperatura de la misma forma que un gas ideal, de igual forma se puede utilizar la ecuación de los gases ideales para determinar la presión osmótica. Por ejemplo, para el caso del agua:

$$\pi = \frac{n}{V_m} RT \quad (2.3)$$

en donde n es el número de moles de soluto, V<sub>m</sub> el volumen de agua, R la constante universal de los gases, y T la temperatura absoluta. Según esta ecuación,  $\pi$  dependería solamente de la concentración y la temperatura y no de la naturaleza de la solución; es decir, es un propiedad coligativa, como se mencionó. Sin embargo, la ecuación 2.3 al

igual que la del gas ideal sólo es válida para disoluciones diluidas. Para disoluciones más concentradas es necesario modificar la expresión de Van't Hoff introduciendo un coeficiente de presión osmótica  $\phi$ .

$$\pi = \phi \cdot \frac{n}{V_m} RT \quad (2.4)$$

Robison y Stokes (1959) han tabulado los coeficientes de presión osmótica para muchos electrolitos. El coeficiente varía con la concentración. Para la mayor parte de los electrolitos es menor que la unidad y generalmente disminuye al aumentar la concentración.

Se dispone de varias técnicas para medir la presión osmótica. Puede calcularse a partir de medidas de descenso de la presión de vapor, descenso del punto de congelación y a partir de mediciones directas. Esta técnica mide la presión necesaria para mantener el flujo del disolvente a través de la membrana tal y como se mencionó al principio de este capítulo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.4 Ósmosis Inversa

Como se muestra en la figura 2.8 supongamos que elevamos la presión del lado de la membrana que tiene mayor concentración. Si la presión en el lado de la solución más concentrada se eleva por encima de la presión osmótica, la dirección del flujo se invierte. Así, por efecto de esta presión aplicada, obligamos al disolvente a fluir en sentido contrario al que lo haría normalmente. Lo que estamos haciendo es el efecto inverso a la característica natural que llamábamos ósmosis, y tal proceso de manera lógica se llama ósmosis inversa.

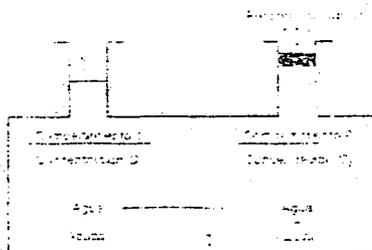


Figura 2.8. Principio del fenómeno de la ósmosis inversa (Fariñas, 1999)

La ósmosis inversa es el proceso unitario por el cual se obliga al líquido separado por una membrana a fluir del lado de mayor concentración al de menor concentración de soluto, al aplicar una presión en el lado de mayor concentración. El resultado es que de un lado de la membrana tendremos altas concentraciones de soluto, y del otro solvente semipuro (Morales, 1999)

La ósmosis es de alguna forma similar a la filtración, ambos procesos implican la separación de un líquido a partir de una mezcla que se hace pasar a través de un dispositivo que retiene los componentes. Este proceso también se ha denominado hiperfiltración. Sin embargo, existen al menos tres diferencias importantes. Primera, la presión osmótica es muy pequeña en la filtración ordinaria, y juega un papel muy importante en la ósmosis inversa. Segunda, en la ósmosis inversa no es posible obtener tortas filtrantes con bajo contenido de humedad, ya que la presión osmótica de la disolución aumenta con la separación de disolvente. Tercera, los filtros separan mezclas basándose principalmente en el tamaño, mientras que la semipermeabilidad de las membranas de ósmosis inversa depende de otros factores (Weber, 1979).

## 2.5 Aplicaciones

El proceso de ósmosis inversa permite por un lado separar de la solución de aporte un solvente o permeado, debido a que puede atravesar la membrana, y por otro obtener un concentrado o rechazo con todas aquellas sustancias que no pueden atravesarla. En consecuencia, la ósmosis inversa es tanto una técnica de purificación como de concentración selectiva debido a la semipermeabilidad de las membranas, pudiéndose utilizar en todos aquellos procesos que requieran de las dos posibilidades (Fariñas, 1999)

Los principales campos de aplicación de lo ósmosis inversa son:

### *Desalación de aguas*

Una de las primeras aplicaciones de la tecnología de ósmosis inversa fue la conversión de agua de mar en agua potable. Los contaminantes a eliminar en esta aplicación serían las sales disueltas.

### *Producción de agua potable*

La ósmosis inversa es el proceso de membrana más utilizado para el tratamiento de agua potable en Estados Unidos. La ósmosis inversa es capaz de rechazar contaminantes o partículas con diámetros tan pequeños como  $0.0001 \mu\text{m}$ . Mediante este proceso se puede llevar a cabo la remoción de sales, organismos patógenos, turbiedad, compuestos orgánicos sintéticos, pesticidas y la mayoría de los contaminantes presentes en el agua potable conocidos hoy en día, pudiendo eliminar de las aguas un mayor número de contaminantes que ninguna otra tecnología de tratamiento. (AWWA, 1998).

### *Producción de agua para la industria*

En diferentes industrias se requiere de una agua con una calidad mayor a la suministrada en las redes de abastecimiento de agua potable, en estos casos muchas de estas industrias utilizan el sistema de ósmosis inversa para mejorar la calidad del agua de suministro y adecuarla a sus procesos.

Algunas industrias requieren en sus procesos que el agua no sólo esté exenta de materias en suspensión y de sales disueltas, sino también de todo tipo de sustancias orgánicas. Un agua de estas características recibe el nombre de ultrapura. Actualmente se utiliza la ósmosis inversa para la producción de agua ultrapura (Fariñas, 1999).

Entre las industrias que requieren de esta calidad, destacan:

- Centrales de producción de energía eléctrica.
- Fabricas de semiconductores y electrónicos.
- Industrias farmacéuticas.

La ósmosis inversa también es utilizada para la producción de agua muy blanda, ya que reduce significativamente la dureza del agua. En las industrias en que se requiere calentar agua a baja presión y temperatura deben utilizar aguas con poca dureza, es decir con bajo contenido de calcio y magnesio para evitar la precipitación de sus carbonatos, sulfatos o hidróxidos durante el proceso de calentamiento. Los precipitados recubren la superficies de transferencia de calor dando lugar a corrosiones y pérdidas notables de rendimiento debido a que son malos conductores de calor (Fariñas, 1999).

#### *Tratamiento de Aguas residuales*

Cuando se desea reutilizar aguas residuales, la ósmosis inversa es utilizada como un tratamiento avanzado.

En tal caso el agua residual, tras sufrir un tratamiento biológico, es sometida, aun tratamiento físico-químico con una filtración de alta calidad para evitar el atascamiento de las membranas, pasando finalmente a través de una ósmosis inversa para eliminar parte de las sales disueltas así como la mayor parte de los compuestos orgánicos, metales pesados, bacterias, virus, etcétera (Fariñas, 1999).

#### *Tratamiento de efluentes industriales*

La utilización de la ósmosis inversa en el tratamiento de efluentes industriales persigue alguno de los tres objetivos siguientes.

- Concentrar la contaminación en un reducido volumen
- Recuperar productos de alto valor económico
- Recircular el agua

Es importante señalar que la ósmosis inversa no destruye la contaminación sino que, con mucho, permite concentrarla en un pequeño volumen. Este concentrado a veces puede reutilizarse de nuevo. Otras veces se puede obtener una serie de subproductos de alto valor económico. Finalmente, el permeado suele tener una baja concentración de contaminantes pudiéndose reutilizar en el proceso o bien verterse al red de alcantarillado (Fariñas, 1999).

Un gran número de industrias productoras de alimentos y vino producen efluentes con altas concentraciones de DBO que impiden que estos sean descargados sin un tratamiento previo. Al utilizarse tratamientos avanzados como el caso de la ósmosis inversa junto con filtración o ultrafiltración se produce una agua con una alta calidad que se puede reutilizar, y de esta forma reducir el consumo de agua que en este tipo de industrias es extremadamente alto.

En otras industrias como la galvanoplastia (plateado, zincado, niquelado), procesado de papel fotográfico y el pintado por electrodisposición, los sistemas de ósmosis inversa permite recuperar las sales procedentes de los baños de alto valor económico para su reutilización así como el agua.

La ósmosis, también es utilizada en industrias en que se tienen sistemas de refrigeración semiabiertos, en estos casos se dispone de una torre en la que la mayor parte del agua se enfría gracias a la evaporación de una pequeña parte. Como el agua al evaporarse no arrastra consigo sales disueltas, las sales se irían acumulando hasta que las corrosiones y/o precipitaciones fueran enormes. Para evitarlo se realiza una purga constante, esta se trata por un sistema de ósmosis inversa que elimina la mayor parte de las sales disueltas del agua de purga que posteriormente se reincorpora al sistema.

Sin embargo, los mayores éxitos obtenidos por la ósmosis inversa durante la década pasada han sido en la desalación y eliminación de compuestos orgánicos para abastecimiento de agua potable. Este proceso jugará un papel cada vez más importante en el suministro de agua a nivel mundial (AWWA, 1998).

# **TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

### **3 Elementos de un sistema de ósmosis inversa**

El proceso natural de ósmosis involucra el paso espontáneo de un líquido de una solución diluida a una más concentrada a través de una membrana semipermeable. Como ya hemos explicado, la ósmosis inversa es el reverso de este proceso natural.

De lo anterior se deduce que los elementos principales de un sistema de ósmosis inversa son: El equipo de bombeo de alta presión y los equipos de recuperación de energía que son los encargados de aplicar la presión a la solución concentrada, y por otra parte las membranas y los módulos en los cuales se agrupan estas según las necesidades de producción.

En este capítulo se describe el desarrollo histórico de los sistemas de ósmosis inversa así como de los fundamentos teóricos en los que se basa su funcionamiento, para posteriormente hacer una descripción de cada uno de los elementos que componen el sistema y sus posibles arreglos.

#### **3.1 Antecedentes históricos**

Desde el inicio de la década de los sesenta se consideraron fuentes alternativas de abastecimiento para lograr satisfacer el acelerado crecimiento en la demanda de agua para uso y consumo humano a nivel mundial. La desalinización o desalación parece ser una de las alternativas más viables, si se considera que el 97% del agua en el planeta está contenida en los océanos, y sólo el 0.1 % del agua dulce se encuentra en ríos y lagos; no obstante, debido su alto contenido de sales (35,000 mg/l) debe tomarse en cuenta que el agua de mar no es útil sin un tratamiento previo, por lo que los procesos por medio de los cuales se puede potabilizar el agua de mar requieren de un tratamiento no convencional.

La necesidad de utilizar tratamientos avanzados para desalación hasta ese entonces no se había convertido en una tendencia a nivel mundial. Un ejemplo claro de ello es la planta piloto de Coalinga, California, en la cual se utilizó ósmosis inversa con el objetivo de disminuir los costos originados por transportar agua para beber en carros tanque, desde un pozo localizado a 72 kilómetros de distancia a 7.50 dólares por cada 3,785 litros. El sistema operó hasta que se consiguió una solución todavía menos costosa que la ósmosis inversa, en 1972, gracias al canal de Coalinga. La nueva opción superficial justificaba el abandono de la desalación (Fariñas, 1999).

Las circunstancias fueron diferentes en Medio oriente, región en la cual el auge que tuvo el petróleo durante el siglo pasado originó el asentamiento de poblaciones e industrias.



aplica ahora en 564 plantas, un 16% del total. Sobre la base de la capacidad instalada, la ósmosis inversa y la electrodiálisis representan aproximadamente, el 23% y el 5% respectivamente, de la capacidad mundial de desalación. Las mayores plantas de ósmosis inversa han sido instaladas en Bahrain, donde se encuentra una planta de 42.24 m<sup>3</sup>/s en Ras Abu-Jarjur, que desala agua totalmente salobre y una planta de 56 m<sup>3</sup>/s en Al Daur. Estas cifras reflejan claramente la competitividad creciente de las tecnologías de membrana. La razón de esta tendencia es que el costo real de la tecnología de ósmosis inversa en particular ha decrecido firmemente en los últimos años (Web 2).

En Estados Unidos de América el principal impulsor del desarrollo de la tecnología de la ósmosis inversa no fue sólo la desalación, sino el incremento en la normatividad impuesta para el tratamiento de aguas residuales. En Estados Unidos en 1986, la norma de tratamiento de aguas superficiales establecía la eliminación total de protozoarios específicos, virus y bacterias. Estos requerimientos sólo podían cumplirse aumentando la dosis de cloro; sin embargo, mayor dosis puede dar lugar a altas concentraciones de subproductos de la oxidación, tales como el cloroformo y trihalometanos, los cuales son productos tóxicos. Además, las enmiendas a la normatividad disponen que se establezca un nuevo ajuste a los productos orgánicos sintéticos como plomo y cobre en el agua potable. De este modo, las enmiendas han forzado a los profesionales del tratamiento de aguas a considerar el empleo de procesos de tratamiento avanzado, tales como la ósmosis inversa, que sola o en conjunción con los convencionales, son capaces de cumplir con las normas (AWWA., 1998).

En la actualidad existen equipos de desalación en más de 100 países, 10 de ellos concentran el 75 % de la capacidad instalada. Alrededor de la mitad de la capacidad existente se utiliza para desalar agua marina en Medio Oriente y el Norte de África. Arabia Saudita se coloca en primer lugar (24 % de la capacidad mundial), la mayor parte de su producción es aún a partir de destilación de agua de mar. Estados Unidos ocupa el segundo lugar, con alrededor del 16% de la capacidad mundial; la mayor parte de sus plantas funcionan con procesos de ósmosis inversa y tratan principalmente aguas salobres subterráneas (Ruiz, 2001).

No obstante este futuro prometedor, el desarrollo y uso de membranas se ha restringido a la fabricación de productos de alto valor económico, como productos farmacéuticos o alimentos. El precio de las membranas no es competitivo, si consideramos el relativamente bajo precio del agua, aunque esta tendencia se espera que cambie debido a la creciente escases del agua.

### **3.2 Desalación por medio de ósmosis Inversa**

El fenómeno de ósmosis inversa fue descubierto por el francés J.A. Nollet, cuyos trabajos sobre la difusión a través de membranas animales fueron publicados en 1748.

Más de cien años después, en 1855, A. Fick dio a conocer sus leyes para describir, de forma aproximada, la difusión a través de membranas. Las primeras explicaciones teóricas sobre la ósmosis inversa fueron dadas por Van't Hoff hacia 1887.

Con el desarrollo de la termodinámica, J.W. Gibbs aportó la base científica para entender los fenómenos osmóticos y su relación con las propiedades termodinámicas. Todas estas teorías se completaron alrededor de 1920. A partir de esa fecha, la ósmosis inversa, salvo en el caso de fenómenos biológicos, quedó relegada a una curiosidad científica.

La idea de que la ósmosis inversa podría desalar el agua fue propuesta antes de 1930. Las investigaciones en Francia y Estados Unidos durante los años treinta dieron como resultado membranas de aceto de celulosa con propiedades desaladoras (César, 1988)

Las membranas originales de acetato de celulosa eran mucho menos permeables que las membranas modernas y requerían de una presión actuante mucho mayor, superior a 68 atm y solamente del 10 al 25 % del agua bruta era recuperada como producto por lo que el costo energético era alto a comparación con otros métodos de desalación (AWWA, 1998).

En 1953 Reid y Breton llevaron a cabo experimentos en la Universidad de Florida sobre ósmosis inversa y encontraron que ciertos materiales pueden formar películas que exhiben semipermeabilidad a las sales presentes en las aguas salobres y de mar; sin embargo, basándose en la velocidad de producción de agua, el acetato de celulosa resultó ser el material más adecuado.

Loeb (1962) desarrolló una técnica de preparación de películas para una membrana de acetato de celulosa modificado, con la cual se incrementó extraordinariamente el flujo de agua por unidad de superficie manteniéndose un rechazo excelente; dicha innovación constituyó un gran avance tecnológico que condujo al desarrollo de la desalación práctica con ósmosis inversa.

A partir de 1962, en la Universidad de los Ángeles, California (UCLA), se construyeron y ensayaron las primeras plantas piloto. El 4 de junio de 1965 el agua suministrada por una de las plantas piloto se incorporó a la red de agua potable de la ciudad de Coalinga (California); fue la primera planta del mundo que suministró agua potable obtenida con

este proceso.

En la actualidad las membranas utilizadas en los sistemas de desalación por medio de ósmosis inversa están fabricadas básicamente de uno de los siguientes materiales:

- Acetato de celulosa (CA)
- Polimida (PD)

Dado que los métodos de fabricación y tecnología de los materiales están avanzando constantemente, se están logrando membranas de tamaño de poro y permeabilidad controlada lo cual permite la separación de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas con tamaños de entre 1 y 10 Å<sup>o</sup> (Web. 3).

### 3.2.1 Sistemas de desalación por ósmosis inversa

Desde el punto de vista industrial, el proceso se desarrolla como se muestra en forma simplificada en la figura 3.2.

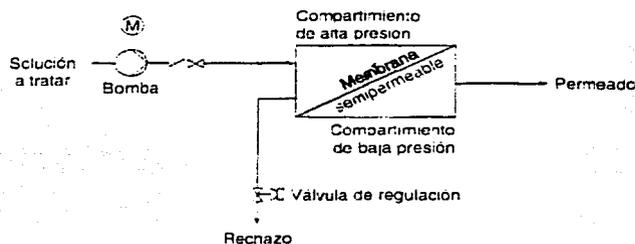


Figura 3.2. Esquema del proceso industrial de ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

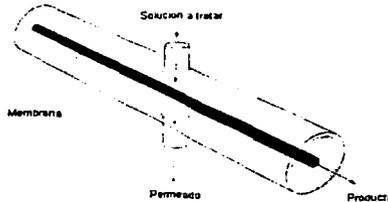
Una bomba envía el agua a tratar hacia una membrana semipermeable manteniendo permanentemente una elevada presión en uno de sus lados, con lo que una parte del agua y una cantidad muy pequeña de sales atraviesan la membrana.

Tanto la solución que atraviesa la membrana como la que es rechazada por ella evacuan continuamente sus compartimentos. El rechazo presenta habitualmente una elevada concentración de sales disueltas, estando libre de la mayor parte de sales en el producto o "permeado".

El fenómeno de ósmosis inversa se da en los compartimentos de alta presión como resultado de transferir la solución a tratar por medio de una presión a través de una densa

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

membrana fabricada expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular; como se muestra en la figura 3.3 el producto se recupera en el otro extremo.



3.3. Diagrama de una unidad de ósmosis inversa de fibras huecas (Brown et al. 1993).

Para poder producir agua pura a partir de agua salada se debe aplicar una presión que sea mayor a la presión osmótica de la solución.

### 3.2.2 Definiciones

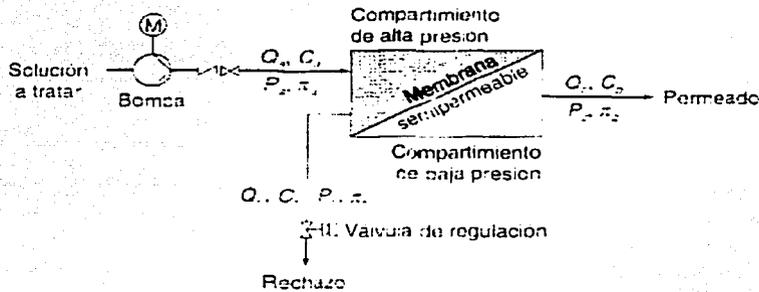


Figura 3.4. Variables de la ósmosis inversa (Fariñas, 1999)

A continuación se define los parámetros más importantes del proceso.

*Aportación* es la solución a tratar que llega a las membranas de ósmosis inversa. También se le conoce como aporte, solución de aporte o solución a tratar. La nomenclatura que se utiliza para la solución es:

Caudal :  $Q_a$   
Concentración:  $C_a$   
Presión hidráulica:  $P_a$

Presión osmótica:  $\pi_a$

*Permeado* es la solución que se obtiene del otro lado de la membrana, después de atravesarla. La nomenclatura que se utiliza para el permeado es:

Caudal:  $Q_p$

Concentración:  $C_p$

Presión hidráulica:  $P_p$

Presión osmótica:  $\pi_p$

*Rechazo* es la solución más concentrada que la aportación, que no puede atravesar la membrana. La nomenclatura utilizada en el rechazo es:

Caudal:  $Q_r$

Concentración:  $C_r$

Presión hidráulica:  $P_r$

Presión osmótica:  $\pi_r$

*Coefficiente de permeabilidad* es el volumen de solvente (agua) que atraviesa la membrana por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de presión a temperatura y salinidad constante. Suele medirse en  $(m^3)/(m^2 \cdot día \cdot bar)$  o simplificando sus unidades son  $(m)/(día \cdot bar)$  y se denota por medio de una A.

*Porcentaje de recuperación* es el cociente, expresado en porcentaje, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas y se representa por Y.

$$Y = 100 \frac{Q_p}{Q_a} \quad (3.1)$$

También se le suele llamar "factor de conversión"

*Porcentaje de rechazo de sales* es el cociente, expresado en por ciento, entre la concentración de la solución de aporte menos la de permeado y la concentración de la solución de aporte, la cual se representa con una R.

$$R = 100 \frac{C_a - C_p}{C_p} \quad (3.2a)$$

El rechazo no tanto por uno es:

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

$$r = 1 - \frac{C_p}{C_a} \quad (3.2b)$$

de donde se deduce:

$$C_p = (1-r)C_a \quad (3.2c)$$

*Porcentaje de paso de sales* es el cociente en tanto por ciento, entre la concentración de sales del permeado y aporte, se representa por  $P_s$ .

$$P_s = 100 \frac{C_p}{C_a} \quad (3.3a)$$

El paso de sales en tanto por uno es:

$$p = \frac{C_p}{C_a} \quad (3.3b)$$

*Factor de concentración* es le número de veces que se concentra las sales en le rechazo de la ósmosis inversa; su valor es igual al cociente entre las concentraciones de sales en el rechazo y la solución de aporte.

$$F_c = \frac{C_r}{C_a} \quad (3.4)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

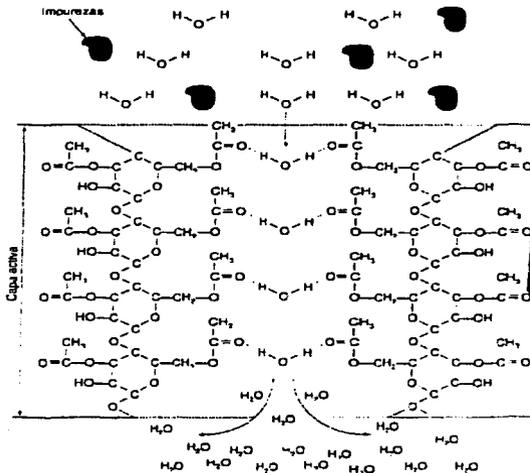
### 3.3 Transporte a través de las membranas de ósmosis inversa

#### 3.3.1 Fundamentos

Existen diversas teorías para explicar el transporte de agua y sales a través de una membrana semipermeable.

Para las membranas de ósmosis inversa el modelo utilizado habitualmente es el de "solución difusión". Según este modelo, cada componente de la solución a tratar se disuelve en la membrana según las leyes de distribución y equilibrio conocidas, difundándose a través de ellas debido a diferencias de concentración y presión existentes a ambos lados de la membrana (Fariñas, 1999).

La difusión del agua y de las moléculas polares a través de la membrana sería el resultado de un mecanismo de formación y destrucción de "puentes de hidrógeno" entre las moléculas del agua o las moléculas polares por una parte y los grupos de hidrófilos de la membrana por otra, por la acción de un gradiente de energía libre, también llamado potencial químico, producido por la diferencia de presión.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.5. Transferencia del agua mediante puentes de hidrógeno en una membrana de acetato de celulosa (Fariñas, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3.2 Ecuaciones básicas del proceso

Las fuerzas que intervienen en el paso del solvente y el soluto a través de la membrana son:

- Gradientes de presiones, para el solvente.
- Gradientes de concentraciones, para el soluto.

Las dos ecuaciones básicas del proceso son:

#### *Transporte de solvente*

Experimentalmente se comprueba que el flujo del solvente (caudal por unidad de superficie) es proporcional al gradiente de la presión efectiva a través de la membrana, es decir, la diferencia entre la variación de la presión externa aplicada y la variación de la presión osmótica.

$$J_a = A (\Delta P - \Delta \pi) \quad (3.5)$$

Donde:

$J_a$	:	Flujo de solvente en $m^3/d \cdot m^2$
$A$	:	Coefficiente de permeabilidad
$\Delta P = (P_a - P_p)$	:	Diferencia de la presión hidráulica entre ambos lados de la membrana
$\Delta \pi = \pi_a - \pi_p$	:	Diferencia de presiones entre ambos lados de la membrana
$(\Delta P - \Delta \pi)$	:	Gradiente de presión efectiva a través de la membrana.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

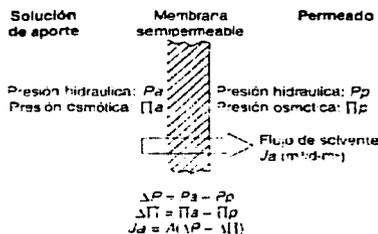


Figura 3.6. Esquema del transporte de solvente (Fariñas, 1999).

En la figura 3.6 se muestra la ley que rige el transporte del solvente a través de una

membrana de ósmosis inversa.

*Transporte de soluto*

El flujo del soluto a través de la membrana viene dado por la expresión:

$$J_s = J_a \cdot C_p = B(C_m - C_p) + M \cdot J_a C_m = B \cdot \Delta C + M \cdot J_a C_m \quad (3.6)$$

donde:

- $J_s$  : Flujo del soluto, en  $\text{kg/d} \cdot \text{m}^2$
- $J_a$  : Flujo del solvente, en  $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$
- $B$  : Coeficiente de permeabilidad de la membrana al soluto, en  $\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$
- $C_m$  : Concentración del soluto en la superficie de la membrana, en  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $C_p$  : Concentración del soluto en el permeado, en  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $M$  : Coeficiente de acoplamiento (adimensional)
- $\Delta C$  : Diferencia de gradiente o de concentraciones a través de la membrana, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

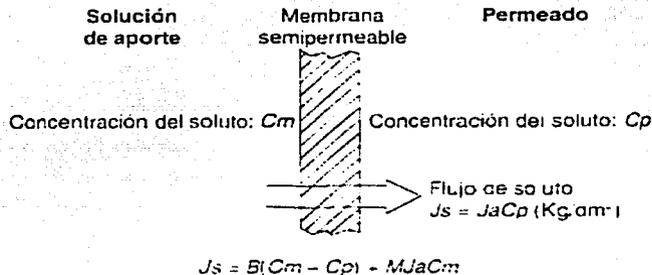


Figura 3.7. Esquema del transporte del soluto (Fariñas, 1999).

La ecuación 3.6 muestra que el flujo de soluto es la suma de dos contribuciones. La primera  $B \cdot \Delta C$ , es debida a su difusión molecular y es proporcional al gradiente de concentraciones a través de la membrana. La segunda es conectiva debida al arrastre que produce el solvente.

Dividiendo la ecuación 3.5 entre la ecuación 3.6, se obtienen

$$C_p = \frac{J_s}{J_a} = \frac{B\Delta C}{A(\Delta P - \Delta\pi)} + MC_m \quad (3.7)$$

La ecuación 3.7 indica que la concentración del soluto en el permeado es directamente proporcional al gradiente de concentraciones a través de la membrana e inversamente proporcional al gradiente de presiones efectivas a través de la misma.

Operando las ecuaciones 3.5 y 3.6 y teniendo en cuenta la 3.3a, se obtiene la expresión.

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{1-M} + \frac{B}{1-M} \cdot \frac{1}{J_a} \quad (3.8)$$

siendo  $r$  el rechazo del soluto.

El coeficiente de acoplamiento  $M$  tiene un valor próximo a 0.005 para la mayoría de las membranas.

La ecuación 3.8 muestra que, si representamos gráficamente el inverso del recazo del soluto ( $1/r$ ) en función del inverso del flujo del solvente ( $1/J_a$ ) obtendríamos una recta como la de la figura 3.8.

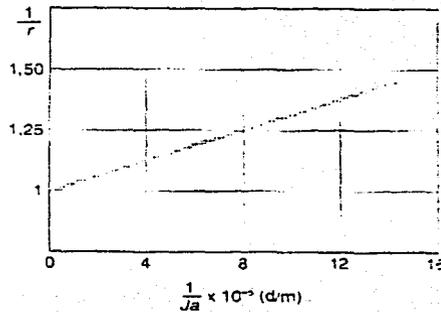


Figura 3.8. Relación entre los inversos del flujo de solventes y el recazo del soluto (Fariñas, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.4 Membranas

#### 3.4.1 Estructura

Atendiendo a la estructura que presentan las membranas al practicar un corte transversal a la superficie en contacto con la solución a tratar, las membranas pueden ser de dos tipos: simétricas y asimétricas.

##### *Simétricas*

La sección transversal de las membranas simétricas u homogéneas ofrece una estructura porosa uniforme a lo largo de todos su espesor, por lo que no existen zonas de mayor densidad en amabas caras de la membrana.

Este tipo de membranas presentan una elevada permeabilidad al solvente y un bajo rechazo de sales, por lo que se utilizan en otras tecnologías pero no en la ósmosis inversa.

##### *Asimétricas*

Como se muestra en la figura 3.9, este tipo de membranas presenta en su cara exterior, en contacto con la solución a tratar, una capa extremadamente densa y delgada bajo la cual aparece un lecho porosos.

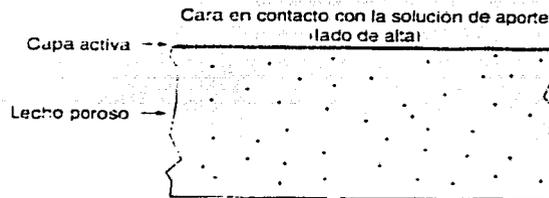


Figura 3.9. Esquema de la sección transversal de una membrana de ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

A la capa delgada se le llama capa activa y es la barrera que permite el paso del solvente e impide el paso del soluto. El resto de la membrana sólo sirve de soporte a la capa activa y debe al mismo tiempo ofrecer la mínima resistencia posible al paso del solvente.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Todas las membranas de ósmosis inversa tienen una capa activa y son por tanto asimétricas; existen dos tipos de membranas asimétricas: integrales y compuestas de capa fina.

Debido a que esta hecha del mismo polímero, en las membranas integrales existe continuidad entre la capa activa y el lecho poroso. Los dos tienen la misma composición química y entre ellos no hay una clara separación, sino un aumento progresivo de la porosidad. En la figura 3.10 se muestra una membrana de esta naturaleza.

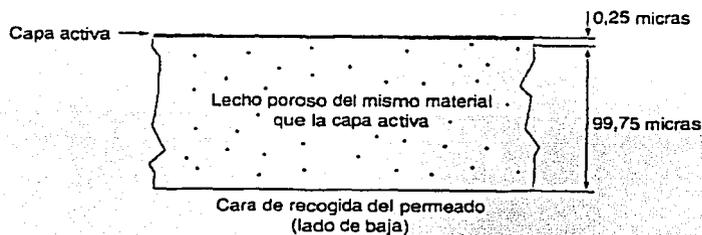


Figura 3.10. Sección transversal de una membrana Integral (Fariñas, 1999).

El principal inconveniente de este tipo de membranas es que toda mejora de las características de la capa activa viene acompañada de un detrimento en el comportamiento del lecho poroso y viceversa, al ser ambos del mismo polímero y tener misiones contrapuestas (Fariñas, 1999).

En las membranas compuestas de capa fina, la capa activa y el lecho poroso que le sirve de soporte son de materiales diferentes.

La figura 3.11 muestra una membrana de esta naturaleza. Se observa que la membrana consta de tres capas de distintos materiales que, en orden descendente, son:

- Capa superior: Capa activa.
- Capa intermedia: Lecho poroso soporte de la capa activa.
- Capa inferior. Tejido reforzado responsable de la resistencia mecánica de la membrana.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

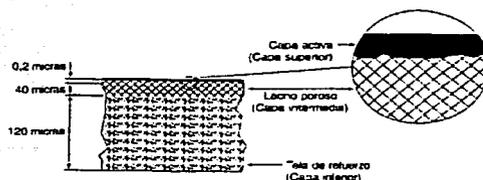


Figura 3.11. Sección transversal de una membrana compuesta de capa de fina (Fariñas, 1999).

Las membranas compuestas de capa de fina son la evolución tecnológica de las integrales, frente a éstas presentan las siguientes ventajas:

- Cada capa activa (activa, lecho soporte o tejido reforzado) puede desarrollarse y optimizarse separada e independientemente, adecuando cada una a su trabajo específico.
- Se puede variar a voluntad el espesor de la capa activa adecuándolo a las necesidades específicas de la aplicación.
- Puede alterarse la porosidad de la capa activa y, por tanto, su porcentaje de rechazo de sales así como el flujo de permeado, en función de las necesidades.

### 3.4.2 Materiales

Con base en la composición química de la capa activa, las membranas pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Orgánicas
- Inorgánicas

#### Orgánicas

Reciben este nombre todas aquellas membranas cuya capa activa está fabricada a partir de un polímero o copolímero orgánicos. Aunque existe un sin número de polímeros y copolímeros y mezclas, tanto naturales como sintéticos con los que se pueden fabricar membranas, muy pocas de éstas son aptas para fabricar membranas de ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

De todos los compuestos orgánicos, los que han tenido éxito en la fabricación de membranas de ósmosis inversa son: acetato de celulosa, triacetato de celulosa, poliamidas aromáticas, poliéter-urea, Poliacrilonitrilo, Polibencimidazola, Polipiperacidamidas, Polifurano sulfonado y Polisulfona sulfonada

### *Acetato de celulosa*

Acetilando celulosa procedente de la madera o del algodón se obtiene un producto llamado aceto de celulosa. Tratándolo con agentes saponificantes se hidroliza una pequeña parte de los grupos acetato, mejorando así su solubilidad y dando lugar al aceto de celulosa modificado (Fariñas, 1999).

Las primeras membranas utilizadas para desalación por ósmosis inversa, estaban hechas de acetato de celulosa. Este tipo de membranas presenta un alto rechazo a las sales así como una alta permeabilidad e incluso son resistentes al cloro. Sin embargo, requiere de elevadas presiones de trabajo, y un estricto control en las condiciones de operación (temperatura y pH) para evitar la hidrólisis y con ello el riesgo de disolución de la membrana de aceto de celulosa.

### *Triacetato de celulosa*

El triacetato de celulosa tiene un mejor comportamiento que el acetato de celulosa frente a la hidrólisis, lo que se traduce en una posibilidad de trabajar con una gama de pH más amplia. Este polímero, además de los inconvenientes señalados para el acetato de celulosa, presenta el añadido de tener un caudal de permeado por unidad de superficie más bajo (Fariñas, 1999).

### *Poliámidas aromáticas*

Dentro de este apartado existen dos polímeros básicos muy similares entre sí desde el punto de vista químico y, por tanto, con características de resistencia química parecidas. Dichos polímeros son:

- A. Poliamida aromática lineal.
- B. Poliamida aromática con entrecruzamientos

Este polímero se emplea para construir membranas integrales tanto tubulares como planas. Las membranas de poliamida, presentan un mayor rechazo de sales y un mayor rango de operación en cuanto al pH debido a su estabilidad química, así como una menor presión de trabajo en comparación con las membranas a base de acetato de celulosa, siendo las más efectiva la poliamida aromática entrecruzado.

La desventaja que presenta las membranas de poliamida aromática, es su sensibilidad frente a los oxidantes así como su alto costo. Por otra parte las membranas de poliamida aromática con entrecruzamientos por su misma estructura presentan altos índices de ensuciamiento y desarrollos biológicos.

### *Políeter-urea*

Las membranas con esta formulación son siempre compuestas de capa fina. Este tipo de membranas contiene un exceso de grupos amina, lo que les confiere una naturaleza fuertemente catiónica (Fariñas, 1999).

### *Poliacrilonitrilo*

Las membranas fabricadas con este polímero se comportan muy bien ante los disolventes orgánicos y el El rechazo de sustancias orgánicas que presenta también es muy bueno; sin embargo, desde el punto de vista del rechazo de sales minerales o de flujo de permeado, son mucho menos efectivas que las fabricadas con poliamidas aromáticas (Fariñas, 1999).

### *Polibencimidazola*

Las membranas fabricadas con este polímero presentan excelente resistencia tanto a pH extremos como a diferentes productos químicos, lo que permite aplicarlas en la galvanoplastia y otros procesos industriales (Fariñas 1999).

### *Polipiperacidamidas*

Estas membranas son mucho más resistentes al cloro y a otros oxidantes que las poliamida y poliurea. No obstante que presentan un elevado rechazo a iones divalentes, el rechazo de iones monovalentes es mucho menor, por lo que sólo pueden usarse para casos especiales (Fariñas, 1999).

### *Polifurano sulfonado*

Estas membranas producen los máximos rechazos conocidos tanto a sales como a solventes orgánicos de entre todas las membranas de ósmosis inversa disponibles en el mercado; sin embargo, son extraordinariamente sensibles a la oxidación a tal grado que el propio oxígeno del aire que se pueda disolver en la solución de aporte las destruye, lo que limita considerablemente su utilización (Fariñas, 1999).

### *Polisulfona sulfonada*

Se ha pensado que la polisulfona sulfonada podría ser el polímero ideal que aglutinase las ventajas de las membranas de poliamida con la resistencia al cloro libre y otros oxidantes fuertes.

Para conseguir que las membranas de este polímero presenten flujos de permeado adecuados y rechazo de sales correctos, es necesario alcanzar un determinado contenido de grupos sulfónicos, lo que por el momento, esta resultando difícil de lograr (Fariñas, 1999).

### **Membranas inorgánicas**

Dos limitaciones importantes de las membranas inorgánicas reducen su campo de aplicación: su estabilidad química y la resistencia a la temperatura. La búsqueda de soluciones a estos dos problemas ha desembocado en la utilización de materiales inorgánicos para su fabricación, entre los que destacan cuatro grandes grupos de membranas inorgánicas que son: cerámicas, vidrios, fosfacenos y carbonos (Fariñas, 1999)

#### *Cerámicas*

Las membranas cerámicas son, hasta el momento, las más investigadas. De entre los distintos productos cerámicos, el más utilizado para la fabricación de membranas ha sido la alúmina ( $Al_2O_3$ ) en sus distintas variedades (Fariñas, 1999).

Partiendo de un compuesto orgánico de aluminio, controlando la formación del gel y variando tanto las condiciones de precipitación como las de calcinación, se puede modificar el tamaño de poro (Fariñas, 1999).

#### *Vidrios*

Utilizando como materias primas, en proporciones adecuadas, cuarzo, ácido bórico y carbonato sódico, a los que se les suele añadir óxido potásico, cálcico y alúmina para aumentar su resistencia a los álcalis, y controlando durante la fusión tanto el régimen de temperaturas como su duración, se obtiene una mezcla de dos fases una de vidrio de silicio casi pura y otra de ácido bórico rica en borato sódico (Fariñas, 1999)

Tratando dicho vidrio con ácido se disuelve la fase rica en borato sódico, quedando un vidrio con estructura porosa. Variando los parámetros de fabricación puede controlarse el tamaño de poros obtenidos (Fariñas, 1999).

Con esta técnica pueden fabricarse membranas planas, tubulares o capilares; sin embargo, tanto las membranas cerámicas como las de vidrio presentan el inconveniente de su fragilidad y su escasa resistencia a las vibraciones (Fariñas, 1999)

#### *Fosfacenos*

Las membranas fabricadas con este polímero pueden soportar temperaturas de hasta

250°C en presencia de disolventes o ácidos y bases fuertes (Fariñas, 1999).

### *Carbonos*

Las membranas de esta naturaleza presentan habitualmente una estructura compuesta. El lecho de soporte suele ser de carbono sintetizado y la capa filtrante de óxidos metálicos a base de zirconio ( $ZrO_2$ ). Las membranas de este tipo pueden soportar valores extremos de pH (0-14) y temperaturas de hasta 300°C (Fariñas, 1999).

El desarrollo de las membranas inorgánicas acaba de comenzar, por lo que en la actualidad sólo se dispone de membranas inorgánicas para microfiltración y ultrafiltración, no existe en el mercado ninguna membrana de este tipo para ósmosis inversa.

### **3.5 Módulos**

Para utilizar industrialmente las membranas con el fin de que se puedan soportar las diferentes presiones de trabajo, deben colocarse de una determinada manera adoptando distintas formas o configuraciones (Fariñas, 1999).

La palabra módulo, en esta tecnología, deriva de modular, ya que la capacidad de producción de una planta de estas características se consigue instalando en paralelo y/o serie varias unidades elementales de producción o módulos, como se explica en el siguiente apartado con mayor detalle. Por tanto, módulo es la agrupación de membranas, con una configuración determinada, que forma una unidad elemental de producción.

Los objetivos que persiguen los distintos fabricantes de ósmosis inversa son múltiples:

- Obtener el máximo rendimiento de las membranas.
- Conseguir un sistema lo más compacto posible.
- Minimizar los efectos de polarización de las membranas.
- Facilitar la sustitución de las membranas deterioradas.
- Mejorar la limpieza de las membranas sucias.

Como en algunos casos los objetivos son contrapuestos, cada fabricante adopta la solución técnica que hace más competitivo su producto. Existen cuatro tipos de módulos disponibles para la desalación por medio de ósmosis inversa son cuatro: de placas, tubulares, espirales y de fibra hueca.

#### **3.5.1 Módulos de placas**

El de placa es el tipo de módulo más sencillo y el primero que se utilizó. Está constituido por una lámina que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte de la membrana y le confiere rigidez y resistencia. Las superficies de estas membranas son pequeñas, por lo que para aumentar la producción se colocan unas encima de otras, constituyendo una especie de pilas o columnas de membranas (Medina, 2000).

El módulo se obtiene apilando paquetes formados por espaciador-membrana-placa porosa-membrana tal como se muestra en la figura 3.12. El conjunto así formado se comprime mediante un sistema de prensas, de manera que pueda soportar la presión de trabajo. La separación del flujo de permeado y rechazo se logra mediante juntas elásticas colocadas en los extremos (Fariñas, 1999).

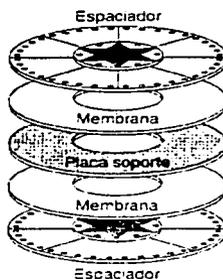


Figura 3.12. Membranas, espaciadores y placas porosas de un módulo de placas (Fariñas, 1999).

La figura 3.13 muestra de manera esquemática cómo se distribuyen los flujos en cada paquete; como se puede ver, la función de los espaciadores es separar las capa activas de las membranas consecutivas, distribuir de manera uniforme la solución a tratar, recoger el rechazo e impedir la formación de caminos preferenciales.

De la misma forma que las membranas son las responsables de separar el permeado de la solución de aporte, las placas porosas dan resistencia mecánica a la membrana recogen el permeado de forma uniforme (Fariñas, 1999).

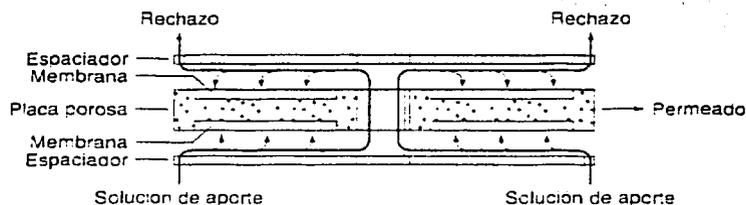


Figura 3.13. Distribución de flujos en un módulo de placas (Fariñas, 1999).

El principal inconveniente de este tipo de membranas es su pequeña capacidad productiva, por lo que para utilizarlas en instalaciones de tamaño medio se requiere de numerosas pilas, que resultan voluminosas, pesadas e incómodas para operar y que encarecen su costo enormemente (Medina, 2000).

Su principal ventaja es que la separación de las membranas, de 1 a 3 mm, es amplia, por lo que se obstruyen menos que otras y además en caso de ensuciamiento se limpian fácilmente con aire y agua, o en caso de ensuciamiento persistente se pueden desmontar las pilas, por lo que su mayor aplicación es en el tratamiento de aguas residuales o con una elevada carga orgánica (Medina, 2000).

### 3.5.2 Módulos tubulares

Representan una alternativa a los anteriores, buscando conseguir una mayor superficie unitaria, pero sin renunciar a las ventajas de dificultad de ensuciamiento y fácil limpieza (Medina, 2000)

La membrana, generalmente de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, va alojada en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presión del proceso. En algunos casos se colocan varias membranas en el interior de un tubo de 1.5 a 2" de diámetro. El tubo va provisto de los orificios necesarios para entrada y salida de los flujo que intervienen en el proceso (Medina, 2000).

El agua alimenta a la membrana por su parte interior y el permeado se obtiene por la parte exterior de la misma, como se muestra en la figura 3.14. Para aumentar su capacidad se colocan varios tubos en paralelo, pero aun en estos casos, resulta pequeña.

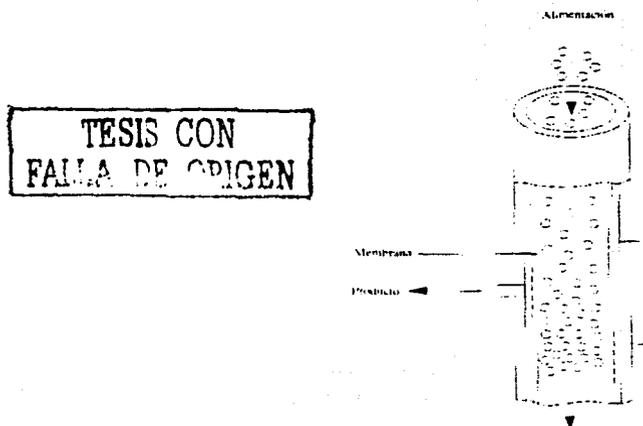


Figura 3.14. Membrana tubular (Medina, 2000).

Esta configuración suele utilizarse para el tratamiento de líquidos cargados (aguas residuales, zumos etc.), se colocan, a veces, en el interior de los tubos, dispositivos especiales destinados a producir altas turbulencias que aseguran elevadas velocidades de circulación sobre la superficie de las membranas que impidan la deposición de las distintas sustancias en suspensión existentes en el líquido a tratar (Fariñas, 1999).

### 3.5.3 Módulos espirales

Están formados por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el permeado (Mediana, 2000).

Como se muestra en la figura 3.15, cada paquete consta de una lámina rectangular de una membrana semipermeable doblada a la mitad de forma que la capa activa quede en su exterior. Entre las dos mitades se coloca un tejido provisto de diminutos canales para recoger el permeado que atraviese la membrana y conducirlo hacia el tubo central donde se recoge (Fariñas, 1999).

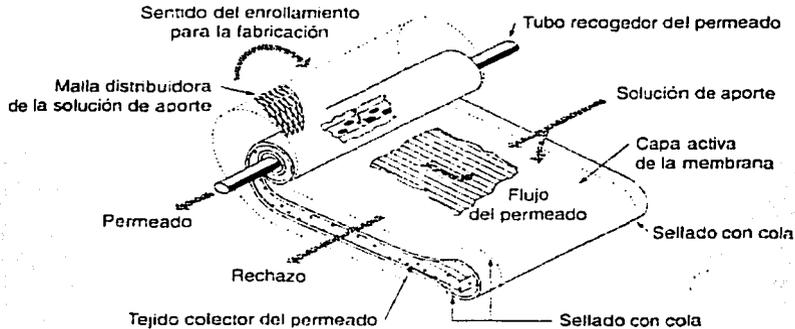


Figura 3.15. Módulo espiral de una hoja (Fariñas, 1999).

Encima de la capa activa de la membrana se coloca una malla provista de canales de distribución para repartir homogéneamente la solución de aporte sobre toda la superficie de la membrana, su forma cuadrículada garantiza un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce la posibilidad de obstrucción por elementos extraño.

Para conseguir la separación entre el flujo de la solución de aporte y el permeado, se colocan, en los laterales de la lámina, cordones de pegamento entre el tejido colector del permeado y las membranas, de forma que penetre totalmente los tejidos quedando estos perfectamente sellados.

Los laterales del tejido colector del permeado se pegan de la misma manera al tubo central que es de material plástico y va provisto de orificios.

El paquete así formado se enrolla alrededor del tubo central, como se muestra en la figura 3.16 dando lugar a un cilindro al que se le colocan en sus extremos dos dispositivos

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

plásticos para evitar su deformación, tras lo cual se recubre el conjunto con una capa de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio para darle rigidez y resistencia mecánica necesarias (Fariñas, 1999).

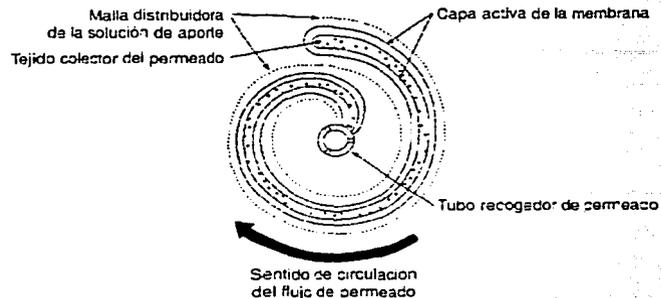


Figura 3.16. Disposición transversal de un módulo espiral (Fariñas, 1999).

Si se utilizase un sólo paquete de membranas para fabricar los módulos de gran diámetro, se requerirían hojas muy largas, lo que originaría problemas hidráulicos en la recolección del permeado y, por tanto, en el reparto de la solución a tratar (Fariñas, 1999).

Por este motivo, los módulos suelen fabricarse enrollando varios paquetes de membranas como los descritos pero de longitud reducida. Un módulo comercial de 8" suele llevar entre 16 o 18 paquetes (Fariñas, 1999).

Los módulos espirales se interconectan en serie dentro de un tubo destinado a soportar la presión de trabajo, como se muestra en la figura 3.17. En el interior de cada tubo pueden instalarse hasta 7 módulos, alcanzándose longitudes totales superiores a los 7 metros (Fariñas, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

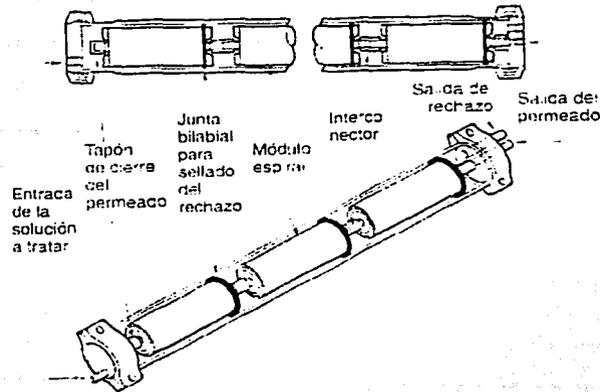


Figura 3.17. Forma de interconexión de los módulos espirales en su interior (Fariñas, 1999).

La solución de aporte, a medida que va atravesando los distintos módulos instalados en serie se va concentrando, siendo evacuada del tubo de presión por el extremo opuesto al de entrada (Fariñas, 1999).

### 3.5.4 Módulos de fibra hueca

La fibra hueca está constituida por un haz de millones de tubos capilares del tamaño de un cabello humano. Las primeras fibras de este tipo que se desarrollaron eran de acetato de celulosa y producían un caudal muy pequeño. Sin embargo, se consideró que podrían ser útiles para la desalación puesto que eran muy delgadas y su fabricación muy barata (Medina, 2000).

Al comprobarse que la resistencia de la fibra no dependía tanto del espesor como de la relación entre el diámetro exterior e interior, se pensó que reduciendo su tamaño se podía conseguir una pared extremadamente delgada, que permitiera aumentar su caudal (Medina, 2000).

Las membranas de fibra hueca van dobladas en forma de "U" y colocadas paralelamente a un tubo central. Las membranas se fijan a ambos extremos mediante una resina epoxi para dar estabilidad al haz formado. La figura 3.18 muestra la disposición de las fibras y la circulación de los distintos flujos en un módulo de este tipo. El agua a presión se aplica a la membrana desde el exterior del capilar y la pared de la fibra actúa como lámina o membrana separadora reteniendo las sales, mientras que en el interior circula el permeado que ha atravesado la membrana. El rechazo se desplaza de una manera radial

hacia los bordes del tubo siendo recogido mediante un colector para su evacuación.

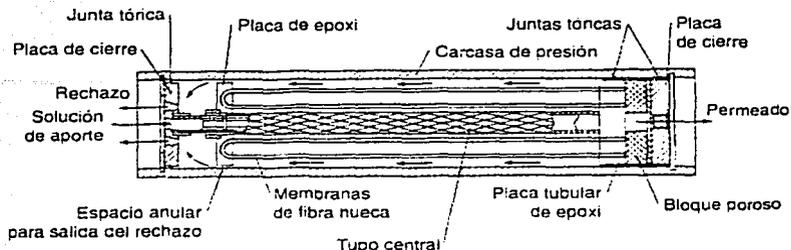


Figura 3.18. Esquema de un módulo de fibra hueca (Fariñas, 1999).

Cuando la solución a tratar entra en contacto con la superficie exterior de la fibra donde se encuentra la capa activa, una parte de la misma (el permeado) atraviesa la fibra moviéndose por su interior hueco hasta el extremo abierto (Fariñas, 1999).

Los finales abiertos de las fibras huecas están embebidos en una masa de resina epoxi, constituyendo uno de los extremos del haz. Esta masa, una vez mecanizada para abrir las fibras, como se muestra en la figura 3.19, se conoce como placa tubular.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

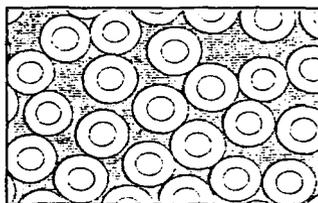


Figura 3.19. Micrografía de la placa tubular (Fariñas, 1999).

Cuando el permeado abandona el haz de la placa tubular, pasa a través de un bloque poroso. El bloque poroso tiene la función de lograr un correcto reparto hidráulico en la recolección del permeado y, por tanto, también en la distribución de la solución de aporte (Fariñas, 1999).

El rechazo se mueve hacia la placa de epoxi situada en el otro extremo del haz de fibras, saliendo al exterior para atravesar el espacio anular entre ésta y la carcasa exterior. Una junta tórica situada en la placa tubular impide que el permeado se mezcle con el rechazo (Fariñas, 1999).



### 3.6 Unidad de ósmosis inversa

No obstante que dada una configuración de membranas (espiral, fibra hueca etc.) existen módulos con tamaños diferentes y, por tanto, con distintas producciones, el caudal de permeado necesario raramente coincide con lo que puede suministrar un módulo, sino que suele ser bastante superior. Quiere decir que para alcanzar el caudal deseado es necesario agrupar varios módulos (Fariñas, 1999).

Adicionalmente, para asegurar una cierta velocidad de flujo a través de la superficie de la membrana, reduciendo así el fenómeno de polarización y los riesgos de precipitación y atascamiento, es absolutamente imprescindible mantener un caudal mínimo de rechazo en cada módulo. Asimismo, para no aumentar excesivamente su pérdida de carga, lo cual produciría deformaciones en su interior, es también necesario limitar el caudal máximo de rechazo (Fariñas, 1999).

Si la conversión global con que se desea que trabaje el sistema supera la máxima admisible por cada módulo, es necesario agruparlos de forma que se respeten sus condiciones límites de caudal de rechazo. Así pues, las características de cada módulo obligan a agruparlos de una determinada forma para obtener la calidad y cantidad de permeado deseado.

Dependiendo del objetivo los módulos se pueden agrupar de dos formas: en paralelo y en serie.

El objetivo principal de la colocación de membranas en serie es obtener una cierta calidad en el producto, haciéndolo pasar por varios módulos colocados en serie.

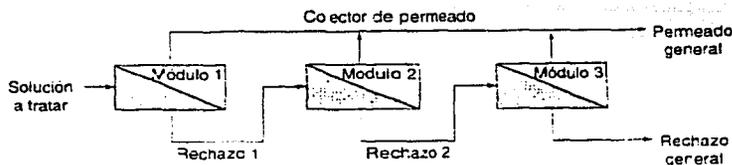


Figura 3.21. Agrupación de módulos en serie (Fariñas, 1999).

En el caso de la colocación de los módulos en paralelo el objetivo es obtener una mayor cantidad de producto al dividir el caudal de alimentación en "n" membranas de las cuales se obtiene una mayor cantidad de producto con una calidad menor que la que se obtendría de un arreglo en serie con el mismos número de módulos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

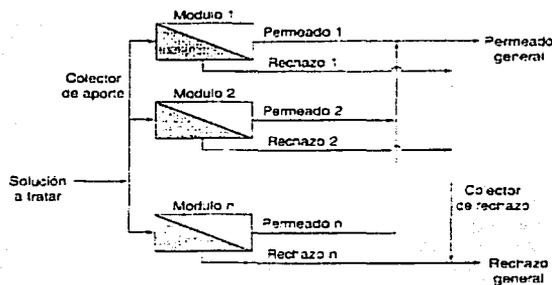


Figura 3.22. Agrupación de módulos en paralelo (Fariñas, 1999).

Sin embargo, en la mayoría de las instalaciones se utiliza una o más combinaciones de este tipo de agrupamientos para obtener la calidad y cantidad del agua deseada.

### 3.6.1 Definiciones

#### *Etapa*

Se trata de un conjunto de tubos a presión o de membranas colocadas en paralelo y alimentadas por una bomba (Medina, 2000).

#### *Paso*

Es el conjunto de tubos a presión o membranas que siendo alimentadas con los caudales de agua que salen de las membranas de la primera etapa de ósmosis precisan de otra fuente de energía distinta para recuperar de nuevo el caudal.

### 3.6.2 Etapas

#### *Etapa simple*

Es un conjunto de tubos a presión colocados en paralelo, que son alimentados desde una bomba. Este tipo de estructura, demasiado ineficiente, sólo se usa en instalaciones piloto o experimentales, o en la industria para extracción de jugos u otros líquidos o sólidos de gran valor. También en algunas instalaciones de mar se utiliza este tipo de arreglo por su bajo porcentaje de recuperación (Medina, 2000).

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

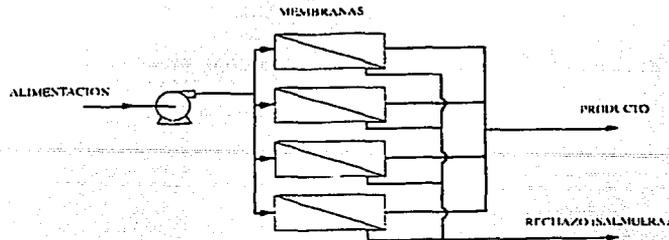


Figura 3.23. Instalación de etapa simple (Medina, 2000).

### Rechazo en serie

En esta agrupación el rechazo de la primera etapa alimentara la segunda y el rechazo de esta a la tercera, tal como se muestra en la figura 3.24.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

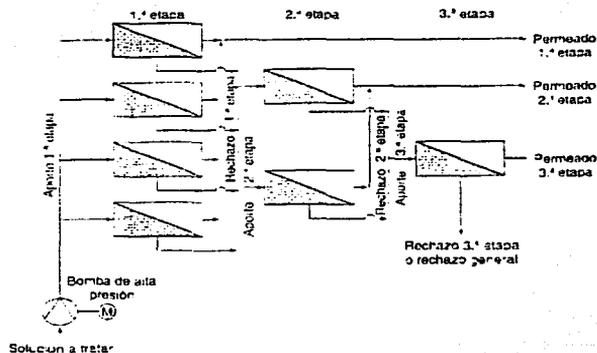


Figura 3.24. Instalación de etapas con rechazo en serie (Fariñas, 1999).

En el caso de desalación de aguas salobres se debe de considera que los módulos tiene una recuperación de alrededor del 50% por etapa, respetando las condiciones de flujo de rechazo impuestas por los módulos (Fariñas, 1999).

No suelen agruparse más de tres etapas en serie por que la producción de cada etapa adicional por encima de la tercera, sería muy reducida y resultaría antieconómica (Fariñas, 1999).

## Recirculación del rechazo

Utilizando una etapa solamente se puede superar el porcentaje máximo de recuperación del 50% establecido para la misma. Se recurre para ello a recircular todo o parte del rechazo mezclándolo con la solución de aporte, tal como se muestra en la figura 3.25. Con este procedimiento pueden alcanzarse conversiones hasta del 75% y, por tanto, concentraciones en el rechazo cuatro veces superiores a la de la solución de aporte (Fariñas, 1999).

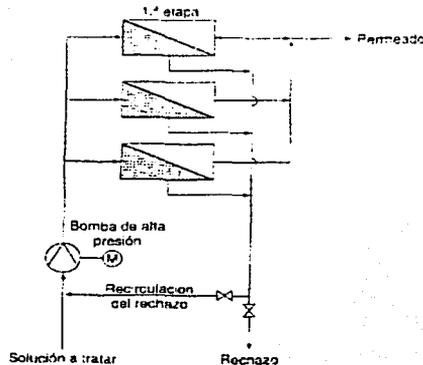


Figura 3.25. Instalación de recirculación del rechazo (Fariñas, 1999).

Esta alternativa presenta un consumo de energía y una salinidad del permeado mayores que la de instalar dos etapas con rechazo en serie, por lo que sólo se utiliza cuando se quiere concentrar la solución de aporte. Si dicha solución presentase altos contenidos de materia en suspensión sería conveniente agrupar las etapas de rechazo en serie, pero manteniendo la recirculación en cada etapa, tal como se muestra en la figura 3.26 (Medina, 2000)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa**

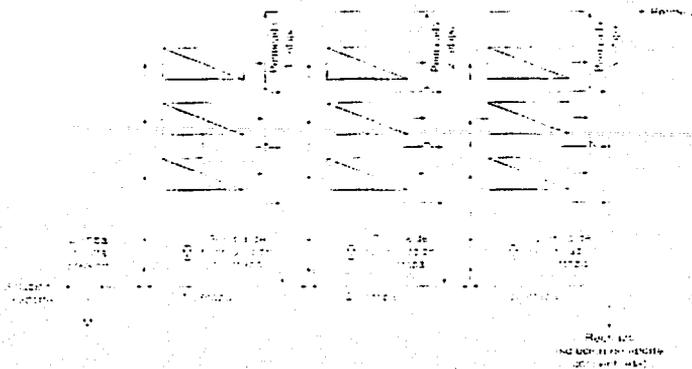


Figura 3.26. Instalación con etapas con rechazo en serie y recirculación (Fariñas, 1999).

**Etapas de producto**

Este tipo de instalación se emplea cuando se quiere mejorar la calidad del agua de producto y para ello se pasa de nuevo por otro conjunto de membranas, utilizando para ello una bomba independiente (Medina, 2000).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

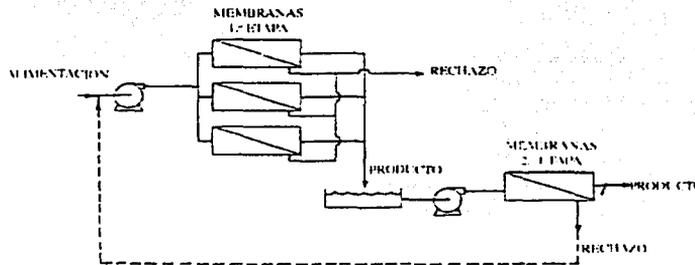


Figura 3.27. Instalación de etapas de producto (Medina, 2000).

Cada vez se utiliza menos; inicialmente se empleaba en instalaciones de agua de mar en el las que era imposible conseguir agua de suficiente calidad con un paso, especialmente en zonas de alta salinidad como los países del Golfo Pérsico. La posterior aparición de membranas de agua de mar con rechazos superiores al 99.3%, que permiten obtener agua potable en un solo paso, han hecho innecesario este tipo de instalaciones (Medina, 2000).

### 3.7 Bombas

Las bombas de alta presión se consideran como el corazón de la planta de ósmosis inversa ya que impulsan la solución a tratar hacia las membranas con la presión requerida (Fariñas, 1999).

Como la ósmosis inversa permite la desalación tanto de aguas salobres como de mar, la presión osmótica que hay que vencer está relacionada con la salinidad del agua a tratar. Las presiones de funcionamiento son muy variables, sobre todo si se tiene en cuenta la gran variedad de membranas existentes y los continuos avances que se están consiguiendo en éstas, que se traducen en la aplicación de presiones cada vez menores (Medina, 2000)

Sin embargo, es aquí donde se consume la mayor parte de la energía del proceso, por lo que la decisión del tipo de bomba a instalar tiene gran importancia. A la hora de seleccionar las bombas hay que tener en cuenta distintos parámetros como rendimiento, inversión necesaria, material requerido, disponibilidad, niveles de ruido, vibraciones etcétera (Fariñas, 1999).

En el proceso de ósmosis inversa se utilizan principalmente dos tipos de bombas: de desplazamiento y centrifugas.

#### 3.7.1 Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas de desplazamiento positivos son poco comunes en las plantas de ósmosis inversa. Sin embargo, en plantas pequeñas o medianas se justifica su utilización, ya que tiene mayor eficiencia que las centrifugas, además de ser muy seguras en su funcionamiento.

Se utilizan principalmente en plantas que requieren trabajar con elevadas presiones, como es el caso de la desalación de agua de mar, ya que en este caso es difícil encontrar otro tipo de bombas que reúnan las dos condiciones exigidas: que bombeen un reducido caudal a una presión elevada (Fariñas, 1999)

Como contrapartida al buen rendimiento hidráulico, los costos de mantenimiento de este tipo de bombas es significativo. A continuación se presenta una descripción de su funcionamiento así como sus rangos de aplicación elaborado por Medina (2000).

#### *Bombas horizontales helicoidales*

Son bombas de desarrollo horizontal en las que el eje o rotor tiene forma de hélice excéntrica que les permite un funcionamiento sin pulsaciones ni turbulencias.

Son autocebadas, rotativas, con sólo dos elementos: rotor y estrator, que les confiere una gran sencillez. El rotor tiene sección circular. Su centro gira dos veces helicoidalmente en el sentido de la excentricidad, alrededor de su eje longitudinal. Por el contrario la sección transversal del estrator describe un movimiento longitudinal de un solo giro. Los diámetros, recorridos, pendientes y excentricidad varían en función de la bomba.

En sección transversal, estrator y rotor se conectan en dos puntos, que vistos axialmente son líneas de contacto.

Cuando el rotor gira, esta simetría determina unas cámaras en tándem y lo mismo ocurre cuando están paradas.

El número de compartimentos cerrados o etapas corresponde al número completo de giros de la sección del estrator. Al moverse el rotor las cámaras giran helicoidalmente en dirección axial.

Los orificios de entrada y salida y el total de la sección transversal del compartimento tiene siempre la misma superficie. Esta es la razón de que tengan un flujo continuo y casi sin pulsaciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

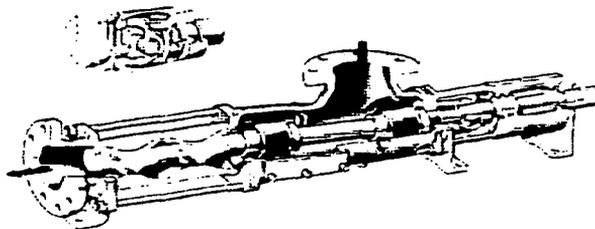


Figura 3.28. Bomba helicoidal (Medina, 2000).

Para altas presiones (70 bares) y capacidades de hasta 14 m<sup>3</sup>/h sus velocidades de funcionamiento son bajas, 800 rpm, mientras que para caudales pequeños (de 1-3 m<sup>3</sup>/h) las velocidades son de 2,000-2,500 rpm.

Aunque pueden tener capacidades de hasta 250 m<sup>3</sup>/h y 80 bares, su mayor aplicación está en caudales y presiones medias, de hasta 40 kg/cm<sup>2</sup>, es decir aguas de salinidades medias y membranas de media presión, incluidas las de acetato de celulosa.

*Bombas de pistones*

Son bombas muy robustas y con una gran eficiencia hidráulica teórica del 90%, tanto para bombas grandes como pequeñas, derivada de su eficiencia volumétrica del 100%. En la práctica la eficiencia es menor: 86-88 por ciento.

Aunque según los fabricantes los caudales pueden variar desde valores tan pequeños como los 3 m<sup>3</sup>/h hasta unos 100 m<sup>3</sup>/h y presiones desde 20 kg/cm<sup>2</sup> y los 80 kg/cm<sup>2</sup> que pueden requerirse en algunas instalaciones de mar, su campo de aplicación esta claramente en las instalaciones medianas y sobre todo pequeñas.

Debido a estos elevados rendimientos se ha intentado su introducción en instalaciones de mayor tamaño, pero los resultados de funcionamiento no son tan favorables, por los mayores problemas mecánicos que presentan.

La abrasión es mayor que en las bombas centrífugas, por lo que con el tiempo disminuye su eficiencia y prácticamente se igualan. Estas circunstancias y las dificultades de fabricación con aceros especiales las ha relegado a un segundo plano en las grandes instalaciones de ósmosis inversa

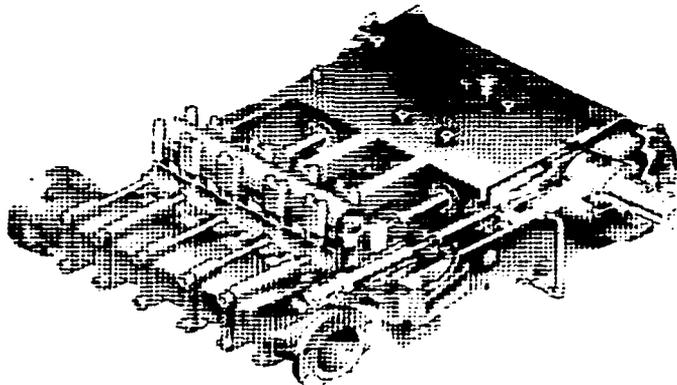


Figura 3.29. Bomba de pistones (Medina, 2000).

En una bomba de desplazamiento positivo, el caudal instantáneo tanto a la entrada como en la descarga es igual a la suma de los caudales aspirados e impulsados en cada momento por cada uno de sus pistones, lo que da lugar a un caudal pulsado.

Las pulsaciones originan vibraciones importantes, por lo que se instalan amortiguadores de vibraciones tanto en la aspiración como en la impulsión.

No pueden tampoco funcionar con la válvula cerrada, por riesgo a que se produzcan sobre presiones que pueden romper la instalación y provocar accidentes, por lo que también necesitan de válvulas de seguridad en la impulsión.

Además, las fluctuaciones de caudal no son buenas para el funcionamiento de las membranas porque dan lugar a variaciones en la velocidad de arrastre sobre la superficie de la membrana y, por tanto, a fenómenos de polarización (Fariñas, 2000).

### 3.7.1 Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga en su concepción más simple consiste en un impulsor con álabes, llamado rodete, que gira alrededor de una carcasa accionado desde el exterior mediante un eje, tal como muestra la figura 3.30.

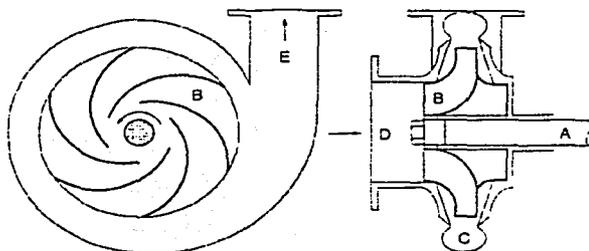


Figura 3.30. Bomba centrífuga (Fariñas, 1999).

La energía de una fuente exterior aplicada al eje A hace girar el impulsor B dentro de la carcasa estacionaria C. Los álabes del impulsor en rotación producen un desenso de la presión de entrada de los mismos, lo que origina que el fluido se mueva hacia ellos desde la tubería de aspiración D. El fluido, debido a la rotación del impulsor, es enviado hacia el exterior de los álabes aumentando su velocidad tangencial.

La velocidad adquirida por el fluido cuando abandona los álabes se transforma en presión cuando pasa por el difusor saliendo a la exterior a través del tubo de descarga E.

Los impulsores pueden ser abiertos, cerrados o semiabiertos. Los abiertos y los semiabiertos se utilizan para impulsar líquidos viscosos. Las bombas de las plantas de ósmosis inversa incorporan rodetes cerrados cuyo rendimiento es mayor que el de los abiertos y semiabiertos (Fariñas, 1999).

En las plantas de ósmosis inversa pueden utilizarse los cuatro tipos de bombas centrífugas siguientes:

- De segmentos
- De cámara partida
- De chorro
- De alta velocidad

#### *Bombas de segmentos*

Reciben este nombre porque cada bomba está formada por un conjunto de "rodajas" o "segmentos" transversales al eje de rotación aprisionados entre dos cabezales extremos mediante tirantes, tal como se muestra en la figura 3.31.

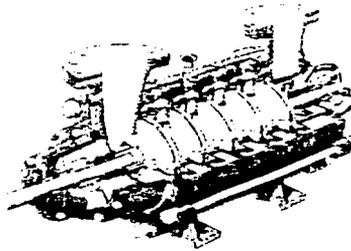


Figura 3.31. Bomba centrífuga de segmentos (Fariñas, 1999).

Las bombas de segmentos se utilizan tanto en plantas pequeñas como en las de gran tamaño, si bien con caudales inferiores a 25 m<sup>3</sup>/h y presiones superiores a los 50 bar su rendimiento decrece tanto que es más aconsejable utilizar bombas de desplazamiento positivo. Por encima de los 300 m<sup>3</sup>/h y presiones superiores a 50 bar se puede obtener un mejor rendimiento con las bombas de cámara partida, por lo que hay que estudiar si el menor costo de energía amortiza en un tiempo razonable la mayor inversión requerida por este tipo de bombas (Fariñas, 1999).

#### *Bombas verticales*

Son bombas centrífugas dispuestas en posición vertical, provista de una serie de rodets parecidos a los de las bombas sumergidas aunque la concepción es distinta. La bomba con sus diferentes rodets va encerrada en un barril sellado y tanto la succión como la impulsión se realizan mediante tuberías colocadas en la parte superior (Medina, 2000).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

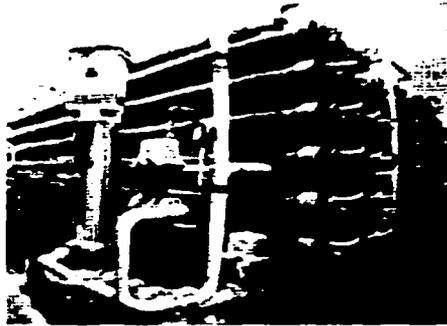


Figura 3.32. Bomba vertical (Medina, 2000).

Sus mayores eficiencias son para caudales elevados, pero a medida que aumenta el caudal y la presión de la bomba requiere de más módulos y por tanto aumenta su longitud, que puede llegar a 3.5 o 4 m. Esto supone que la instalación de este tipo de bombas exige la construcción de pozos o depósitos en donde se aloja la bomba para que tanto la tubería de aspiración como la de succión estén a nivel de suelo, del que sobresale la parte superior de la bomba y el motor (Medina, 2000).

Su mantenimiento resulta complicado puesto que debe de ser extraída del pozo y en consecuencia se requiere de edificios altos o con perforaciones en el techo (Medina, 2000).

#### *Bombas de cámara partida*

Se llaman así porque la carcasa o cámara de presión está partida horizontalmente, tal como se muestra en la figura 3.33.

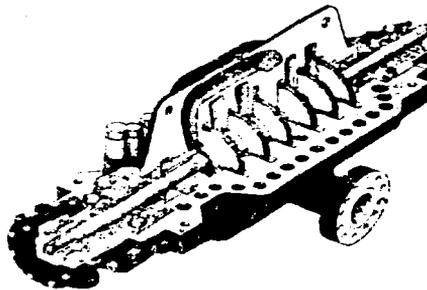


Figura 3.33. Bomba de cámara partida seccionada (Fariñas, 1999).

Al retirar la parte superior quedan al aire todos los componentes de la bomba, que interiormente está formada por una serie de cámaras, cuyo número depende de la presión requerida, en las que giran sendos impulsores distribuidos simétricamente respecto al centro de la bomba y colocados en oposición para asegurar su equilibrio. Son bombas robustas, de gran estanquidad y fácil mantenimiento (Medina, 2000).

Las mayores aplicaciones están en caudales superiores a 200 m<sup>3</sup>/h en bombas y 100 m<sup>3</sup>/h en turbinas, con rendimientos del 80% al 85% en las primeras y del 70 al 80% en las segundas (Medina, 2000).

Su mayor inconveniente lo constituye su precio, pues al no ser un diseño específico de instalaciones desaladoras, incorpora una serie de elementos de seguridad importantes cuando trabaja a muy elevadas presiones y con líquidos calientes, que no resultan necesarios para la ósmosis inversa (Medina, 2000).

#### *Bombas de chorro*

Dentro de los últimos desarrollos que se están realizando en cuanto a las bombas centrífugas de alta presión, que tiene el propósito de facilitar el mantenimiento y conseguir una bomba poco susceptible a averías, puede citarse la conocida como bomba de chorro o Pitot (Medina, 2000).

Tal como se muestra en la figura 3.34, el fluido a impulsar entra por el colector de toma y pasa al rotor a través de unos conductos radiales. Dentro del rotor, debido al giro de éste, aumenta su velocidad la cual se transforma en presión en un tubo de Pitot que permanece estacionario en el interior, saliendo al exterior a través del brazo del mismo y el colector de descarga (Fariñas, 1999).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

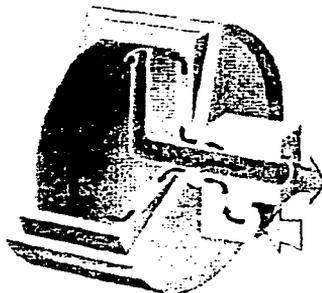


Figura 3.34. Recorrido que realiza el fluido en una bomba de chorro (Fariñas, 1999).

Se trata de una bomba simple de diseño compacto y poco ruidosa, de funcionamiento estable, que no precisa de amortiguadores de pulsaciones ni válvulas de seguridad. No gripa cuando gira en vacío por pérdida de succión o si funciona con la válvula de descarga cerrada. Sin embargo, necesita de un caudal pequeño en by-pass, cuando opera a caudal muy bajo, para evitar su calentamiento o fallos en los cierres (Medina, 2000).

Dado su pequeño tamaño, funciona a velocidades elevadas, por encima de 4,000 rpm y su eficiencia máxima es de 62%, con valores más frecuentes de uso entre 50 y 60%. Su capacidad máxima es de 100 m<sup>3</sup>/h y presiones de 45 a 75 kg/cm<sup>2</sup> (Medina, 2000).

La simplicidad de estas bombas, de una etapa sin espacios muertos, holguras o anillos de desgaste, reduce el mantenimiento que se limita al cambio del sello mecánico (Medina, 2000).

#### *Bombas de alta velocidad*

Este tipo de bombas posee uno o dos rodetes como máximo, por lo que la alta presión necesaria en la descarga se consigue haciéndolos girar a elevadas revoluciones, llegando a superar las 15,000 rpm. El aumento de revoluciones se consigue habitualmente mediante un multiplicador de engranajes (Fariñas 1999).

La figura 3.35 muestra la vista en sección de una bomba de este tipo. Estas bombas presentan dos inconvenientes para su utilización en plantas de ósmosis inversa. El primero es su bajo rendimiento hidráulico en comparación con las de segmentos y las de cámara partida y el segundo consiste en que la alta velocidad con que trabajan complica el mantenimiento. Por lo regular estas bombas sólo se utilizan en situaciones especiales

y sobre todo combinadas con turbinas de recuperación de energía (Fariñas, 1999).

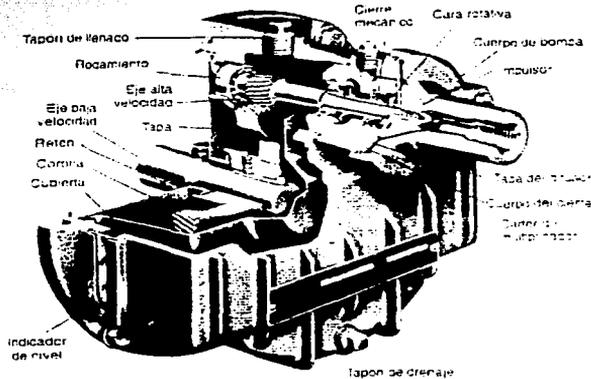


Figura 3.35. Vista en sección de una bomba de alta velocidad (Fariñas, 1999).

Las bombas centrífugas, especialmente las de segmentos y de cámara partida, se utilizan mucho más frecuentemente que las de desplazamiento positivo ya que presentan, una serie de ventajas entre las que se pueden citar:

- Ausencia de pulsaciones de presión y de caudal.
- Mayor operatividad.
- Menor mantenimiento.

Cada tipo de bomba considerado tiene ventajas y desventajas para su utilización en una planta de ósmosis inversa, tal como se recoge en la tabla 3.1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Tabla 3.1 Comparación entre distintos tipos de bombas (Fariñas, 1999)

Tipo de bomba	Ventajas	Desventajas
Desplazamiento positivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto rendimiento hidráulico (superior al 90%)</li> <li>• Bajo consumo de energía</li> <li>• Se adaptan a la compactación y al ensuciamiento de las membranas, aumentando la presión de impulsión sin intervención de ningún sistema de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministran un caudal y una presión pulsados.</li> <li>• Requieren de un cambio frecuente en empaquetaduras y émbolos o pistones.</li> <li>• Pueden llegar a la membrana partículas procedentes de las empaquetaduras.</li> <li>• Elevado costo de mantenimiento.</li> <li>• Vibraciones y alto nivel sonoro.</li> </ul>
Segmentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El rendimiento hidráulico rara vez supera el 80%</li> <li>• Es preciso desmontar las tuberías y toda la bomba para inspeccionar o cambiar un rodete.</li> <li>• Riesgo de corrosión en las superficies de contacto entre segmentos.</li> </ul>
Cámara partida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen rendimiento hidráulico (alrededor del 80%).</li> <li>• Bombas muy robustas.</li> <li>• Fácilmente desmontables, sin desconectar las tuberías</li> <li>• Se accede con facilidad a todas las piezas internas.</li> <li>• Fáciles de mantener.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de inversión elevados.</li> <li>• Repuestos caros.</li> </ul>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.8 Equipos de recuperación de energía

La incorporación de equipos de recuperación de energía es habitual en las instalaciones de agua de mar, en las que al alcanzarse recuperaciones inferiores al 50%, existe un potencial de energía muy importante para recuperar el rechazo.

Teniendo en cuenta las eficiencias de los equipos de recuperación, son factibles ahorros del 30 al 35% de la potencia. Esto supone además reducir la potencia de los motores y por tanto menores gastos de inversión.

En las instalaciones de agua salobre la rentabilidad de las turbinas es más dudosa y debe de analizarse profundamente antes de tomar la decisión.

Con las recuperaciones de producto en estos casos, del 70% y superiores, tan sólo pueden ser aprovechados en las turbinas de un 10 a un 25% del caudal de alimentación. Teniendo en cuenta que las turbinas de menores capacidades tienen también rendimientos menores, finalmente no se consigue alcanzar en muchos casos sino recuperaciones energéticas del 5 al 7 por ciento.

No parecen pues aconsejables estos equipos en instalaciones pequeñas, en los que se agregan complicaciones de manejo y funcionamiento, para los que muchas veces no se disponen de los medios necesarios.

Una vez decidida la instalación de un sistema de recuperación de energía es necesario utilizar el equipo adecuado a las características de la instalación.

Los equipos más utilizados para la recuperación de energía en las instalaciones de ósmosis inversa son:

- Turbobombas compactas.
- Bombas invertidas.
- Turbinas Pelton.
- Turbo-Charger.
- Bomba-turbina Pelton integrada.

#### *Turbinas compactas*

Fueron quizá las primeras utilizadas en este tipo de instalaciones y consisten en una bomba centrífuga de alta presión y una turbina, ambas multi etapas integradas en una carcasa única.

Los colectores de aspiración e impulsión de cada una de ellas están conectados directamente entre sí. El eje de ambas unidades es único y se conecta con el eje del motor de impulsión, lo que simplifica bastante el sistema de acoplamiento, aunque para incrementar la velocidad del motor se necesita de un multiplicador.

Son unidades muy compactas y por tanto de tamaño reducido, pero muy revolucionadas (6,000 rpm), por lo que pueden presentar problemas de mantenimiento y averías importantes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

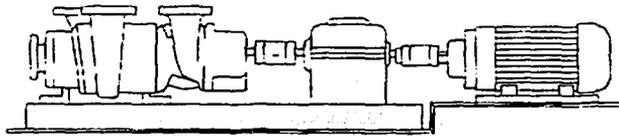


Figura 3.36. Acoplamiento turbobomba compacta y motor (Medina, 2000).

Sus capacidades son asimismo limitadas, por lo que sólo se utilizan para módulos de tamaño mediano.

Hoy en día no se están utilizando tanto como prometían en un principio, habiéndose sustituido por otros elementos que ofrecen mayores garantías en la mayoría de los casos. Ocupan, sin embargo, menos espacio que las otras soluciones (Medina, 2000).

#### *Bombas invertidas*

Se trata de bombas centrífugas multi etapas que se hacen funcionar en sentido inverso.

Pueden utilizarse por tanto bombas de cámara partida o de segmentos, siendo aconsejable que bomba y turbina sean del mismo tipo.

La entrada de agua a presión en la turbina se produce por su colector de impulsión, por lo que la energía que recupera hace girar el eje de la bomba en sentido contrario.

La bomba invertida se puede conectar directamente tanto al eje de la bomba de impulsión principal como al motor. En éste último caso el eje del motor se construye con doble eje que se hace sobresalir por ambos extremos.

Sin embargo, cuando los equipos son de cierto tamaño, es aconsejable la colocación del motor en el centro de ambas bombas, pues el otro tipo de conexión obliga al eje de la

bomba a soportar además las tensiones de las turbinas.

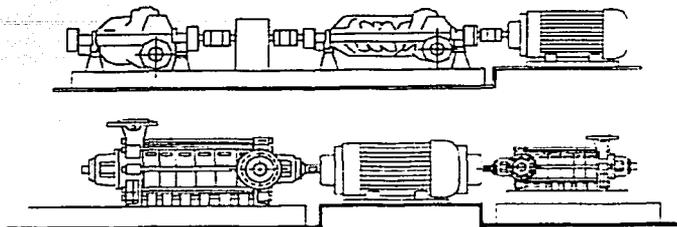


Figura 3.37. Formas de acoplamiento de turbobombas multietapa acopladas al motor (Medina, 2000).

La bomba y turbina son similares (72-86%), únicamente diferenciadas en los porcentajes inherentes al tamaño de las mismas (Medina, 2000).

#### *Turbinas Pelton*

Consisten en una rueda giratoria provista de cubos o álabes en su circunferencia, colocada en el interior de una carcasa.

El agua a presión golpea los cubos y hace girar el eje de la turbina, que se conecta directamente con el motor.

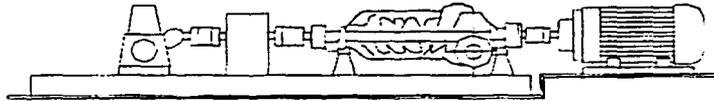
No se suele acoplar directamente a la bomba, por que generalmente las velocidades de ambos ejes en el punto de máxima eficiencia son diferentes.

Recuperan por tanto energía mecánica que se utiliza generalmente para ayudar al motor de la turbobomba y reducir la potencia.

Se ha utilizado desde hace tiempo, en general en instalaciones de tipo pequeño.

Algunos problemas que se presentaron inicialmente con la precipitación de sales dentro de la turbina, y el desgaste de los álabes a causa de las elevadas presiones que disminuían su eficiencia, limitó bastante su uso.

Finalmente, superados los problemas técnicos, empiezan a ser utilizadas en instalaciones de mayor capacidad.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 3.38. Formas de acoplamiento bomba-turbina Pelton-motor (Medina, 2000).

Son los equipos de recuperación de mayor eficiencia puesto que se puede alcanzar hasta un 90%, sin embargo, su instalación es exigente, pues en caso contrario la eficiencia disminuye sensiblemente.

En este sentido el principal aspecto a solucionar es la construcción de salida libre, que no represente ningún tipo de contrapresiones.

La mejor solución consiste en la construcción de una arqueta grande y bastante profunda conectada a un colector amplio y de salida libre (Medina, 2000).

#### *Turbo charger*

Es un equipo de reciente introducción en el mercado y que en cierto modo se parece a la turbobomba integrada citada anteriormente, ya que dentro de una sola carcasa reúne ambos elementos de impulsión.

Son equipos de pequeñas dimensiones que permiten su empleo en distintas partes del circuito hidráulico, lo que permite su aplicación tanto a las bombas de alta presión como a las de media o baja en instalaciones de agua salobre.

Son muy compactas y, al igual que las citadas en primer lugar, muy revolucionadas.

Hasta el momento no se tiene conocimiento de su empleo en instalaciones de agua de mar de una cierta entidad aunque no hay ninguna razón técnica que se oponga a ello (Medina, 2000).

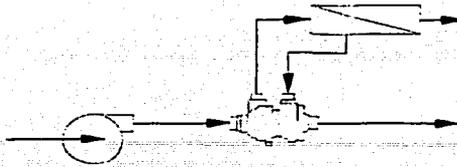


Figura 3.39. Acoplamiento del Turbo-charger.

#### *Bomba-turbina Pelton monoblock (integrada)*

Siguiendo la idea inicial de la turbobomba integrada ya citada, trata de integrar sobre un eje único una bomba multicelular de cámara partida y una turbina Pelton, aprovechando las ventajas de uno y otro equipo.

Al contrario de las bombas integradas, la velocidad de este conjunto se ha reducido a la de 3,000 rpm reduciendo los riesgos de avería que tenían los anteriores más revolucionados. Los cuerpos de ambos equipos son independientes y no tienen por tanto una carcasa en común.

Su aparición en el mercado es bastante reciente por lo que no se dispone de muchas referencias. Sin embargo, parecen equipos bastante fiables que ocupan menos espacio que el conjunto bomba-turbina Pelton, independientes y se sitúan de un sólo lado del motor, que no necesita eje doble. Lo importante es que puedan aunar las eficiencias de ambas máquinas sin pérdidas de eficiencia en los elementos (Medina, 2000).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **4 Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa**

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

Para diseñar una sistema de ósmosis inversa, el primer paso es conocer la composición del agua de alimentación. Ya que la utilización de uno u otro tipo de elementos en el sistema de ósmosis inversa depende de las características del agua a tratar, para que la operación del sistema sea eficiente y confiable.

En este capítulo se presenta la forma en que debe de realizarse el análisis del agua y los aspectos que deben de tomarse en cuenta en su caracterización, así como los principales criterios de decisión para la selección de los distintos tipos de elementos que componen un sistema de ósmosis inversa.

Finalmente se engloban todos estos datos con el diseño de un sistema de ósmosis inversa.

### **4.1 Análisis de la calidad y aportación de agua salada**

El análisis del agua de alimentación para un a planta de ósmosis inversa debe centrarse en la calidad y no en la cantidad del agua a desalar. El parámetro de calidad más importante en el diseño de este tipo de plantas es sin duda alguna el de los sólidos disueltos totales.

A través de los sólidos disueltos totales se determina la salinidad del agua a tratar y el tipo de membrana a utilizar. Sin embargo, es necesario determinar las características físicas y químicas del agua, ya que a través de éstas podremos saber las condiciones de operación a las cuales deberá de trabajar la planta de ósmosis inversa y qué tipo de pretratamiento se le debe dar al agua.

#### **4.1.1 Muestreo**

Para determinar las características físicas y químicas del agua es necesario realizar muestreos en los sitios donde se piensa que se puede instalar la planta.

El muestreo se define como un pequeño volumen del agua que representa el total de donde se toma. Por ello es muy importante hacer una elección cuidadosa del sitio así

como el tipo de muestra que se toma. Se recomienda considerar los sitios en donde se cre que se tiene la menor calidad.

Existen dos tipos de muestras, simples y compuestas:

- **Muestras simples:** Son muestras aisladas que se toman en diversos sitios o en el mismo pero a diferentes tiempos y se analizan por separado.
- **Muestras compuestas:** Están formadas por varias muestras simples en un sólo volumen para analizar. Las muestras compuestas se preparan en el laboratorio y son proporcionales al gasto en el momento de muestreo.

Las primeras se utilizan para saber si en un determinado instante se tiene alguna variación en alguno de los parámetros que pueda afectar el funcionamiento de la planta. El diseño de este tipo de plantas requiere la obtención de muestras simples y compuestas; las compuestas se utilizan para conocer la calidad que en promedio tiene el agua y con la cual se hará el diseño.

#### **4.1.2 Caracterización**

El agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos e inorgánicos que deben de ser controlados dentro de determinados límites, para que pueda aplicarse directamente a unos elementos sensibles como las membranas de ósmosis inversa sin que se produzca un deterioro importante en las mismas (Medina, 2000).

Deben determinarse las características físicas y químicas que puedan ocasionar algún inconveniente en la operación del sistema o dañar las membranas

##### **Parámetros físicos**

###### *Temperatura*

La temperatura varía en función del lugar geográfico o de la época del año en que se realiza el tratamiento. El funcionamiento de las membranas varía con la temperatura y éstas no pueden operar por encima de los 45°C, por lo que es muy importante el monitoreo de este parámetro en la operación de las plantas de ósmosis inversa (Medina, 2000).

###### *Sólidos suspendidos*

La partículas en suspensión proceden de la erosión de los terrenos, la disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas (Medina, 2000).

Todos estos elementos extraños deben de eliminarse de los circuitos hidráulicos de las instalaciones, o al menos controlarse dentro de un límite.

En general, la eliminación de las partículas no coloidales se resuelve mediante la utilización de filtros, formados por una o más capas de material filtrante. También parte de las partículas coloidales es retenida por estos filtros, con los que se consigue reducir dicho contenido en un 50% (Medina, 2000).

#### *Partículas coloidales e índice de ensuciamiento*

Las partículas coloidales ocasiona serios problemas a las membranas de ósmosis inversa porque son suficientemente pequeñas para pasar la mayoría de los sistemas de filtración aunque suficientemente grandes para ser rechazadas y concentradas en la superficie de la membrana (Medina, 2000).

Los coloides son partículas pequeñas del orden de 0.001 a 10  $\mu\text{m}$ , provistas de una carga eléctrica, generalmente negativa, sobre su superficie. Cuando estas partículas se encuentran en un medio acuoso, sus cargas superficiales, llamadas "cargas primarias", atraen a los iones positivos presentes en el medio que junto con algunos negativos se adhieren fuertemente a las partículas, desplazándose con ellas, dando lugar a la "capa ligada". Otros iones se adhieren débilmente originando la capa difusa, tal como se muestra en la figura 4.1

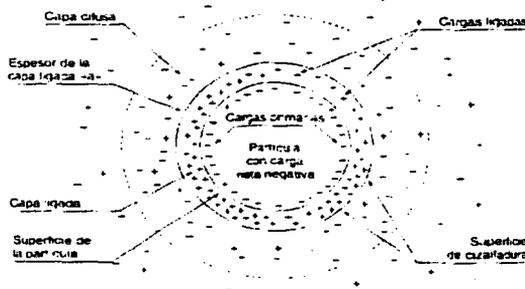


Figura 4.1. Doble capa de partículas coloidales (Fariñas, 1999).

Al potencial eléctrico existente sobre la superficie de la partícula se le llama "potencial de Nerts", y al medido sobre la superficie de cizalladura "potencial Zeta". Este potencial, del orden de -100 a -50 mV, es el responsable del comportamiento electrocinético de las partículas coloidales (Fariñas, 1999).

Las cargas eléctricas y el lecho de agua que rodea las partículas coloidales tienden a

alejarlas entre sí, y por tanto, a estabilizar la solución. Cuando la concentración de sales aumenta, las partículas tienden a perder su carga eléctrica, debilitándose. A este proceso se le llama coagulación. A partir de ese momento pueden aglomerarse y formar partículas de mayor tamaño. Este proceso recibe el nombre de floculación (Fariñas, 1999).

El ensuciamiento por partículas coloidales es debido a la coagulación y posterior floculación en las proximidades de la superficie de las membranas (Fariñas, 1999).

Para cuantificar el ensuciamiento que pueden producir las partículas coloidales de la solución de aporte, suele determinarse el índice de ensuciamiento (Silt Density Index, abreviadamente SDI). Este índice se calcula a partir de la velocidad de ensuciamiento que sufre una membrana filtrante Millipore de 0.45 micras de selectividad al ser atravesada por la solución, a una presión igual a 2.07 bar (Fariñas, 1999).

El equipo necesario para medir dicho índice se muestra en la figura 4.2. Aunque la medida del SDI no es precisa, es el mejor método para evaluar la concentración de coloides.

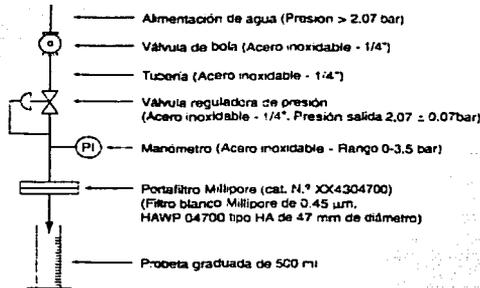


Figura 4.2. Equipamiento necesario para determinar el SDI (Fariñas, 1999).

De forma general, la relación existente entre el SDI de la solución de aporte, su potencial Zeta y el riesgo de ensuciamiento de las membranas se muestra en la tabla 4.1

Tabla 4.1. Relación entre el SDI, el potencial Zeta y el riesgo de ensuciamiento por coloides (Medina, 2000).

SDI	Potencial Z	Grado de ensuciamiento
3 o menos	-30 a -15 mV	Pequeño o ninguno
3 a 6	-15 a -1 mV	Moderado
> 6	Insignificante	Severo

### *Turbiedad*

La turbiedad, expresión de ciertas propiedades de absorción de la luz que tiene el agua, es un parámetro cuya validez depende en cierta medida de la técnica de medición es ocasionada por la presencia de materiales en suspensión como arcilla, limos partículas orgánicas coloidales, plancton y otros microorganismos microscópicos.

Las partículas que ocasionan la turbiedad varían de 10 nm a diámetros de 0.1 mm y pueden dividirse en tres grupos:

- Arcillas y limos.
- Partículas orgánicas resultantes de la descomposición de restos animales y plantas.
- Partículas fibrosas

Las partículas arrastradas del suelo por erosión constituyen la mayor parte del material en suspensión del agua. Las arenas más gruesas y los limos quedan recubiertas en su superficie totalmente o parcialmente de una capa de materia orgánica (Medina, 2000).

La fracción arcillosa está compuesta por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, cuarzo sílice, carbonatos y feldspatos. Las sustancias húmicas a veces tienen un efecto predominante (Medina, 2000).

La turbiedad orgánica se origina por la acumulación de microorganismos, a veces muy elevada, y da lugar a una agua oscura y maloliente (Medina, 2000).

La turbiedad indica el grado de filtración que se debe de dar al agua así como su efectividad. Mediante la filtración se consigue reducir la turbiedad a 1 UTN. Esta lectura da idea de si la filtración es eficaz o no. La presencia de la turbiedad es importante porque enmascara la presencia de otros contaminantes. La turbiedad se debe generalmente a sustancias inorgánicas, mientras que el color es imputable a partículas de materias orgánicas e hidróxidos metálicos (Medina, 2000).

### **Parámetros químicos**

La composición química del agua o la actividad biológica que en ella se desarrolla pueden crear problemas en las membranas que hay que evitar, por lo que es importante realizar una análisis químico en el que se incluyan los parámetros que a continuación se mencionan.

*pH*

El rechazo de sales de las membranas depende en cierta medida del pH, pues cada material tiene un pH al que el rechazo es máximo. No todas las membranas reaccionan igual a la variación del pH en el agua de alimentación (Medina, 2000).

Normalmente hay un pH óptimo al que la membrana tiene el mayor rechazo de sales y por lo tanto conviene trabajar cerca de este valor. Sin embargo, por las características del agua de alimentación, debido a determinadas circunstancias puede interesar trabajar a un pH distinto del óptimo de la membrana (Medina, 2000).

*Análisis iónico*

El análisis iónico debe de ser lo más completo posible con especial referencia a los iones que presentan más dificultades para su separación, como los monovalentes, pero también contemplando la presencia de algunos microelementos como hierro aluminio, manganeso o estroncio y no debe de faltar el contenido de flúor y sílice pues especialmente estos dos elementos pueden plantear serios problemas a la membrana, por la pequeña solubilidad de sales del primero, y los precipitados que disminuyen la eficiencia de forma irreversible en el segundo (Medina, 2000).

En el cuadro siguiente se relacionan elementos que deben de aparecer en el análisis químico del agua de alimentación.

Tabla 4.2. Principales iones en el agua salada (Medina, 2000).

Aniones	Cationes	Otros
Cl <sup>-2</sup>	Na <sup>+1</sup>	SiO <sub>2</sub>
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	K <sup>+1</sup>	PH
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	SDT
CO <sup>3</sup> H <sup>-1</sup>	Mg <sup>+2</sup>	CE
NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	Ba <sup>+2</sup>	
F <sup>-</sup>	Sr <sup>+2</sup>	
	Fe <sup>+3</sup>	
	Al <sup>+3</sup>	

La determinación de la concentración de todos y cada uno de los iones presentes en el agua de alimentación es indispensable además para poder determinar la presión osmótica

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

de la solución y la presión de trabajo que requerirá el sistema.

Algunos de estos iones pueden precipitar sobre las membranas como sales minerales u óxidos metálicos por lo que junto con el análisis iónico se debe analizar la concentración de estos.

### *Sales minerales*

Las sales minerales precipitan sobre las membranas, si exceden sus productos de solubilidad. Las sales más comunes que son susceptibles de precipitar son:

- Carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$
- Sulfato cálcico  $\text{CaSO}_4$
- Sulfato de bario  $\text{BaSO}_4$
- Sulfato de estroncio  $\text{SrSO}_4$
- Fluoruro de calcio  $\text{CaF}_2$
- Sílice  $\text{SiO}_2$

El riesgo de precipitación de una sal determinada puede calcularse teniendo en cuenta su concentración en la solución de aporte, su producto de solubilidad y el porcentaje de rechazo al que trabaja una planta (Fariñas, 1999).

### *Óxidos metálicos*

Los materiales cuyos óxidos e hidróxidos pueden aparecer en la soluciones de aporte y que son susceptibles de precipitar son: hierro, manganeso y aluminio.

El hierro presente en la solución que llega a las membranas puede tener dos orígenes diferentes: existir en solución de aporte incorporase a ella por la corrosión de los metales con los que esté en contacto la solución. Cualquiera que sea la procedencia del hierro, éste debe de permanecer en forma soluble durante todo el proceso. En tal caso su porcentaje de rechazo por parte de las membranas será elevado del mismo orden que un ion bivalente. Sin embargo, si el ion ferroso soluble ( $\text{Fe}^{+2}$ ) se oxidase a ión férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ), se formaría hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  que precipitaría, ensuciando las membranas.

El manganeso presenta una química similar a la del hierro y cuando ambos están presentes suelen precipitar simultáneamente.

Cuando la solución de aporte contiene una alta concentración de aluminio, este puede precipitar en forma de hidroxilo al reducirse el pH de la solución para evitar la precipitación de carbonato de calcio o cuando se supere su producto de solubilidad en las proximidades de la membrana.

Este tipo de problemas pueden aparecer cuando la solución que alimenta la unidad de ósmosis inversa es agua procedente de la red de abastecimiento público, habiendo sido coagulada previamente con sulfato de alúmina (Fariñas, 1999).

#### 4.1.3 Características y propiedades de las aguas salobres

Atendiendo a su salinidad las aguas se puede clasificar como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Clasificación del agua según su concentración de sales (Fariñas, 1999).

Denominación		Salinidad (mg/l)
Dulces		< 1,000
Salobres	Baja	1,000-2,000
	Media	2,000-5,000
	Alta	5,000-10,000
Salinas		10,000-30,000
Marinas		30,000-50,000
Salmueras		50,000-200,000

La concentración promedio de sales de las aguas marinas está alrededor de los 35,000 mg/l. Sin embargo, en el mar muerto se llegan a tener concentraciones de hasta 50,000 mg/l. Las aguas salobres y salinas son, en general, de origen subterráneo aunque algunas aguas superficiales pueden presentar elevados contenidos de sales disueltas (Fariñas, 1999).

La desalación se realiza, tanto en aguas salobres como salinas y marinas, por medio de ósmosis inversa dependiendo del caudal de agua desalada necesaria y de las características físicas y químicas del agua cruda.

La concentración de sales presentes en el agua corresponde al residuo seco a 105° C o sólidos disueltos totales (SDT) y se mide normalmente en mg/l. Su determinación consiste en pesar la muestra de agua, que se lleva a una estufa en la que se calienta hasta la temperatura de 105°C. Se pesa la muestra nuevamente y la diferencia en el peso de la muestra antes y después es el valor buscado. Esta determinación es lenta ya que se requiere la toma de una muestra y su traslado a laboratorio de análisis; en los procesos industriales se requiere tener un control instantáneo del proceso por lo que no se determinan, sino la conductividad eléctrica, dado que este parámetro puede medirse de

forma rápida y bastante precisa "in situ" (Medina, 2000).

La conductividad eléctrica es, al contrario de la resistencia eléctrica, mide la facilidad o la habilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica. Un agua químicamente pura no conduce la corriente, pero a medida que se van disolviendo en ella distintos elementos se va haciendo conductora y cuanto mayor cantidad de elementos disueltos, contiene más conductora será.

Si se determina la conductividad eléctrica de un agua, se puede estimar la cantidad de elementos disueltos en ella (SDT). Existe una relación entre la conductividad eléctrica y los SDT, lo que permite un paso directo de una a otra magnitud.

Aunque la relación entre conductividad y los SDT para agua natural corresponde a 0.64 mg/l por cada  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad eléctrica, dicha relación puede variar en distintos tipos de agua, en función de su composición química, por lo que se recomienda realizar la determinación de los SDT tanto en el laboratorio como en el campo, para obtener una relación más exacta para cada tipo de agua.

Las altas concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) pueden originar sabores inaceptables, afectan al sistema digestivo de los consumidores sensibles y tienen impactos económicos importantes, debido a que estas aguas son altamente corrosivas y provocan depósitos dentro de las tuberías. La Organización Mundial de la Salud recomienda un límite superior de la concentración de SDT en el agua potable de 1,000 mg/l (AWWA, 1998).

Como se mencionó anteriormente los sólidos que son solubles en el agua son compuestos iónicos, como la sal, que se encuentra disociada en forma de iones positivos como el sodio ( $\text{Na}^+$ ) y de iones negativos como cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), y en menor cantidad existen también otros compuestos que puede ser eliminados por medio de la ósmosis inversa. En la tabla 4.4 se muestran los principales iones presentes en las aguas marinas.

Los principales cationes que se encuentran en el agua son calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ), mientras que los aniones más abundantes son el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) y bicarbonato ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ ). En menor cantidad existen otros como el hierro, manganeso, aluminio, nitrato, fosfato y fluoruro (Medina, 2000).

No obstante que estos compuestos están presentes en todas las aguas de origen natural, la concentración en la que se encuentren es lo que origina que un agua sea considerada como salobre, salina o bien marina. Estas aguas tienen una elevada concentración de compuestos que impiden el uso y consumo humanos sin un tratamiento previo como el de ósmosis inversa. A continuación se presenta una descripción de los elementos citados.

Tabla 4.4. Constituyentes iónicos del agua de mar (Brown *et al.*, 1993).

Constituyente iónico	Concentración (mg/l)
Cloruro $\text{Cl}^-$	19,350
Sodio $\text{Na}^+$	10,760
Sulfato $\text{SO}_4^-$	2,710
Manganeso $\text{Mg}^{2+}$	1,290
Calcio $\text{Ca}^{2+}$	412
Potasio $\text{K}^+$	400
Bióxido de carbono	106
Bromuro $\text{Br}^-$	67
Acido carbónico	27
Estroncio $\text{Sr}^{2+}$	7.9
Fluouro $\text{F}^-$	1

### Cloro

Es el elemento más abundante en el agua de mar, con una concentración cercana a los 20,000 mg/l.

Su origen es difícil de explicar, aunque algunas teorías sostienen que procede del ácido clorhídrico o de las sales volátiles de cloro procedentes de las sales volcánicas, géysers o aguas termales, así como aguas juveniles o magmáticas.

No existe límite alguno de la cantidad de cloro presente en el agua para consumo humano, sin embargo, se sabe que una concentración por arriba de los 500 mg/l puede deberse a contaminación con aguas residuales.

En cuanto al agua para uso agrícola, el cloro produce quemaduras en las hojas de las plantas, por lo que los niveles que se consideran tolerables son muy distintos según las características de cada cultivo.

### Sodio

Es el metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas y además el único presente en cantidades significativas en las aguas naturales. Todos los compuestos sódicos son solubles, por lo que el sodio lavado de las rocas y suelos permanece siempre

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

en solución; esto significa que los compuestos de sodio no precipitan sobre las membranas.

En el agua de mar es el ión metálico más abundante, en concentraciones de alrededor de 10,000 mg/l. En otras aguas, en cambio, pueden suceder que otros iones metálicos, como el calcio o incluso el magnesio, predominen. El sodio se encuentra en el agua en forma de cloruro, carbonato o bicarbonato sódico. No contribuye a la dureza del agua, sin embargo, las aguas subterráneas que contienen cantidades importantes de carbonato y bicarbonato sódico son alcalinas y pueden tener pH de 9 o superior.

Dependiendo del uso que vaya a darse al agua desalada, abastecimiento para consumo humano o agrícola, existen contenidos máximos que no deben de rebasarse y que vienen determinados por la influencia del sodio en problemas cardiovasculares, para el primero, y su contribución al deterioro de la impermeabilidad de la estructura del suelo, para el segundo.

### *Sulfatos*

Proceden fundamentalmente del yeso o anhidrita, siendo los más frecuentes el sulfato sódico y el magnésico. Contribuyen a la salinidad de las aguas y a veces alcanzan los 2,000 mg/l.

Desde el punto de vista sanitario su contenido no debe exceder los 250 mg/l, ya que contenidos elevados pueden provocar problemas gastrointestinales. En cuanto a usos agrícolas, aguas con concentraciones superiores a los 12,500 mg/l se consideran de mala calidad.

El principal problema que causa el sulfato en la desalación por medio de ósmosis inversa, es que existe la posibilidad de formar precipitados de calcio y de magnesio sobre las membranas cuando se rebasan ciertos niveles de concentración.

### *Calcio y Magnesio*

Se encuentran en todas las aguas y son especialmente abundantes en las aguas subterráneas. Forman parte de numerosas sales por lo que su influencia en las características depende del tipo de sales en que estén presentes.

Contribuyen conjuntamente al establecimiento de la dureza del agua, que es causada fundamentalmente por las sales que forman estos elementos con los bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos.

Ambos elementos son responsables en gran medida de las incrustaciones que se producen

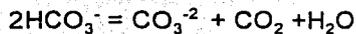
cuando el agua experimenta cambios en la temperatura, pH y presión, lo cual pueden ocurrir dentro de los módulos de ósmosis inversa si no son bien vigilados estos factores dentro del sistema.

Desde el punto de vista agrícola los problemas que generan el calcio y el magnesio en el riego son indirectos, puesto que impiden la absorción de otros elementos por la planta y favorecen las incrustaciones de carbonatos en la infraestructura de riego.

#### *Carbonatos y bicarbonatos*

Se encuentran en todas las aguas en combinación con el calcio y el magnesio produciendo la dureza del agua. Su concentración depende en mucho del pH del agua.

Como las membranas de ósmosis inversa tienen un elevado rechazo de estos iones, se concentran y se pueden precipitar, originando con ello un aumento en el pH que puede dañar y/o obstruir las membranas. Este aumento en el pH se debe a que al aumentar la concentración de bicarbonatos y carbonatos se rompe el equilibrio con los iones de hidroxilos presentes en el agua, aumentando la producción de hidroxilos que elevan el pH a valores cercanos a 10 así como la formación de precipitados de calcio y magnesio originados por la hidrólisis de los iones de carbonato Como se muestra en la siguiente ecuación:



#### *Nitratatos*

Los nitratos en el agua proceden de distintas fuentes. En algunos casos, de plantas leguminosas, en otros de residuos de plantas o animales, añadidos como fertilizantes al suelo; en otros, de las propias aguas residuales.

Un alto contenido de nitratos puede indicar contaminación y ser considerado como un indicador o aviso de que se tienen presentes en el agua bacterias peligrosas.

Las concentraciones mayores a 45 mg/l son indeseables para el uso doméstico por el posible efecto tóxico en los niños, enfermedad conocida como cianosis o del niño azul.

Es importante mencionar que los métodos de membranas son los únicos capaces de eliminar los nitratos del agua.

### *Hierro*

Prácticamente todas las aguas contienen hierro en mayor o menor cantidad cuyo contenido puede ser problemático para determinados usos, domésticos e industriales.

La química del hierro en el agua es bastante compleja. Hay dos tipos de hierro, el ferroso y el férrico. El primero es inestable en presencia del aire y cambia al estado férrico.

El ion ferroso puede ser disuelto en cantidades hasta de 50 mg/l en aguas que son casi neutras e incluso en cantidades mayores en aguas ligeramente ácidas. En contraste el ion férrico es casi insoluble en agua alcalina o débilmente ácida. En las aguas subterráneas son normales las concentraciones de 1 a 5 mg/l.

Los organismos pueden cambiar ciertas formas de hierro disuelto al estado férrico insoluble. El hierro insoluble se deposita en la capa de los organismos o en los huecos de arena. El contenido de hierro se puede disminuir por medio de aireación, con lo que se consigue disminuir su contenido hasta valores de 0.1 mg/l.

El hierro y los carbonatos forman precipitados sobre las membranas que reducen la eficiencia de la instalación no obstante se eliminan fácilmente.

### *Manganeso*

Tiene un comportamiento químico similar y presenta las mismas condiciones que las del hierro. Aparece como bicarbonato manganoso soluble que cambia a hidróxido de manganeso insoluble cuando reacciona con el oxígeno del aire. Las manchas causadas por el manganeso son más intensas y difíciles de eliminar que las ocasionadas por el hierro.

El mejor pretratamiento para ambos elementos consiste en evitar su oxidación utilizando bombas sumergibles, que impulsan directamente el agua a tratar, desde el punto de captación hasta la aspiración de las bombas de alta presión, sin exponerla al aire.

Cuando los iones  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$  aparecen simultáneamente en el agua, el primero puede catalizar la oxidación del segundo por lo que es muy conveniente la utilización de antiincrustantes.

Cuando se producen precipitados de hierro y manganesos sobre las membranas se consiguen buenos resultados en su limpieza bajando el pH por debajo de 3. Los ácidos cítrico y acético resultan muy adecuados para estos casos, pudiendo utilizarse también el ácido nítrico.

### *Sílice*

El silicio es, junto con el oxígeno, el elemento más abundante en la corteza terrestre. La combinación de ambos forma el  $\text{SiO}_2$  que se denomina comúnmente sílice.

No contribuye a la dureza del agua, pero es parte importante de las incrustaciones formadas por muchas aguas.

Las membranas de ósmosis inversa tienen un rechazo de más del 99% al sílice, por lo que este se acumula en el rechazo. En algunos casos cuando la concentración de sílice supera los 110-125 mg/l, se vuelve insoluble por lo que se forman precipitados de sílice como el silicato de calcio y magnesio, que no son fácilmente disueltos por los ácidos. Por lo mismo no conviene superar concentraciones superiores a 150 mg/l en el rechazo.

### *Flúor*

Aparece solo en pequeñas concentraciones en el agua subterránea. Puede proceder de la fluorita, el principal mineral fluorado de rocas ígneas.

El rechazo de este elemento por las membranas de ósmosis inversa es variable en función de la composición del agua.

Es uno de los componentes más problemáticos del agua en los procesos de desalación, ya que su rechazo por las membranas es elevado y la solubilidad de sus sales que se concentran en el rechazo es muy bajo, siendo los riesgos de precipitación muy altos. Contenidos tan bajos como 5-7 mg/l pueden resultar peligrosos.

### *Bario y Estroncio*

Aunque no son elementos abundantes, su presencia se detecta en determinadas aguas subterráneas.

Los sulfatos de estos elementos son mucho menos solubles que los del calcio por lo que pueden precipitar.

### *Aluminio*

No se encuentran normalmente en el agua, a no ser que ésta haya sido contaminada previamente con desechos industriales o municipales.

El hidroxilo de aluminio tiene una solubilidad variable en función del pH, siendo éste menor a 5 pH. Si embargo, los valores a los que trabaja un sistema de ósmosis inversa

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

se encuentran en el rango de 6.5 y 5.7, por lo que no representa un riesgo en la operación de estos sistemas. Únicamente en el caso de utilizar membranas de triacetato de celulosa cuyo funcionamiento está entre un pH 5 y 6.

Como se puede ver estos elementos que se encuentran presentes en el agua, son los que determinan las condiciones de operación del sistema, y la necesidad de que el agua curda requiera de tratamiento previo.

La desalación no sólo implica la eliminación de los iones productos de la sal (NaCl) sino de una serie de compuestos iónicos presentes en el agua, tanto para mejorar la calidad del agua como para asegurar el buen funcionamiento del sistema.

### **4.1.3 Calidad requerida**

La planta de ósmosis inversa deberá cumplir con los límites máximos establecidos por las normas oficiales, tanto en el agua de producto como en el rechazo, como a continuación se detalla.

#### *Agua de producto*

El agua desalada que se piense utilizar como agua potable proveniente del permeado de las unidades de ósmosis inversa, deberá cumplir con lo establecido por la NOM-127-SSA-1994. Esta norma oficial mexicana relativa al agua para uso y consumo humano, establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe de someterse el agua para su potabilización.

De acuerdo con dicha norma el agua potable o agua para consumo humano es aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos, y que no causa efectos nocivos para la salud.

La misma norma establece que la ósmosis inversa es el tratamiento más adecuado para la reducción de la concentración de contaminantes como arsénico, metales pesados (aluminio, bario, cadmio, cianuro, cobre, cromo y plomo), cloruros, hierro, manganeso, fluoruros y sulfatos. Se entiende con ello que se considera a la ósmosis inversa como uno de los tratamientos más completos, como anteriormente se mencionó en el capítulo uno.

Aun así será necesario la evaluación periódica de los parámetros estipulados en dicha norma que permitan acreditar su cumplimiento, y así cumplir con las inspecciones que realiza la CNA tal y como se establece en la Ley de Aguas Nacionales en su título cuarto.

### *Rechazo*

El rechazo o salmuera producto de las membranas de ósmosis inversa, que no se puede aprovechar como agua para consumo humano, es considerado como el desperdicio del proceso.

A través del proceso de desalación por ósmosis inversa no se incorpora al agua ningún tipo de contaminante. Sin embargo, el rechazo presenta una elevada concentración de sales que deteriora significativamente la calidad del agua.

Aun así, esto no impide que se vierta sin ningún pretratamiento en las aguas nacionales o al alcantarillado público, ya que en las normas oficiales actuales no se tiene restricción alguna en cuanto al contenido de sales.

En el caso de que el rechazo sea vertido al alcantarillado público se tendrá que cumplir con lo establecido en la norma oficial mexicana NOM-ECOL-02-1996, la cual establece los límites máximos permitidos para descargas al alcantarillado público. En caso que se opte por descargar directamente a las aguas nacionales se deberá de cumplir con lo establecido en la NOM-ECOL-01-1996.

De igual manera que en el caso del agua producto, se deberán determinar los parámetros establecidos en las normas antes mencionadas para acreditar ante la autoridad competente que se está cumpliendo con los límites establecidos para las descargas.

## 4.2 Captación

El diseño de la instalación se inicia con la toma o punto de captación del agua que va a alimentar el sistema.

En las plantas de ósmosis inversa para desalación de agua de mar, se utilizan tomas de agua abiertas o superficiales y cerradas o de pozo.

### 4.2.1 Captación cerrada

La toma de agua mediante un pozo es la más favorable y la que siempre hay que intentar construir. Sin embargo, ello implica la permeación de caudales, a veces importantes, a través de los distintos estratos del subsuelo, que no siempre es posible lograr. (Medina, 2000)

Las principales ventajas que ofrece una toma cerrada consisten en que el agua que se capta en el pozo experimenta una filtración natural a través del recorrido que el agua sigue desde el lecho marino hasta el pozo, tal como se muestra en la figura 4.2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

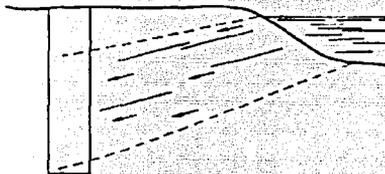


Figura 4.3. Captación a través de un pozo (Medina, 2000).

El agua extradía al haber sufrido una filtración contiene índices de turbiedad y de ensuciamiento bajos, además de que debido a que dicha agua se encuentra confinada presenta una baja concentración de oxígeno disuelto y temperaturas estables, que se traducen en una ausencia de actividad orgánica y biológica.

El aprovechamiento de las ventajas citadas permite abaratar los costos de los pretratamientos que requieren las instalaciones de ósmosis inversa, en especial los químicos.

Las mayores dificultades en la construcción de pozos de captación en las zonas costeras, se deben principalmente a los grandes caudales que se requieren para las instalaciones de agua de mar, por tener factores de recuperación bajos (40-50%) y ser de grandes dimensiones para aprovechar la economía de escala.

Otro aspecto a considerar es la pérdida de caudales que pueden producirse en los pozos a lo largo del tiempo; en el caso de los pozos costeros el principal problema es el arrastre de elementos finos que obstruyen la afluencia del agua al pozo.

Entre las variaciones más frecuentes que se plantean en las tomas de agua de mar se pueden citar:

#### *Cámara de captación*

Consiste en un depósito que se excava por debajo de la cota del agua del terreno. Su forma puede ser circular en el caso de pozos normales para instalaciones pequeñas, o rectangulares cuando son de mayor capacidad.

De esta forma el agua se filtra a través de las paredes de la cámara o depósito, de la que es extraída por bombas horizontales.

Es una obra que presenta bastantes dificultades cuando la excavación es en roca y se precisa de grandes caudales, pues en la parte inferior de la cámara se excava en zona inundada y resulta difícil estimar el caudal disponible.

El aspecto más importante de la construcción es la determinación de la cota inferior de la excavación, para que una vez colocadas las bombas se respeten los valores de la altura de succión, sumergencia y distancias entre la base de succión y fondo del depósito.

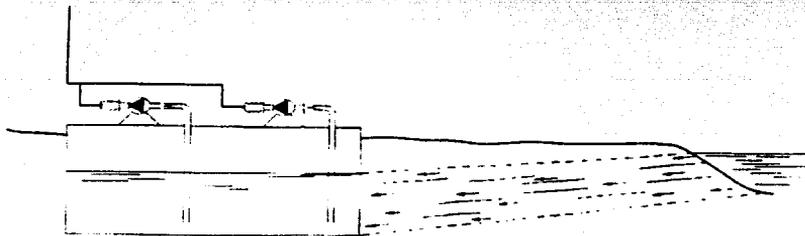
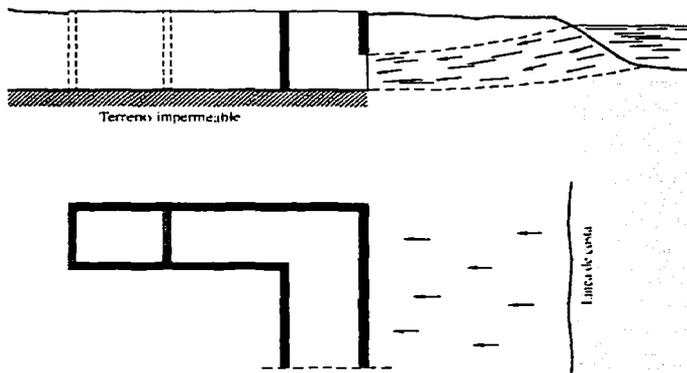


Figura 4.4. Cámara de captación (Medina, 2000).

En las obras marítimas debe de tenerse en cuenta la influencia de las mareas y las diferencias entre la pleamar y la bajamar. La cota que debe marcar el nivel inferior de la captación viene determinada por la bajamar viva equinoccial, que se produce en determinados días del año y asimismo debe de tenerse en cuenta el decalaje que se produce como consecuencia de la permeabilidad de los terrenos que el agua de mar tiene que atravesar hasta alcanzar el pozo.

Cuando las necesidades de captación son elevadas, la cámara se sustituye por una galería o canal enterrado, abierto por uno de sus extremos, que se construye paralelo a la costa.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.5. Canal de toma (Medina, 2000).

Si la capa del terreno permeable a través de la cual se espera la aportación de agua no tiene demasiado espesor, la pared de la galería aguas arriba se excava y se construye hasta dentro de la capa impermeable subyacente, mientras que la pared exterior, menos profunda, queda dentro de los límites del terreno permeable. De esta forma se aumenta el frente de entrada de agua.

La mayor dificultad consiste en todos los casos en garantizar el caudal necesario para la instalación.

Cuando las instalaciones son de pequeña capacidad y están situadas en zonas interiores, puede recurrirse a los tradicionales pozos de gran diámetro, 2,5 -3 m, con la profundidad suficiente para alcanzar el acuífero de captación (Medina, 2000).

### *Cámara de captación con sondeos verticales*

En ocasiones la permeabilidad del terreno es insuficiente para aflorar el caudal necesario y en estos casos suele recurrirse a realizar perforaciones en el fondo de la cámara hasta alcanzar alguna capa de terreno más permeable que incremente el caudal de la captación. Esta situación es más frecuente en las instalaciones de agua de mar, a medida que la toma se aleja de la línea de costa.

No resultan indicados los sondeos inclinados hasta llegar a la misma línea de mar, pues en la captación se producen importantes arrastres de arena que pueden afectar los equipos de la instalación, y acaban por obstruir los propios sondeos.

El objetivo principal de la construcción de la cámara es la posibilidad de utilizar bombas verticales, de mayor eficiencia y más fácil mantenimiento. Por ello deben conocerse previamente las características de la bomba a utilizar, especialmente la altura de aspiración, para colocar la solera sobre la cual se asentarán las bombas a la cota conveniente.

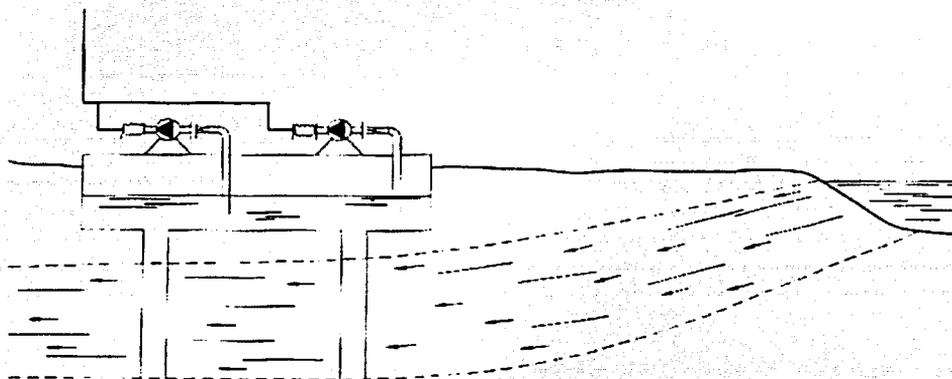


Figura 4.6. Cámara de captación con sondeos verticales (Medina, 2000).

Cuando el nivel del acuífero de la bajamar bajo la línea del terreno es muy importante, 8 o más metros, la realización de la cámara puede ser complicada y muy cara.

En este caso aun sacrificando la eficiencia de los equipos, debe recurrirse a la captación mediante uno o más pozos de pequeñas dimensiones, separados entre sí, y provistos de bombas sumergibles.

En todos los casos los pozos se recubren interiormente mediante una tubería plástica, generalmente PVC, de diámetro adecuado a la perforación con objeto de evitar derrumbes del terreno. Esta tubería debe de ir ranurada en su tramo inferior, para facilitar la entrada de agua y actuar a modo de rejilla. De esta forma se protege además el pozo de las posibles infiltraciones procedentes de niveles superiores que pueden estar contaminadas.

Una vez perforados los pozos, que pueden ser individuales o constituir una batería, según la importancia de la obra, hay que arbitrar la infraestructura hidráulica de colectores necesarios para llevar el agua a la zona de pretratamiento de la instalación (Medina, 2000).

#### **4.2.2 Captación abierta**

Las tomas de agua superficiales no tiene las ventajas de las cerradas al no experimentar una filtración natural, por ello la calidad del agua obtenida de ellas es mucho menor que en el caso de las cerradas.

Su mayor utilización está en las aguas de mar, cuando las características de impermeabilidad del terreno no permiten otro tipo de captación. Sin embargo, este tipo de estructuras también se utiliza en ocasiones en instalaciones de agua salobre. Existen dos tipos principales de esta captación: en canal y mediante emisario submarino.

En ambos casos el agua es captada a una determinada distancia de la costa o de un lago o río, debe de ser recogida en un depósito, no siempre necesario, desde el que mediante bombas es impulsada a la instalación desaladora.

El objeto del depósito es garantizar un suministro sin interrupciones a la instalación y actuar a modo de sedimentador para mejorar las condiciones físicas del agua de alimentación.

Es más frecuente en las instalaciones de mayor tamaño, ya que además actúa como reserva en el caso de avería de alguna de las bombas de la toma y se suele emplear también para el bombeo de agua de limpieza de filtros (Medina, 2000).

##### *Toma de canal*

La toma de canales es la más superficial, por lo que está sometida a la acción del oleaje y en consecuencia se ve afectada por la presencia de algas contaminantes y turbiedad propia de su ubicación. Es por ello conveniente instalar a la entrada del canal dispositivos de filtración o separación de gruesos necesarios para evitar sobre todo la entrada de algas y materiales gruesos, que podrían averiar las bombas.

Son imprescindibles rejillas fijas o móviles, con la superficie adecuada para garantizar una operación continua, sin obstrucciones. Los materiales empleados por estas rejillas deben ser resistentes a la corrosión, especialmente en el caso de agua de mar.

#### *Emisores submarinos*

Cuando el oleaje o las características de la costa determinan una elevada turbiedad y arrastre de algas o contaminación, es preciso recurrir a emisores submarinos. En este caso la tubería de captación utilizada debe de ser de un material resistente a la corrosión y flexible, siendo los más utilizados el polietileno y el poliéster reforzado con fibra de vidrio y debe de sumergirse en el mar a una distancia conveniente para evitar la influencia del oleaje.

Su anclaje en el fondo marino se realiza mediante dados de concreto. Para evitar que se obstruyan con algas o elementos de gran tamaño, incluidos peces, se hace terminar en un colector provisto de varios filtros de entrada con rejilla.

La limpieza y mantenimiento de éstas se hace con aire, para lo cual es preciso disponer de los correspondientes equipos y tuberías que lleguen hasta las mismas. En otras ocasiones se dota a la tubería de una estructura más complicada, generalmente de concreto, en su entrada (Medina, 2000).

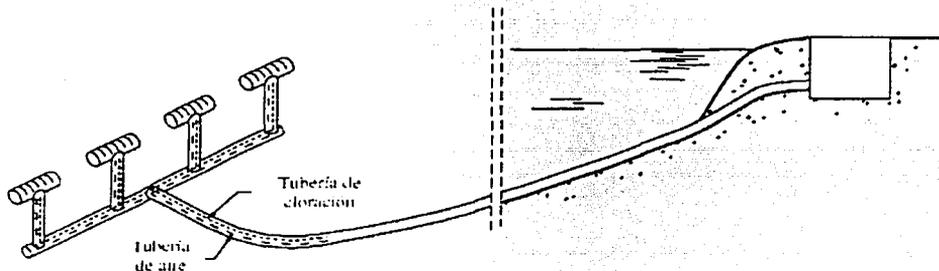


Figura 4.7. Colector submarino con filtro y equipos de limpieza (Medina, 2000).

En instalaciones de tamaño medio se puede recurrir a la construcción de pantalanés (jety) de los que soportan las bombas, aunque en el caos de fondos poco profundos y arenosos, deben protegerse las bombas de la abrasión producida por las arenas (Medina, 2000).

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

---



Figura 4.8. Estructura de captación sumergible (Medina, 2000).

El agua captada se conduce a un depósito a nivel de terreno, desde el que se bombea a la instalación.

TESIS CON  
TALLA DE ARZOBISPO

### **4.3 Pretratamientos Físicos**

Como ya se mencionó anteriormente, el agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos e inorgánicos que deben de ser controlados dentro de determinados límites, para que pueda aplicarse directamente a las membranas de ósmosis inversa, sin que se produzca un deterioro importante de las mismas.

El ensuciamiento por elementos sólidos no tiene sólo efectos de tipo físico, por rozamiento o desgaste u obstrucción de los poros de las membranas, sino que en la mayoría de los casos la película o capa de partículas depositada sobre la superficie de éstas produce además un cambio en las condiciones hidráulicas de funcionamiento, que induce a la formación de precipitados químicos. Asimismo cuando en el agua a tratar existen contaminantes orgánicos se favorece el ensuciamiento biológico.

Para mejorar estos aspectos físicos del agua se recurre fundamentalmente a distintos tipos de filtración que cubren la fase de separación de sólidos contenidos en líquidos.

En general, la eliminación de las partículas no coloidales se resuelve mediante la utilización de filtros, formados por uno o más capas de material filtrante. También una parte de las partículas coloidales es retenida por estos filtros, con los que se consigue reducir dicho contenido en un 50%, pero en muchas ocasiones la filtración debe de mejorarse con la aplicación de otras técnicas como la decantación, la coagulación-floculación y la coagulación-floculación-decantación.

Si la contaminación de partículas sigue siendo excesiva debe de recurrirse a una fase posterior de filtración a la que podríamos denominar pulimiento, constituida fundamentalmente por la filtración sobre cartuchos.

No obstante, este último tipo de filtración se realiza en todos los casos, por motivos de seguridad y como exigencia comprendida dentro de las garantías que ofrecen los fabricantes (Medina, 2000).

#### **4.3.1 Filtración sobre arena**

Con este nombre genérico se conoce a los filtros que constan de una o más capas de material filtrante, sean o no de arena, pues en muchos casos más que arena se trata de materiales de granulometría variable, que se colocan en capas de distinto espesor, unos sobre otros.

En ellos se introduce el agua por la parte superior y va percolando más o menos lentamente a través de las distintas capas, para recogerse el agua filtrada por la parte

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

inferior. La velocidad de la filtración depende de varios factores como:

- Presión aplicada.
- Granulometría utilizada.
- Profundidad de la capa o capas de material.

Los filtros que se utilizan pueden ser tanto depósitos abiertos como cerrados, y en ellos se deposita un material poroso que actúa como medio filtrante. Ello determina los dos sistemas fundamentales de filtros de arena existentes, abiertos o de gravedad y cerrados o de presión (Medina, 2000)

Por otra parte, por la forma en que se realiza el proceso, existen dos modalidades:

- Filtración lenta, en este tipo de filtración se utilizan velocidades de filtración muy bajas, 0.10 a 0.40  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ , lo que determina mayores necesidades de espacio en su instalación. Los filtros son más fáciles de operar y se limpian con agua corriente.
- Filtración rápida, funciona a velocidades más elevadas que varían entre los 5 a 7  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  para los filtros de gravedad y 7 a 12  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  para los filtros de presión. Estos valores, sin embargo, no son definitivos y pueden aumentar cuando el agua a tratar no es muy sucia. La filtración rápida es más eficaz, aunque puede ser preciso realizar coagulación-floculación para conseguir un buen rendimiento. En las instalaciones de ósmosis inversa sólo se emplean filtros rápidos.

### *Filtros de arena a gravedad*

En los filtros abiertos, constituidos por un depósito de forma rectangular la altura de la columna de agua necesaria para efectuar la filtración es de 1-5 m y por ello la velocidad de filtración no es muy elevada. Los caudales de filtración varían de 3 a 6  $\text{l}/\text{m}^2\cdot\text{h}$  con una altura máxima de 3.6 m.

Estos filtros llevan en su parte inferior un falso suelo en el que se disponen un serie de boquillas uniformemente repartidas para recoger el agua filtrada, que se almacena en un depósito situado en la parte inferior de los filtros y desde el se vuelve a bombear hacia la siguiente fase del proceso de desalación. En algunos casos se prescinde del citado depósito y el agua va a parar a un colector del que aspira la bomba. Uno u otro diseño depende de las condiciones topográficas del predio de la planta en relación con la captación del agua y del espacio disponible.

### *Filtros de arena a presión*

Los filtros empleados en las instalaciones de ósmosis inversa trabajan a 3.5 a 7 kg/cm<sup>2</sup> y pueden ser verticales u horizontales.

Son depósitos generalmente metálicos y en ocasiones plásticos, cuyo tamaño viene limitado por el precio y la resistencia de los materiales, que se emplean. En su parte inferior se colocan, al igual que en los filtros abiertos, unos colectores o placas con boquillas que recogen el agua que atraviesa en forma descendente el material filtrante.

La filtración en los filtros verticales es más uniforme que en los horizontales, puesto que en los primeros el espesor del lecho filtrante es el mismo en toda la superficie del filtro, mientras que en los horizontales puede ser mayor en el centro que en los bordes.

Por ello debe estudiarse la altura de colocación de los colectores o placas en su interior, para evitar la creación de caminos preferentes de flujo que pueden empeorar la calidad del filtrado.

El espesor de la placa de que se construye el filtro influye en gran medida en su costo, y como dicho espesor depende de la presión que debe resistir el filtro, que a su vez es proporcional a su diámetro, no deben de rebasarse determinados diámetros para no encarecer su precio.

Los diámetros más grandes que se utilizan están entre los 3.5 y 4 m, tanto para filtros verticales como horizontales. En cuanto a la longitud de éstos, para los horizontales se recomiendan longitudes no mayores a los 20 m debido a los problemas de manipulación transporte y soldadura que presentan, y para los verticales las alturas más comunes son las de 1.5 a 4 metros (Medina, 2000).

### *Parámetros de diseño*

Los filtros de arena se diseñan con el objetivo de disminuir la turbiedad a 1 UTN y el SDI a 5. Dependiendo de la calidad del agua de alimentación se deberá de utilizar una o mas capas de material filtrante.

Los materiales filtrantes que se utilizan son de granulometría y densidad distintas para que cada uno de ellos retenga sólidos de distintos tamaños.

La granulometría de los materiales de filtración se determina mediante el cernido a través de mallas de tamaño determinado, y está definida por dos parámetros:

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

- **Tamaño efectivo:** corresponde al tamaño del tamiz tal que sólo el 10% de las partículas pasan a través del mismo.
- **Coefficiente de uniformidad.** es la relación entre el tamaño de grano del que la muestra tiene un 60% más fino que él y aquél que la muestra tiene un 10% más fino que él.

Los filtros rápidos de arena tienen como material filtrante arenas gruesas con tamaños inferiores a los 2 mm, con un coeficiente de uniformidad variable entre 1.3 y 1.6.

Cuando se tienen aguas sin demasiados problemas de turbiedad, una simple capa de arena es suficiente.

En caso de que el agua tenga una elevada concentración de sólidos se emplean filtros de más de una capa; además de arenas se emplean otro tipo de materiales como la antracita, granate, y magnetita.

Cuando se coloca una segunda capa, por lo general más gruesa, sobre el lecho filtrante, se eliminan mejor las partículas grandes, permitiendo una penetración más profunda y uniforme de las partículas más pequeñas. De esta forma se puede aumentar el caudal de filtración.

El material más común para las segundas capas, es la antracita. Más porosa y angulosa que la arena, elimina las partículas más gruesas efectivamente y permite el paso de las partículas más delgadas a las capas de arenas más profundas.

Esta disposición permite mejorar las características de la filtración de una instalación ya existente, reemplazando por ejemplo los 5-15 cm superiores por unos 15-20 cm de antracita.

Para determinar el espesor de la capa filtrante no existe un método preciso, sino que se realizan pruebas en pequeñas instalaciones piloto. Los espesores que normalmente se utilizan para las distintas capas son:

- **Antracita:** 45-60 cm
- **Arena silíceas:** 35-45 cm

En algunos diseños se incluye un tercer medio para aplicaciones especiales como el granate y otros materiales más fino y denso que la arena se coloca en el fondo (Medina, 2000).

Todo los filtros granulares realizan la separación de sólidos de dos formas.

- En la superficie a través del medio filtrante más fino situado en la parte superior del filtro.
- En profundidad, al quedar retenidos los sólidos en los huecos del interior de la capa filtrante, aun cuando en muchas ocasiones es una mezcla de ambos.

Cuanto mejor sea la distribución de sólidos retenidos a lo largo de la profundidad del medio mejor es el efecto de filtración y mayores los periodos de funcionamiento de los filtros sin recurrir al lavado.

Una forma de saber si el filtro es adecuado o no, es que al trabajar a caudal o presión constante la curva de pérdidas de carga sea lineal. Si se toman datos de las pérdidas de carga de un filtro en funcionamiento y se obtienen curvas como las de las figuras 4.9 y 4.10.

- La figura 4.9, que tiene un pendiente uniforme corresponde a un filtro en el que predomina fundamentalmente la filtración profunda.

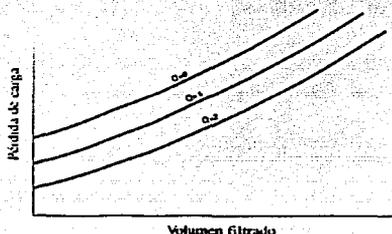


Figura 4.9. Curva de pérdidas de carga de un filtro en profundidad (Medina, 2000).

- La figura 4.10, por el contrario, muestra filtración de tipo superficial. La curva es de tipo exponencial y los sólidos son retenidos rápidamente por el material más fino depositado en la parte superior del filtro.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

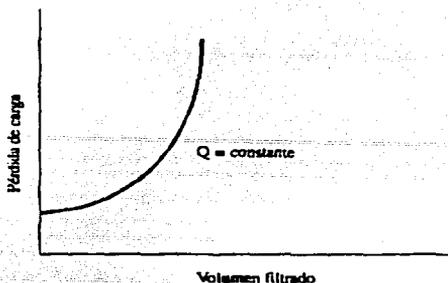


Figura 4.10. Curva de pérdidas de carga superficiales (Medina, 2000).

Con base en los datos de instalaciones ya existentes se deberán construir curvas del tipo mostrado en las figuras 4.9 y 4.10, para determinar si la filtración es correcta o no. Si la curva obtenida es del segundo tipo es conveniente reemplazar la capa superior por otra de material más grueso, para permitir que los sólidos penetren en la masa filtrante, pues de lo contrario acaba formándose una capa compacta superficial, que aumenta la pérdida de carga de manera más significativa y para mantener los caudales es necesario aumentar la presión de funcionamiento.

El diseño del filtro debe conseguir que la filtración a profundidad sea la predominante, analizándose cuatro aspectos principales:

- Tipo de materiales filtrantes.
- Granulometría del medio filtrante.
- Velocidad de filtración.
- Espesor de las capas filtrantes.

Un filtro se diseña fundamentalmente por las velocidades de filtración y a partir de ella se determina la superficie filtrante. Debido a que el costo del filtro está en función de su superficie filtrante, el diseño debe tratar de conseguir la mayor producción sobre la menor superficie, pero ello implica un profundo conocimiento del tipo de agua a filtrar y de su variación en el tiempo, y la adecuada variación de los medios filtrantes.

La optimización resulta ciertamente difícil, sobre todo en el caso de tomas abiertas, puesto que las características del agua pueden variar bastante a lo largo del año o incluso a lo largo del día, y lo que es más importante, no se conocen con total precisión hasta que la instalación comienza a funcionar (Medina, 2000).

Los valores que aquí se presentan son aproximados, lo más conveniente es determinar en el sitio las características del agua y el material filtrante, mediante una planta piloto que

sea adecuada para conseguir bajar el índice SDI a 5.

#### 4.3.2 Filtros sobre cartuchos

Los filtros de cartucho son imprescindibles en las instalaciones de ósmosis inversa, pues los filtros que hemos citado anteriormente sólo alcanzan un nivel grueso de filtración, insuficiente para las membranas. Existen en el mercado filtros sobre cartuchos especialmente diseñados para los sistemas de desalación por ósmosis inversa, a continuación se presenta las principales características de este tipo de filtros.

Con la filtración sobre cartuchos o bujías se consigue la eliminación de partículas de pocas micras de diámetro. Constituyen una filtración fina en los proyectos de plantas de desalación con membrana.

El nivel de filtración al que hay que llegar es de 5 micras, pues dicho valor es el que establecen los fabricantes de membranas como condición indispensable para garantizar su funcionamiento. En ocasiones se puede incluso descender hasta el nivel de filtración de una micra. Los cartuchos que constituyen el elemento filtrante están formados por un alma o eje hueco, con perforaciones laterales, sobre las que se enrolla un hilo, que es el que garantiza el tamaño de poro de acorde con las características de separación del filtro.

Dicho tamaño se logra con una selección del espesor del hilo, el tipo de enrollamiento y la tensión o presión que se aplica al mismo.

El eje debe de ser de un material resistente a la corrosión, por lo que se emplean productos plásticos como PVC o aceros inoxidables 316-L o de alto contenido de molibdeno según que la aplicación se haga en aguas salobres o de mar.

Las dimensiones de estos cartuchos son variables en longitudes de entre 0.25 m que constituye la unidad tipo y 1.25 m (quíntuple), pero pueden construirse a medida según sean las necesidades del diseño del filtro.



Figura 4.11. Cartuchos (Medina, 2000).

Las velocidades medias de filtración que se establecen son de 2 a 3 m<sup>3</sup>/h por cartucho de 1 metro de longitud y 0.0654 m (2 ½ ") de diámetro.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

---

Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga, por lo que cuando se alcanza un valor determinado se procede a su sustitución, puesto que éstas no se desprenden fácilmente, como ocurre con otros filtros. Desde su aparición en el mercado relativamente reciente cada vez se utilizan más los filtros plegables. Su mayor superficie filtrante les permite, en igualdad de circunstancias, disminuir las pérdidas de cargas o lo que es lo mismo, aumentar el tiempo de funcionamiento ininterrumpido.

Desde otro punto de vista con este tipo de filtros y considerando una velocidad fija de filtración, normalmente inferior a 3m/s, se precisa el número de unidades para realizar el filtrado de determinado caudal, que con filtros de hilo enrollado. De esta forma se puede abaratar la instalación, ya que además los depósitos dentro de los correspondientes cartuchos también serán menores.

#### 4.4 Pretratamientos químicos

La composición química del agua o la actividad biológica que en ella se desarrolla puede crear problemas en las membranas, que hay que evitar.

Los pretratamientos químicos se utilizan para controlar dos tipos de fenómenos o procesos que se desarrollan en el agua:

- Contaminación: Que se produce a causa de contaminantes orgánicos y biológicos, como algas y otras sustancias.
- Procesos químicos: Como ataques químicos que afectan la propia estructura de la membrana y reacciones químicas que producen precipitados insolubles que afectan físicamente la membrana.

##### *Contaminación*

En el agua se desarrollan una serie de microorganismos: bacterias, virus y hongos algunos de los cuales pueden atacar a las membranas o desarrollarse sobre ellas, ya que la composición química de éstas constituye un excelente medio de cultivo.

Pero además existe otro tipo de contaminación de tipo artificial o inducida, procedentes de la actividad humana o industrial, y que también puede ir a para a las aguas superficiales o subterráneas. Por último en el agua se desarrollan una serie de algas filamentosas o microalgas.

La incidencia de todos estos elementos o productos sobre las membranas es muy negativa, produciendo la alteración más o menos rápida de sus parámetros básicos que reducen su eficiencia y acaban por inutilizar la membrana.

##### *Ataques químicos*

Se producen como consecuencia de elementos químicos o iones que se encuentran de manera natural en el agua o que de forma accidental se incorporan a la misma. Originan una serie de procesos o reacciones químicas que terminan por afectar a las membranas. Este tipo de ataques se produce por dos mecanismos: oxidación ó hidrólisis (Medina, 2000).

La oxidación se produce por la presencia de oxígeno disuelto en el agua o algún elemento oxidante que o bien forma parte de la misma o se incorpora posteriormente (Medina, 2000).

El contenido natural de oxígeno en el agua no es esencialmente peligroso para las membranas, pero puede atacarlas bajo dos circunstancias:

- Cuando en el agua a tratar existe una importante actividad biológica. Dicha actividad, que en la mayoría de los casos es causada por las bacterias aerobias, se ve favorecida por la presencia de oxígeno disuelto, y da lugar a la aparición de una capa de limo sobre las membranas que enmascaran o reducen sus características básicas.
- En presencia de iones metálicos. Favoreciendo la oxidación del hierro y manganeso contenidos en el agua y provocando precipitados sobre las membranas, que obligan a parar la instalación para proceder a su limpieza.

Pero además del  $O_2$  existen otros elementos de mayor poder de oxidación, que generalmente son añadidos al agua en procesos de tratamiento o incluso como resultado de la incorporación de vertidos industriales. Entre estos se encuentran el cloro y el permanganato potásico.

Estos procesos de oxidación afectan fundamentalmente a las membranas de poliamida aunque en distinto grado, según sea el material constituyente de las mismas.

#### *Hidrólisis*

Es un fenómeno de descomposición que afecta los grupos acetilo de la estructura polisacárida de las membranas derivadas de polímero fabricados de aceto de celulosa y que conllevan la pérdida de las propiedades de rechazo.

La velocidad de la hidrólisis depende del pH y se precisa de un ácido mineral para ajustarlo entre 5.5 y 6, donde la vida de la membrana es máxima.

Nuevos polímeros de mezclas de acetato y triacetato de celulosa son algo más resistentes y pueden operar a pH entre 4 y 8. Sin embargo, las membranas más resistentes son las de poliamida que no son sensibles a este tipo de ataque.

Para controlar los citados procesos se utilizan los siguientes pretratamientos químicos:

- Coagulación-floculación.
- Desinfección.
- Regulación de pH.
- Reducción/decloración.
- Estabilización/Inhibición.

#### 4.4.1 Coagulación-floculación

Cuando el tratamiento a través de un medio filtrante es insuficiente, antes de pasar el agua por el filtro de cartucho es preferible recurrir a la coagulación-floculación. En casi todas las instalaciones se dispone de equipos para poder realizar este tipo de proceso.

Como lo explica Medina, la coagulación tiene por objetivo desestabilizar las partículas en suspensión y facilitar su aglomeración. De manera muy general el proceso se realiza mediante la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por fin favorecer, mediante una mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas.

Estas partículas se aglutinan para formar un floculo que puede eliminarse fácilmente por sedimentación (decantación) o filtración.

Aunque estos dos procesos se citan conjuntamente y a veces crean confusión, al hablar de coagulación nos referimos a una serie de operaciones químicas y mecánicas mediante las cuales se aplican los coagulantes y estos ejercen su acción.

Estas operaciones generalmente implican dos fases distintas:

- Mezcla, durante la cual el coagulante aplicado se dispersa rápidamente en el agua tratada mediante una agitación violenta.
- Floculación, que es la agitación del agua a menores velocidades y durante periodos más largos, durante los cuales surgen pequeñas partículas que se aglomeran en floculos perfectamente definidos y de suficiente tamaño para sedimentarse.

El objetivo de la coagulación, que es la desestabilización de los colides, se consigue en cuatro etapas:

- Compresión de la doble capa que rodea a los colides. Como es conocido, cuando partículas coloidales parecidas se acercan a sus capas difusas reaccionan y generan una fuerza de repulsión. Cuando la distancia entre las partículas es superior a un valor crítico  $L$ , domina la fuerza de repulsión sobre la de atracción de Van der Waals, por lo que se mantienen en movimiento. Las partículas cuya energía cinética es suficiente para superar el potencial de repulsión se aglomeran, mientras que las otras permanecen dispersas. Aumentando la fuerza iónica del agua se disminuyen las fuerzas de repulsión y se comprime la capa difusa hacia la partícula. En la zona situada cerca de

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

ésta, las fuerzas de Van der Waals son bastante importantes para neutralizar la fuerza de repulsión.

- **Neutralización de sus cargas superficiales, debido a las fuerzas de Van der Waals.**
- **Agrupación de las partículas en un precipitado, para lo que previamente se desestabilizan los coloides, formando un flóculo, que posee carga positiva cuando el pH está entre ácido y neutro. Esto requiere añadir una cantidad suficiente de coagulante.**  
Los coagulantes más usados son distintas sales de hierro y aluminio pero por la sensibilidad de las membranas a este último, en el caso de la ósmosis inversa suelen emplearse coagulantes de hierro, generalmente cloruro férrico. Se pensaba que las sales liberaban estos iones que a su vez neutralizan la fuerza de repulsión entre las partículas coloidales y favorecían así la coagulación. Sin embargo, se ha comprobado que el mecanismo es más complejo y que los productos de la hidrólisis de dichas sales de aluminio y hierro son incluso coagulantes más eficaces que los propios iones.
- **Adsorción de los metales hidrolizados como las sales de hierro sobre los coloides, creando puentes entre las partículas.**  
Después de su desestabilización las partículas coloidales tienen tendencias a aglomerarse cuando entran en contacto con otras. El grado de aglomeración de las partículas depende de la probabilidad de los contactos y de la eficiencia de ellos.  
La floculación tiene precisamente por objeto aumentar la probabilidad de los contactos entre partículas, los cuales están provocados por la diferencia de velocidad entre las partículas.

### *Parámetros de diseño*

Para que el proceso de coagulación-floculación sea óptimo, se deben determinar algunas de las características del agua que influyen en la efectividad de dicho proceso, de entre las cuales destacan:

pH : es la variable más importante, existiendo para cada tipo de agua un rango de pH para el cual la coagulación es más efectiva. Este rango está en función del coagulante utilizado, de su concentración y de la composición del agua a tratar. Para sales de hierro y aluminio dicho rango se extiende entre 5.5 y 7.8.

**Sales disueltas:** la coagulación de las sales de hierro y aluminio está más influenciada por los aniones que por los cationes. Así que los cationes sodio, calcio y magnesio apenas ejercen influencia. Los aniones, en cambio, amplían el rango del pH óptimo hacia la acidez.

**Temperatura:** al disminuir la temperatura, sobre todo a valores bajos, la sedimentación del flóculo es deficiente y tiene tendencia a penetrar de manera más profunda en el filtro.

**Coagulante:** la elección del coagulante puede influir en las características de la coagulación. Así, aunque la alúmina es el coagulante más empleado en tratamiento de aguas, en muchos casos puede ser ventajoso sustituirlo por sulfato férrico, que en muchas aguas tiene un rango de pH óptimo más amplio y además es menos soluble que la alúmina.

En el caso de agua de mar el coagulante más frecuente es el cloruro férrico, cuya eficiencia es alta y su precio reducido. Los polímeros también son cada vez más frecuentes, por sus menores dosis de aplicación y su facilidad de manipulación.

**Mezcla:** La mezcla de los productos químicos se debe realizar en etapas. En la primera, la mezcla es enérgica y de corta duración. Su objetivo es dispersar los productos en la totalidad del volumen a tratar. Por ello se realiza en zonas de turbulencia que se crean especialmente para ello.

En la segunda etapa, la mezcla es lenta y tiene por objeto favorecer el contacto entre las partículas del flóculo, la turbiedad y color.

**Turbiedad:** como ya se menciono la turbiedad se debe a partículas de diámetro variable por lo que su coagulación se realiza más fácilmente que si se tratase de partículas con el mismo diámetro.

Las aguas contaminadas por aguas residuales son más difíciles de coagular y exigen concentraciones de coagulante mayores. Es necesario añadir una cantidad mínima de coagulante para obtener cierta cantidad de flóculos. Al aumentar la turbidez, hay que aumentar la cantidad de coagulante.

Cuando la turbidez es muy elevada, la cantidad de coagulante es relativamente débil, pues la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada.

**Color:** el pH óptimo para su eliminación varía entre 4 y 6. El 90% de las partículas causantes del color tiene un diámetro superior a 3.5  $\mu\text{m}$ , son por tanto menores a los limos y arcillas que ocasionan la turbiedad y poseen cargas en negativas en su superficie.

**Sedimentación:** para obtener los mejores resultados de la coagulación floculación, se realiza el proceso de sedimentación. Se aplica sobre todo cuando los índices de SDI son superiores a 25, no obstante su elevado coste sólo permite su aplicación en instalaciones grandes.

Consiste en la colocación anterior a los filtro unsedimentador o clarificador que retiene los floculos formados.

La sedimentación se basa en retener el agua durante un largo periodo de tiempo suficientemente largo en un depósito, en el que el agua circula a una velocidad muy lenta, para que los sólidos que arrastra puedan depositarse en el fondo, del que son retirados posteriormente.

Este tipo de instalación no es frecuente en desalación de agua de mar, pero si en aguas procedentes de ríos y lagos.

#### **4.4.2 Cloración**

Se realiza para la eliminación de la contaminación bacteriológica o por algas muy frecuentes en numerosas fuentes de agua sobre todo en las del tipo superficial.

En el agua de mar, cuando la captación es abierta e incluso en determinadas ocasiones en pozos costeros, es frecuente la presencia de materia orgánica y en consecuencia gran actividad biológica que afecta a la membrana, produciendo un ensuciamiento biológico en la superficie de ésta.

La eliminación de la materia orgánica sobre la superficie de las membranas resulta bastante difícil, por lo que es indispensable que exista pretratamiento, para no exponer a las membranas a la proliferación de bacterias.

La utilización de diversos compuestos de cloros, es el sistema más usado para combatir el ensuciamiento biológico de las membranas en las plantas de ósmosis inversa

La dosificación o inyección de cloro en el sistema se realiza principalmente de dos formas: mediante cloro gas  $Cl_2$  o con soluciones líquidas de hipoclorito sódico ó cálcico. Tanto en un caso como en otro la base del proceso de desinfección es la formación del ácido hipocloroso (OHCL) que posee una elevada acción biocida.

El ácido hipocloroso no sólo controla el procesos de crecimiento de las bacterias, penetrando en las paredes de las células y matándolas, sino que además evita la producción de las enzimas necesarias para la proliferación de microorganismos.

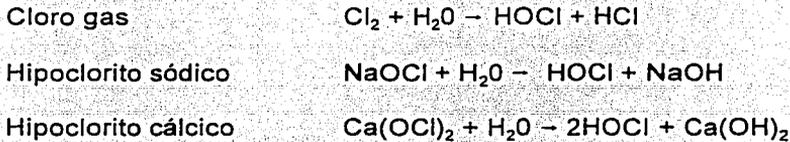
Sin embargo, la eficiencia del producto es variables según el tipo de bacterias, por lo que la dosis a aplicar y el tiempo de contacto pueden ser distintos según los casos.

### Parámetros de diseño

Para poder determinar la dosis adecuada y la forma de aplicación, es conveniente hacer un breve repaso de la química del cloro.

El cloro adopta tres formas distintas al añadirse al agua: cloro elemental, ácido hipocloroso HOCl e ion hipoclorito OCl<sup>-</sup>.

Las reacciones básicas que se dan en la cloración según sea el producto que se emplee son:



Dependiendo del pH, el HOCl, tanto si proviene del gas cloro como si es del hipoclorito, se disocia posteriormente en iones H<sup>+</sup> y OCl<sup>-</sup> (Medina , 2000).



La concentración del ácido hipocloroso presente en el agua depende del pH, temperatura y fuerza iónica del agua:

- Con respecto al pH, la concentración de HOCl disponible varía notablemente para pequeños cambios de este. En agua de pH 7 y 20° C la cantidad de HOCl sin disociar es de 79.27% mientras que a pH 8 se reduce hasta el 27.69%.
- En cuanto a la temperatura, al aumentar ésta, también lo hace la disociación del HOCl y aumenta en consecuencia la concentración del ion OCl<sup>-</sup>, es decir, disminuye la acción bacteriana del cloro.
- Por último la disociación del HOCl aumenta cuando lo hace la concentración de sales de agua, es decir la fuerza iónica.

En consecuencia, la dosis de hipoclorito a aplicar varía en función de las condiciones del agua y por ello en cada momento o en cada instalación deberán controlarse adecuadamente, para conseguir el efecto biocida que se pretende.

La eficiencia del cloro como desinfectante se mide mediante lo que se conoce como cloro libre disponible o residual, que es el cloro que queda en el agua al cabo de un

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

determinado tiempo de contacto. Puede por tanto reaccionar química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ión hipoclorito.

Sin embargo, dicha eficiencia está directamente relacionada con la cantidad de ácido hipocloroso sin disociar presente en la solución, cuya acción biocida es 100 veces mayor que la del ión hipoclorito.

### *Dosis óptima*

Es casi imposible de calcular la dosis de cloro, debido al gran número de reacciones estequiométricas que se dan en el agua debido a la presencia del cloro.

La dosis óptima de cloro se encuentra después del punto de ruptura (brakepoint) de la cloración que se produce cuando se añade cloro hasta que quede satisfecha su demanda y quede todavía un residual.

La demanda de cloro es la cantidad que puede consumir el agua para su desinfección y la destrucción de la materia orgánica. En consecuencia es la proporción de cloro añadido al agua en un periodo de tiempo dado, que se convierte en cloro disponible.

Además de la demanda biológica y del amonio, las especies que reaccionan para formar cloro no disponible son agentes reductores como nitritos, CN, sulfuro, iones ferroso y manganeso, compuestos orgánicos e inorgánicos no reductores.

Los compuestos orgánicos son el metano, hidrocarburos aromáticos, compuestos de doble enlace como los ácidos grasos y los compuestos orgánicos nitrogenados.

Los compuestos inorgánicos son el amoniaco y aquellos metales que catalizan la descomposición de los iones hipoclorito, como cobalto, cobre, níquel, hierro y manganeso.

Por ejemplo, si el agua tratada contiene manganeso, hierro, nitritos, materia orgánica y amonio, al añadir cloro éste reacciona en primer lugar con el manganeso, hierro y nitritos y por tanto no se produce la desinfección.

Si se continúa añadiendo cloro reacciona con la materia orgánica y el amonio para formar derivados organoclorados y cloraminas. Estas producen un residual de cloro, pero su poder desinfectante es bastante reducido.

Si se añade más cloro, éste destruye las cloraminas y la mayor parte de los organoclorados, y la solución alcanza el punto de ruptura.

La adición de más cloro crea un cloro libre residual que ya no reacciona con ninguna otra

sustancia. A partir de este momento el poder desinfectante del cloro es muy efectivo y aumenta en la misma proporción que el cloro añadido.

Por ello, la determinación de la dosis adecuada de cloro se realiza mediante pruebas de laboratorio que permiten obtener la conocida curva del punto crítico.

Si a un agua determinada aplicamos una dosis de cloro creciente (gas o hipoclorito) y determinamos en cada momento el contenido de cloro libre, se obtiene una curva como la de la figura 4.7.

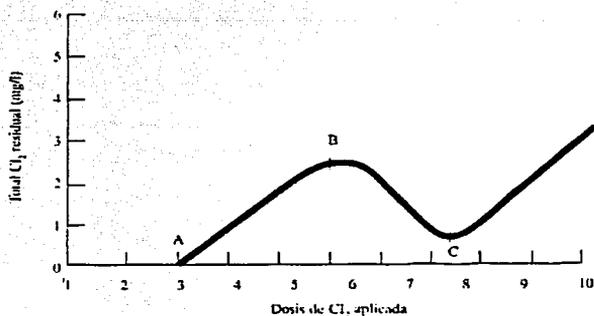


Figura 4.12. Curva de cloración (Medina, 2000).

Durante el tramo horizontal entre la curva de los puntos o y A, el cloro reacciona con los agentes que están presentes en el agua como el oxígeno,  $\text{SH}_2$  e incluso elementos metálicos como el hierro o el manganeso. Su efecto desinfectante es por tanto nulo.

Cuando tenemos aguas muy contaminadas con materia orgánica y por tanto amonio y nitrógeno el cloro reacciona en primer lugar con éstos, formando cloraminas de 1º, 2º y 3º orden, que son mucho menos eficaces como biocidas que el ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ), y sólo después de su neutralización se produce la liberación de cloro.

Entre los puntos A y B la reacción corresponde la fenómeno antes citado. El punto B representa el máximo de esta fase que corresponde a la situación en que la relación molar entre el cloro y el nitrógeno amoniacal es de 1:1 que equivale a una relación de masas de 5:1.

Si esta relación sigue aumentando se produce una descomposición de las cloraminas con producción final de ácido clorhídrico, que explicará el tramo descendente de la curva B-C.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

El punto mínimo o crítico C corresponde normalmente a una relación de cloro/amoniaco de 8-10:1. Al que se llama punto de ruptura.

A partir de este punto la efectividad como desinfectante del cloro añadido es mayor, coincidiendo con la última fase creciente de la curva.

Como medida de efectividad se suele emplear el conocido como:

Factor de desinfección = Tiempo de contacto (min) \* Concentración de cloro (mg/l)  
que toma los valores que se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Factor de desinfección (Medina, 2000).

Valor de pH	Factor de desinfección
6.0-7.0	6
7.0-7.5	12
7.5-8.0	20
8.0-8.5	30
8.5-9.0	35

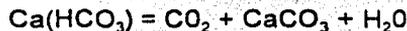
Aunque en aguas fuertemente contaminadas, incluyendo altas concentraciones de hipoclorito cálcico se ha comprobado que este método no elimina completamente las bacterias, debido a la ausencia de cloro residual.

### 4.4.3 Ajuste de pH

El agua que se va a desalar tiene generalmente un pH elevado, 8 en el agua de mar y valores muy superiores en el agua salobre. En estas condiciones el funcionamiento de la membrana no es el óptimo y la eficiencia de la instalación se reduce, ya que a esos valores de pH, se pueden producir precipitados que afectarán el proceso.

La acidificación del agua de alimentación se emplea por ello con dos objetivos:

- Colocar el agua en un pH óptimo para la membrana.
- Prevenir la precipitación del carbonato de calcio, el cual se forma por la descomposición del bicarbonato cálcico según la siguiente reacción:



Se usa por lo común el ácido sulfúrico, que elimina la alcalinidad del bicarbonato y previene la precipitación del carbonato; pero además incrementa la concentración del ión sulfato y la tendencia a la formación de precipitados de sulfato cálcico según la ecuación general:



Si en el agua existe carbonato de calcio o bicarbonato cálcico las correspondientes reacciones serían:



Para evitar éstos se agrega al agua algún antiincrustante o secuestrante que suelen ser derivados del fósforo como el hexametáfosfato sódico o diversos tipos de polielectrolitos.

En el caso del agua de mar en tomas superficiales y en agua salobre contaminada, la acidificación del medio tiene otro propósito que es la mejora de la eficiencia del hipoclorito de sodio, empleado como biocida.

En el caso de utilizar membranas de aceto de celulosa, que son fácilmente degradables, el ácido sulfúrico previene su hidrólisis a celulosa y ácido acético, que se produce rápidamente cuando salen del estrecho margen de pH (5-6) a que pueden trabajar.

El  $\text{CO}_2$  que se produce en todos los casos se difunde a través de la membrana hacia el producto que tiene un pH más bajo y es bastante corrosivo para las redes de distribución.

#### 4.4.4 Decloración

Las membranas, especialmente las de poliamida, son muy sensibles a los oxidantes particularmente a  $\text{Cl}_2$ , que puede encontrarse en el agua si ha sido sometida a un proceso de cloración.

Es preciso su completa eliminación antes de que el agua clorada entre en contacto con las membranas. Decloración es el proceso de eliminación o reducción del cloro total combinado residual.

Los compuestos de azufre son los más utilizados en la decloración y dentro de estos el  $\text{SO}_2$  o las soluciones acuosas de compuestos de sulfato.

También el carbón activado es un método muy eficaz que se emplea en los tratamientos

#### Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

de aguas y especialmente en las instalaciones no muy grandes; tanto en polvo como en gránulos, se usa en tratamiento de agua desde hace años.

En la forma de polvo se estima que sólo el 10% del carbón activado reacciona con el cloro, por lo que se inyecta en línea en las proximidades del punto de cloración para aumentar su eficiencia.

En la forma granular se emplea como medio filtrante y es mucho más eficaz, por lo que resulta ser la más utilizada. Simultáneamente a la decoloración, el carbón activado granular elimina los compuestos orgánicos.

Finalmente, el agua oxigenada se ha empleado en ocasiones como agente decolorante aunque es muy inestable y se deteriora fácilmente ante la presencia de diversos agentes contaminantes, por lo que su efectividad disminuye.

#### **4.4.5 Inhibición**

Se realiza mediante la dosificación de productos químicos que se agregan al agua que se va a tratar en cantidades muy pequeñas, consiguiendo aumentar la solubilidad de los distintos iones en el agua, en ocasiones hasta varias veces su solubilidad normal.

Con ellos se puede por tanto aumentar la recuperación de la instalación y en consecuencia abaratar tanto la inversión en equipos como gastos de funcionamiento.

Las dosificaciones óptimas son muy pequeñas en relación con las concentraciones de los cationes susceptibles de precipitación.

Su uso está ampliamente extendido en las instalaciones de desalación, aunque son más frecuentes en las instalaciones de agua salobre, puesto que en ellas se trata de operar a conversiones altas (mayores al 70%) y por tanto la concentración de salmuera es muy elevada.

En las instalaciones de mar no son necesarios dado que se opera a conversiones normalmente menores al 50%.

Su actuación se centra principalmente en la inhibición de precipitados de sales derivados de sulfatos.

Además, algunos de ellos son especialmente interesantes en el caso de algunos iones específicos como el flúor o el sílice, cuyos efectos de precipitación sobre la membrana son muy perjudiciales.

En su mayor parte se trata de derivados de polifosfatos, y más recientemente de poliacrilatos y/o polimetanos.

El mecanismo de inhibición no está muy claro, pero una de las características es el poder secuestrante de la capacidad de formar quelatos estables en cationes polivalentes. Por ello, a los inhibidores se le conoce también como productos secuestrantes.

Las soluciones tratadas como secuestrantes se estabilizan de alguna manera, provocando una alteración en la morfología del cristal inhibiendo su crecimiento.

La aplicación del tratamiento de inhibición tiene un costo químico bajo, su manejo es sencillo, y apenas ocasiona corrosión de los equipos. Su principal inconveniente es la inestabilidad con la temperatura de ciertas precipitaciones y que no eliminan completamente los riesgos de precipitación.

## 4.5 Selección de membranas

### 4.5.1 Características de las membranas

#### *Rechazo de sales*

Las membranas de ósmosis inversa se emplean fundamentalmente para la separación de iones de las soluciones acuosas, por tanto la característica más importante de la membrana es su capacidad para rechazar iones.

Para una misma membrana el rechazo depende del tipo de iones, y de otras variables, como el tamaño de la molécula, el radio iónico, la carga eléctrica o la interacción entre los diferentes iones y el solvente. En general, las membranas rechazan mejor los iones polivalentes que los monovalentes. Asimismo, el rechazo de iones bivalentes es siempre superior al rechazo total de la membrana y el rechazo de iones monovalentes inferior al total.

Como regla puede decirse que la membrana actúa como filtro para las moléculas que tienen un peso molecular superior a 200 y que en estos caso la teoría de difusión no es aplicable (Medina, 2000)

#### *Rechazo de bacterias*

El tamaño de los poros de la membrana es suficientemente pequeño para que su poder de separación de las bacterias, virus y organismos patógenos sea prácticamente total. Además, estos microorganismos se aglutinan unos con otros, formando una masa más grande que es rechazada completamente por las membranas.

Por ello, la utilización de membranas como método de desinfección es bastante eficaz y se presenta como el método más seguro para realizar la esterilización efectiva, pero deben controlarse los rechazos que son altamente contaminantes.

Por tanto, cuando en el agua del producto se detectan bacterias es signo evidente de alguna anomalía en la membrana que puede proceder, desde roturas de la propia membrana hasta fugas a través de los interconectores, juntas u otros accesorios.

Pero los virus, bacterias, y otros microorganismos que llegan a las membranas, se depositan sobre ellas y pueden proliferar, puesto que la propia membrana constituye un medio idóneo para su crecimiento.

La masa bacteriana representa una nueva barrera que afecta al rechazo de sales y al caudal que pasa a través de la membrana. La desinfección de éstas se hace en dichos casos indispensable. Para evitar llegar a esta situación es preferible aplicar un tratamiento de desinfección al agua que se va a tratar.

### *Compuestos orgánicos*

Las sustancias orgánicas también son retenidas en grado diferente. Las moléculas orgánicas con mayor peso molecular son retenidas mejor que las de peso molecular pequeño, pero además el grado de retención también está influenciado por el tamaño de la molécula y la estructura dimensional, según que ésta sea o no iónica.

En general, los compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular, como los ácidos orgánicos y las aminas, pasan a través de las membranas en mayor proporción que los iones.

Muchos de los compuestos de mayor interés como los fenoles, hidrocarburos clorados de bajo peso molecular pequeño, otros derivados halogenados, como los pesticidas e incluso los alcoholes de bajo peso molecular, tienen coeficientes de rechazo muy bajos, por lo que aparecen en el permeado casi con la misma concentración que en el agua que se trata.

Sin embargo, otras sustancias complejas, como las que originan el color de las aguas, son eliminadas en su totalidad. Las ligninas y los ácidos húmicos y fúlvicos también. Algunos compuestos orgánicos pueden atacar y degradar las membranas. Por ejemplo, determinados polímeros aparentemente no tienen efecto alguno en bajas concentraciones como los usados en los pretratamientos químicos, pero deben vigilarse, puesto que pequeños aumentos en su concentración resultan dañinos.

### *Resistencia al cloro*

El cloro es una fuerte oxidante utilizado por sus efectos desinfectantes en el tratamiento de agua, tanto en forma de hipoclorito (sódico o potásico) como en forma de gas. La tolerancia de las membranas de desalación al cloro libre disuelto en el agua a tratar, es muy distinta según el tipo de membrana.

Las especificaciones de los fabricantes indican que las membranas de acetato de celulosa CA soportan dosis de cloro en continuo hasta 1 mg/l. Durante breves periodos pueden soportar dosis superiores. Esto les da la posibilidad de ser sometidas a desinfección en el caso de aguas contaminadas.

Las membranas de triaceto de celulosa CTA, o mezclas de acetato y triacetato, son algo

más resistentes, pero siempre dentro de límites moderados. Por el contrario, las membranas de poliamida no son por lo general resistentes al cloro, aunque también dentro de ellas existen gradaciones.

Cuando se trata de desalar aguas residuales, o aguas superficiales contaminadas, las membranas de celulosa ofrecen una garantía de resistencia a la cloración que no ofrecen las otras, ya que además su superficie es mucho más lisa, por lo que también se ensucian menos.

#### *Condiciones hidráulicas*

Las membranas funcionan en condiciones óptimas cuando las velocidades de circulación del agua cumplen determinadas características.

Para conseguir un arrastre adecuado de las sales que se van depositando sobre las membranas, es conveniente que el flujo del rechazo sea constante y uniforme, y que la solución a tratar se mantenga también dentro de algunos valores, lo que implica fijar algunos flujos mínimos de ésta.

El flujo a través de una membrana se mide en función del volumen que la atraviesa por unidad de área de membrana en un periodo determinado.

La unidad comúnmente empleada es GFD (galón por pie cuadrado y día). Esta magnitud es muy importante a la hora de hacer el diseño de una instalación pues influye en el número de membranas.

Un agua de buena calidad permite proyectar la instalación con valores de GFD elevados. A medida que el agua empeora de calidad, tanto a los sólidos suspendidos como a los contaminantes, es preciso reducir el GFD, lo que supone aumentar el número de membranas, puesto que en el proceso de desalación una parte de los elementos extraños que lleva el agua y que no pueden ser retenidos completamente por los distintos pretratamientos, se van depositando sobre las membranas, obstruyéndolas o ensuciándolas y disminuyendo por tanto su capacidad productiva.

#### *Carga eléctrica*

La superficie de todas las membranas tiene una carga eléctrica que es consecuencia de los elementos químicos que interviene en su fabricación. Estas cargas retienen materia orgánica y los coloides del agua, así como los radicales de los productos químicos del pretratamiento.

Es muy importante el conocimiento de la carga superficial de las membranas para poder

elegir el pretratamiento químico más adecuado, así como los productos de limpieza convenientes, para que no se produzcan interacciones entre unos y otros que deterioren las cualidades de permeabilidad de la membrana.

### *Concentración de la polarización*

Las membranas de ósmosis inversa tiene un rechazo de sales limitado por lo que la concentración en el producto depende de la concentración que posee en el agua de alimentación a la entrada.

En una membrana de ósmosis inversas, el agua fluye en dos direcciones, como se muestra en la figura 4.13. Una de ellas es sobre la superficie de la membrana constituyendo inicialmente la corriente de aporte y posteriormente la de rechazo; la otra es a través de ella, dando lugar al flujo del permeado.

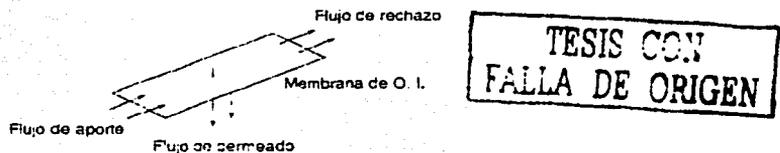


Figura 4.13. Circulación de los flujos en una membrana de ósmosis inversa (Fariñas, 1999).

A medida que el permeado atraviesa la membrana, las sales disueltas que contenía se quedan en las proximidades de su superficie. El soluto que no puede atravesar la membrana, debe de ser arrastrado por la corriente de rechazo. Ahora bien, al igual que ocurre en las paredes de un canal, la velocidad del solvente en las proximidades de la membrana es prácticamente nula, por lo que las sales sólo pueden pasar de esta región a la corriente rápida por difusión, dando lugar a una zona de concentración de sales mayor al resto de la solución. A esta zona se le conoce como capa límite, como se puede ver en al figura 4.14.

Esta situación se conoce como "polarización de la membrana" y al aumento en la concentración que sufre la solución en contacto con la membrana, se llama "concentración por polarización" (Fariñas, 1999).

Una concentración de polarización excesiva produce una sobresaturación de determinadas sales y su precipitación, que pueden producir el deterioro irreversible de las membranas.

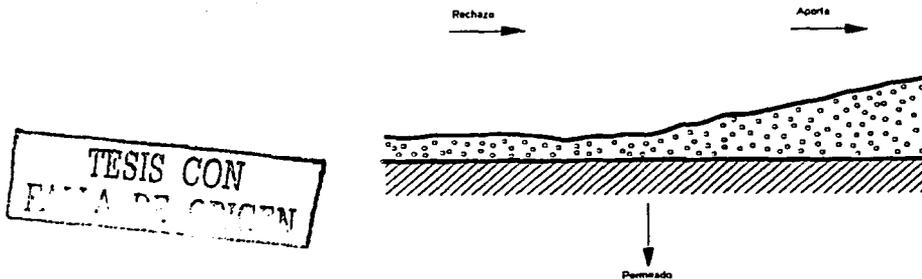


Figura 4.14. Concentración de polarización (Medina, 2000).

La polarización de la concentración no puede eliminarse por completo en los procesos de ósmosis inversa, pero al menos puede reducirse:

- Haciendo la solución turbulenta para mantener la capa límite lo más delgada posible.
- Estableciendo mecánicamente en la membrana canales de flujo para reducir los efectos de entrada.
- Se puede actuar también en la operación de la instalación, ajustando el flujo y limitando el permeado.

El espesor de esta capa depende de la agitación o de la velocidad del agua de alimentación y del grado de permeación. El grado de polarización de la concentración aumenta proporcionalmente al flujo del disolvente y también es proporcional a la presión aplicada. Por lo cual, existe una velocidad máxima de flujo por unidad de área para cada membrana, más allá de la cual un incremento en la presión no produce un aumento en el flujo de disolvente sino que provoca un aumento en la presión osmótica (Medina, 2000).

#### 4.5.2 Membranas comerciales

Las membranas de desalación por medio de ósmosis inversa pueden agruparse en dos clases: de acetato de celulosa y de distintos tipos de poliamida.

Las membranas de aceto de celulosa, que han estado en uso desde el comienzo de la tecnología de membranas en los sesenta, están todavía comercializándose a pesar de ciertas limitaciones. Las membranas de aceto de celulosa pueden tolerar una exposición continua a bajos niveles de concentración de cloro residual (0.1 a 0.4 mg/l), lo que es importante en ciertas aplicaciones. Son, sin embargo, muy susceptibles a la hidrólisis, un proceso que se acelera cuando se trabaja en un rango de pH de 4.5 a 6.5. El acetato de celulosa también es sensible a la degradación biológica. El triacetato de celulosa y las

mezclas de aceto y triacetato son hidrólicamente más estables que las membranas de acetato y la superan en rendimiento (AWWA, 1998).

Las primeras membranas de poliamida fueron desarrolladas por la compañía Dupont, la cual probó un amplio rango de polímeros en su investigación en busca de un material superior en rendimiento al acetato de celulosa. Su elección fue recayó sobre la poliamida y hoy en día sus membranas asimétricas de fibra hueca están siendo fabricadas todavía de una poliamida aromática. Estos materiales tienen excelentes propiedades de retención, pero su rendimiento de caudal tiende a ser menor que el acetato de celulosa, aunque las membranas pueden operarse en un más amplio rango de pH que las de acetato de celulosa (pH 4 a 9 en continuo) y son estables a la degradación bacteriana, aunque susceptibles a la degradación por oxidación. Las poliamidas son sensibles al cloro residual y, aunque la tasa a la que sucumben al ataque del cloro está en función del pH, su rendimiento se deteriora gradualmente según la exposición (AWWA, 1998).

La elección entre acetato de celulosa o distintos tipos de poliamida parece inclinarse cada vez más por estas últimas. Los mayores rechazos de sales, superiores producciones y menores consumos energéticos las hacen más eficientes (Medina, 2000).

Las membranas de acetato de celulosa siguen todavía manteniendo una participación importante 10% del total de las plantas desaladoras en el mundo, debido fundamentalmente a su mejor respuesta en aguas altamente contaminadas y a su mayor facilidad de fabricación que las hace más baratas.

Además, su mayor resistencia a la cloración les da ciertas ventajas, puesto que admiten la dosificación de cantidades reducidas de cloro de una forma continua, permitiendo su esterilización y la de los circuitos hidráulicos. Por esto, en instalaciones desaladoras con tomas abiertas y contaminadas se están utilizando también este tipo de membranas.

Las membranas para agua de mar debe de tener propiedades de retención de sal muy altas para producir agua de calidad potable en un sólo paso. El agua de mar tiene un contenido de SDT de 35,000 mg/l y para poder cumplir con las normas establecidas para agua potable, con porcentajes de recuperación mayores al 35% deben de tener eficiencias de eliminación de sales de más del 99%. Las membranas de agua de mar están expuestas a presiones de trabajo muy elevadas debido a la elevada presión osmótica del agua de mar de alimentación (AWWA, 1998).

La mayor duda en la elección de membranas se presenta para aguas de salinidades intermedias, entre 2,500 y 5,000 mg/l, pues en este rango existen distintos tipos de membranas que se adaptan perfectamente. Principalmente la selección debe de hacerse entre membranas de mediana presión que tiene elevados rechazos y caudales, y membranas de ultrabaja presión de caudales y rechazos ligeramente inferiores.

Las membranas tanto de poliamida como de acetato de celulosa que se encuentran actualmente disponibles en el mercado son:

**Tabla 4.6. Clasificación de las distintas membranas de ósmosis inversa disponibles (Fariñas, 1999).**

Tipo de polímero	Fabricante	Nombre comercial	Clasificación	
			Naturaleza	Forma
Acetato de celulosa modificado	Fluid Systems	Roga	Integral	Plana
	Hydronautics	CAB	Integral	Plana
	Nitto Dekon	NTR 1500/1600	Integral	Plana
	Troay	SC	Integral	Plana
	Desalination Systems	Desal CA	Integral	Plana
	Premetec	AC	Integral	Plana
	Osmonics	Sepa	Integral	Plana
	Trisep	SB	Integral	Plana
Triacetato de celulosa	Toyobo	Hollsep	Integral	Fibra hueca
	Dow chemical	Dowex LP SP	Integral	Fibra hueca
Poliamidas aromáticas lineales	Du Pont	B9, B10	Integral	Fibra hueca
Poliamidas aromáticas con entrecruzamientos	Fluid Systems	TFLC	Compuesta	Plana
	Hydronautics	CAP/SWC/ESPA	Compuesta	Plana
	Nitto Dekon	NTR/SF/SR/UP/SWC	Compuesta	Plana
	Permetec	PA	Compuesta	Plana
	Troay	SU 700/800	Compuesta	Plana
	Desalination Systems	Desal 3	Compuesta	Plana
	Filmtec	FT-30	Compuesta	Plana
	Trisep	ACM	Compuesta	Plana
	PCI	ZF99	Compuesta	Plana

Pero el objetivo final en la selección de una u otra membrana será siempre el de obtener los costos más bajos, teniendo en cuenta tanto la inversión como el funcionamiento, pero respetando siempre las exigencias del producto.

#### 4.5.3 Selección de membrana

Como se mencionó anteriormente el mercado de membranas para desalación se ha reducido a tan sólo dos opciones las membranas de acetato de celulosa y las de poliamida, que en su mayoría son de tipo plano, con la excepción de las membranas fabricadas por Dupont, que son de fibra hueca.

Por ello, la elección de uno u otro tipo de membrana no representa mayor dificultad en la actualidad a la hora de realizar el diseño, ya que si bien es cierto que la membrana es la parte central del sistema de ósmosis inversa, las membranas fabricadas de poliamida han demostrado en los últimos años tener mayor rechazo de sales, superiores producciones y menores consumos energéticos, así que siempre la primera opción a considerar serán este tipo de membranas que además de ser más eficientes en cuanto a la producción, son químicamente más estables y nos permiten rangos de operación mayores en cuanto a pH y temperatura.

El descartar la opción de membranas fabricadas con poliamida, se da sólo en el caso en que el agua de alimentación sufra de una severa contaminación y sea indispensable que después de la cloración exista una baja concentración de cloro residual para asegurar la esterilización de los módulos y los circuitos hidráulicos.

En caso de que la reducción de los costos de operación no sea significativa se debe evaluar que la fabricación este tipo de membranas es más económica, y en plantas de tamaño medio se puede llegar a justificar introducir un mayor número de módulos de acetato de celulosa que en el caso de seleccionar módulos de poliamida si la inversión inicial resulta menor.

## 4.6 Módulos

### 4.6.1 Parámetros técnicos

Un módulo de ósmosis inversa se caracteriza por una serie de parámetros técnicos que se utilizan al diseñar una instalación, con objeto de hacer una estimación o proyección de la calidad del agua que se va obtener. Dichas características son; rechazo, presión, temperatura, conversión y factor de ensuciamiento.

#### *Rechazo*

Es la característica principal de la membrana y la que permite definir su campo de acción en función del agua que se desea tratar.

El diseño de la instalación de membranas depende tanto de la calidad del agua que se desea tratar como de la que se quiere conseguir.

No existe una membrana perfecta que elimine el 100% de las sales contenidas en el agua que pasa a través de ellas, pero el desarrollo tecnológico ha permitido acercarse cada vez más a esta cifra. Los parámetros que caracterizan a una membrana desde este punto de vista son dos:

- Paso de sales, que como vimos anteriormente es el porcentaje de sales que pasan a través de la membrana; se determina midiendo la concentración de sales del agua de alimentación y el agua producto.
- Rechazo de sales, que es el porcentaje de sales que rechaza la membrana y se determina a través del paso de sales; por tanto, es el complemento del paso de sales, de forma que si una membrana tiene un paso de sales de 4% tendrá un rechazo de 96%.

#### *Presión*

La presión a la que funciona la membrana debe de ser la necesaria para vencer la presión osmótica diferencial entre las soluciones, existente a un lado y a otro de la membrana, y dar un caudal suficiente.

Dependiendo del tipo de módulo de que se trate, existe una presión máxima de operación que no puede rebasarse, produciendo un descenso de la permeabilidad de la membrana por compactación o destrucción.

### *Temperatura*

Es aquella a la que se realiza el proceso, que lógicamente será variable en función del lugar geográfico o la época del año en que se realice el tratamiento.

### *Conversión o recobro*

Es la relación, expresada en porcentaje, del caudal que puede desalarse a partir de un determinado caudal de alimentación y que puede variarse a voluntad, pero dentro de unos límites muy concretos.

A medida que se incrementa el recobro de la instalación, más agua a tratar se aprovecha y se reduce en consecuencia el volumen de salmuera que hay que eliminar.

En cambio la membrana, en función de sus características, rechaza una cantidad o porcentaje fijo de sales que se concentran en la salmuera; por tanto, cuanto menor sea el caudal de rechazo más concentrado será éste. Es decir, que la conversión está limitada por la concentración de sales en la salmuera, o dicho de otro modo por el coeficiente de solubilidad de las sales en la salmuera.

Como se sabe que todas las sales se disuelven en el agua, no obstante su poder de disolución es limitado y está determinado por el índice de solubilidad de cada sal. Una vez rebasado dicho coeficiente, la sal empieza a precipitar en la solución.

En el caso de las membranas de ósmosis inversa el problema viene acrecentado por el hecho de que esa precipitación se produce sobre la superficie de la membrana, con lo que provoca la obstrucción de sus poros.

El resultado es una modificación de las características de la membrana, principalmente caudal y rechazo de sales.

Cuanto menor es la conversión, menor es el riesgo de precipitación de sales, por lo que una de las formas de garantizar el funcionamiento prolongado de una instalación de desalación es reduciendo la conversión, aunque ello tiene otras implicaciones económicas en cuanto a la inversión y los costo energético.

También puede mejorarse la conversión, y de hecho es lo que se hace normalmente en las instalaciones de agua, de las siguientes formas:

- Regulando el pH. Dado que la solubilidad de las sales varía con el pH de la solución, podemos regular el pH de ésta hasta un valor en el que el coeficiente de solubilidad de sales con mayor tendencia a precipitar, en

función de su contenido en el agua de alimentación, sea mayor.

- Actuando sobre la temperatura. Puesto que la temperatura tiene también una incidencia en la solubilidad de una sal, subiendo o bajando ésta se mejora la eficiencia en el caso de algunos elementos como el sílice, la influencia de la temperatura es fundamental para mejorar su solubilidad, normalmente bastante baja.
- Añadiendo antiincrustantes que permitan mantener las sales de la salmuera en un estado de supersaturación, varias veces superior a los límites de solubilidad habituales.

#### *Factor de ensuciamiento*

Como se ha venido insistiendo, las condiciones físicas y/o químicas del agua a tratar producen un ensuciamiento más o menos importante en las membranas, que hacen descender sus prestaciones.

Esto debe de considerarse en el diseño y se refleja en lo que se conoce como factor de ensuciamiento.

Dicho índice es un número, menor a la unidad, que trata de expresar el deterioro que experimenta la membrana cada año, tanto en el caudal como en el rechazo de sales, a consecuencia del uso.

Este parámetro o coeficiente teórico que utilizan los fabricantes, aunque bastante subjetivo, permite la obtención de un margen de seguridad en el funcionamiento de la instalación.

#### **4.6.2 Módulos comerciales**

Como se mencionó las membranas que se utilizan en las plantas de desalación de ósmosis inversa son únicamente dos y estas están disponibles en módulos de enrollamiento espiral y fibra hueca.

Este tipo de módulos son los más utilizados principalmente por tener la mayor superficie de membrana, lo cual se traduce en un mayor caudal por módulo. En el caso de la desalación el porcentaje de recobro en cada etapa no supera el 50%. Por lo cual para tener un caudal adecuado es necesario utilizar módulos de enrollamiento espiral o fibra hueca, ya que de otra forma las dimensiones de la planta serían excesivas al igual que los costos de instalación y operación por el gran número de módulos que se tendría.

Tabla 4.7. Comparación entre los distintos tipos de módulos (Farifias; 2000).

Características		Tipo de modulo			
		De placas	Tubular	Espiral	Fibra Hueca
Superficie de la membrana por módulo (m <sup>2</sup> )		15-50	1.5-7	30-34	370-575
Volumen de cada módulo (m <sup>3</sup> )		0.30-0.40	0.03-1	0.03	0.04-0.08
Caudal por módulo (m <sup>3</sup> /día)		9-50	0.9-7	30-38	40-70
Grado de compactación (m <sup>2</sup> de membrana por m <sup>3</sup> )		50-125	50-70	1,000-1,100	5,000-14,000
Productividad por unidad de superficie (m <sup>3</sup> /día*m <sup>2</sup> )		0.6-1	0.6-1	1-1.1	0.1-0.15
Productividad por unidad de volumen (m <sup>3</sup> /día*m <sup>3</sup> )		30-125	30-70	1,000-1,250	900-1,500
Conversión por módulo (%)		10	10	10-50	30-50
Pérdida de carga por tubo de presión (bar)		2-4	2-3	1-2	1-2
Sustitución e intercambiabilidad por otra marca		Nula	Nula	Total	Nula
Tolerancia frente a sustancias coloidales		Mala	Buena	Mala	Mala
Tolerancia frente a materia en suspensión		Mala	Buena	Mala	Muy Mala
Comportamiento frente a las limpiezas	Mecánica	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Química	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Con agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Pretratamiento necesario		Coagulación filtración (5 µm)	Filtración	Coagulación filtración (5 µm)	Coagulación filtración (1 µm)
Aplicaciones		Alimentación. Líquidos poco cargados. Concentración y recuperación de sustancias	Alimentación. Aguas residuales y líquidos poco cargados. Concentración y recuperación de sustancias	Desalación. Obtención de aguas ultrapuras Aguas residuales y líquidos poco cargados.	Desalación. Obtención de aguas ultrapuras. Aguas residuales y líquidos poco cargados.

Como se puede ver en la tabla 4.7, las cualidades de separación de contaminantes son las mismas en todos los módulos, ya que las características de las membranas que se utilizan no son muy distintas, incluso en algunos son las mismas. Pero en cuanto a la eficiencia de éstos, se ve una clara ventaja en la utilización de los módulos de fibra hueca y enrollamiento espiral sobre todo en la desalación.

### *Módulos de enrollamiento espiral*

Los módulos de enrollamiento espiral que en la actualidad se ofrecen están normalizados, no solo con el propósito de ser comparados entre sí en torno a sus condiciones de funcionamiento, sino también para poder sustituir unas por otras.

Esta normalización se basa fundamentalmente en el diámetro exterior de la membrana que suele ser de 4 u 8". En cuanto a su longitud, las membranas más comerciales suelen ser de 1 metro, aunque en las de 8" se fabrican de 1.5 m. Precisamente esta última longitud se está introduciendo cada vez más con objeto de aumentar el caudal, ya que se aprovecha mejor el espacio disponible.

Existe gran cantidad de opciones comerciales de módulos de enrollamiento espiral, ya que todos los fabricantes de membranas de ósmosis inversa los producen, con características muy similares. Por sus condiciones de operación y características de operación este tipo de membranas se pueden agrupar en tres grandes grupos en función de su presión de trabajo:

- **Muy baja presión:** Trabajan con presiones de entre 5 y 10 bares. Se utilizan para desalar agua de baja salinidad (entre 500 y 1,500 mg/l) y producir agua ultrapura.
- **Baja presión:** Trabajan a una presión de entre 10 y 20 bares. Se utilizan para desalar aguas con una salinidad media (entre 1,500 mg/l y 4,000 mg/l), así como para reducir o eliminar de ella ciertos compuestos como nitratos, sustancias orgánicas etcétera.
- **Media presión:** Presión de trabajo entre 20 y 40 bares. Desde el punto de vista histórico, éstas fueron las primeras membranas que se comercializaron. Aunque se han venido empleando para desalar aguas con una elevada salinidad (entre 4,000 y 10,000 mg/l), en la actualidad sus aplicaciones se han generalizado utilizándose en múltiples procesos de separación y concentración.
- **Alta presión:** Estas membranas se han desarrollado para poder obtener agua potable a partir del agua de mar. Su presión de trabajo, debido a la elevada presión osmótica del agua de mar, está entre 50 y 80 bares. La meta de los distintos fabricantes de este tipo de membranas no fue sólo obtener agua potable a partir del agua de mar, sino hacerlo de un sólo paso.

Como las recomendaciones de la OMS para el agua potable indicaban que su contenido máximo de sales disueltas no deberían de superar los 500 mg/l, el porcentaje mínimo de rechazo de sales que debían presentar estas membranas tenía que ser del orden del 99%.

Las condiciones a las que los fabricantes prueban sus membranas se resumen en la tabla 4.8 a partir de la cual se puede seleccionar el tipo de módulo que se requiere y conocer las condiciones de operación con base en la salinidad del agua.

Tabla 4.8. Condiciones de prueba de módulos de enrollamiento espiral (Medina, 2000).

Tipo de módulo	Salinidad (mg/l)	Temperatura (°C)	pH	Presión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Conversión (%)
Muy baja presión	500- 1,500	25	6.5-7.0	5.5-10.2	10
Baja presión	1,500-4,000	25	5.0-6.5	15.5	10
Media presión	2,000-10,000	25	6.5-7.0	27.6	10-15
Alta presión	32,000-35,000	25	6.5-7.5	55.2	10

#### *Módulos de fibra hueca*

Los módulos de fibra hueca, tienen una mayor capacidad unitaria, se considera que son módulos individuales y sus diámetros comerciales son variables y específicos de cada fabricante. Ello impide con carácter general la sustitución de unas membranas por otras de distintos fabricantes.

Los módulos de fibra hueca disponibles actualmente sólo son ofrecidos por tres fabricantes. Las opciones existentes permiten desalar cualquier tipo de agua ya que hay configuraciones para alta, media y baja presión como se muestra en la tabla 4.9:

Tabla 4.9. Características de los módulos de osmosis inversa del tipo fibra hueca (Fariñas, 1999).

Fabricante	Du Pont		Dow Chemical		Toyobo	
Marca	Permasep		Dowex		Hollsep	
Modelo	B-9	B-10	LP	SP	HF	HR
Presión de trabajo	Media	Alta	Baja	Media	Baja/media	Alta
Material de la membrana	PA	PA	CTA	CTA	CTA	CTA
Diámetro exterior de la fibra hueca (micras)	91	95	250	250	175	165
Diámetro interior de la fibra hueca (micras)	44	42	120	120	80	70
Densidad de empaquetado de la fibra hueca (%)	60	60	70	70	50	55
Espacio entre fibras (micras)	12	13	15	15	57	32
Disposición de las fibras huecas	Paralela	Paralela	Paralela	Paralela	Cruzada	Cruzada
Papel poroso separador	Sí	Sí	Sólo funda exterior	Sólo funda exterior	No	No

Nota: PA corresponde a poliamida aromática y CTA a triacetato de celulosa

#### 4.6.3 Diferencias principales entre los módulos

Dejando a un lado las diferencias que existen en función del material constitutivo que ya se discutió anteriormente, según sean poliamidas o acetato de celulosa, existen algunas diferencias según sean las membranas de fibra hueca o enrollamiento espiral.

##### *Caudal*

Las membranas en espiral son más permeables, tienen mayor caudal unitario que las de fibra hueca, pero estas últimas, al tener mayor superficie por módulo, son finalmente de mayor capacidad. En consecuencia, en una instalación de determinada capacidad de producción, al ser menor la cantidad de membranas de fibra hueca ocupan menos espacio que las de enrollamiento espiral.

### *Presión de funcionamiento*

La menor permeabilidad de las membranas de fibra hueca exige mayores presiones transmembrana para vencer la presión osmótica. Por tanto las presiones de funcionamiento suelen ser mayores. Por ello, la resistencia que deben tener ambos tipos de membranas es distinta y así como las membranas de fibra hueca de agua de mar se fabrican para soportar presiones de 84.0 kg/cm<sup>2</sup>, las de enrollamiento espiral soportan 70.5 kg/cm<sup>2</sup>.

La consecuencia fundamental de esto es el mayor consumo energético que en general tienen las instalaciones de fibra hueca.

### *Ensuciamiento*

La gran compactación que se consigue con los módulos de fibra hueca determina espacios muy pequeños entre las fibras, normalmente inferiores a 20 micras.

En cambio en las membranas de enrollamiento espiral los canales hidráulicos que se determinan mediante las mallas separadoras son bastante superiores, por lo que, al menos desde el punto de vista teórico, las membranas de fibra hueca son más propensas a ensuciarse u obstruirse que las espirales. De hecho los fabricantes de las primeras exigen que el SDI del agua a tratar sea de 4, mientras que en las otras se permite valores de dicho índice no superiores a 5.

### *Rechazo de sales*

Las membranas de fibra hueca suelen tratar rechazos inferiores a las de enrollamiento espiral. Así como en estas últimas valores del 95% son normales y algún fabricante incluso ofrece productos con rechazo del 99.8%, los de fibra hueca no superan el 99.4%

Sin embargo, en las instalaciones donde se cuenta con módulos de fibra hueca, se obtiene calidad más alta que en la que se emplea el otro tipo de módulos.

La justificación aparente de esta contradicción se encuentra en la mayor superficie de membrana que tiene las instalaciones de fibra hueca y la mayor recuperación por elemento, 35-50% frente al 10-15%. De esta forma, las sales que atraviesan la membrana se disuelven en un volumen mayor desde la primera membrana por lo que la concentración de éstas es menor y en consecuencia el producto de menor salinidad.

En las módulos de enrollamiento espiral como se colocan 6 o más en un mismo tubo de presión, el permeado que sale de la primer módulo es de excelente calidad, pero a medida

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

que avanza a través de tubo de presión se va concentrando y la presión de alimentación disminuyendo, por lo que en cada módulo el caudal producido es menor y la salinidad mayor que en la membrana anterior.

### **4.5.4 Selección de módulo**

Con base en el conocimiento de las características del agua se decide el tipo de módulo que se va a utilizar, tanto desde el punto de vista de la configuración, como de los materiales que lo componen o sus características de rechazo de sales.

Sobre el tipo de configuración, fibra hueca o enrollamiento espiral, no hay razones categóricas que determinen el que sea una u otra la membrana elegida; no obstante, pueden existir algunas ventajas de una configuración sobre otra, dependiendo de la concentración de sales presentes en el agua de alimentación y la captación de la misma.

#### *Agua de mar*

Cuando la captación se realiza a través de un pozo playero y por tanto sin contaminación orgánica o actividad biológica, no debe de existir preferencia por ningún tipo de configuración, aunque con carácter muy amplio puede decirse que en igualdad de condiciones el permeado producido por las membranas de fibra hueca es de calidad superior, es decir, de menor salinidad que el correspondiente al enrollamiento espiral, el consumo energético de las instalaciones de dichas membranas, también en igualdad de circunstancias, es ligeramente superior.

Así que cuando la captación de agua se realiza de forma abierta o en lugares con contaminación orgánica, los resultados suelen ser mejores con las membranas de enrollamiento espiral.

La mayor compactación interna de las membranas en los módulos de fibra hueca deja un espacio más estrecho entre fibras y favorece la existencia de puntos muertos, lo que facilita el ensuciamiento, especialmente el biológico, y la dificultad de limpieza.

Sin embargo, esta ligera ventaja de las módulos espirales no es absoluta y en los últimos desarrollos de membranas de fibra hueca se está tanto acortando la longitud de las fibras como realizando otro tipo de empaquetado, con objeto de reducir los citados puntos muertos y ampliar los canales entre las fibras (Medina, 2000)

Existen también experiencias positivas en el funcionamiento correcto de membranas de fibra hueca en situaciones difíciles, adoptando un pretratamiento adecuado.

### *Agua salobre*

En la mayor parte de los casos se trata de instalaciones que utilizan el agua subterránea a través de pozos, con lo que la solución de los problemas de pretratamiento se facilitan, puesto que el agua viene filtrada a través de los estratos del terreno y en general la actividad biológica es menor. Sin embargo, si la captación fuera de agua superficial, o si las aguas están contaminadas por los retornos de riego, los problemas pueden ser muy similares a los del agua de mar.

La mayor variedad de módulos y el mayor número de fabricantes de enrollamiento espiral, hacen de este tipo el preferido en la mayoría de los casos, puesto que especialmente los últimos desarrollos en cuanto a rechazo de sales y consumos energéticos permiten ofrecer una mayor gama de membranas y por tanto mejor adaptación a las especificaciones de los diferentes tipos de agua.

Sin embargo, la característica más importante en los módulos de enrollamiento espiral, es su intercambiabilidad, ya que en algunos casos una vez que se ha construido la planta de desalación puede suceder que por circunstancias no previstas existan cambios en la química del agua. Este tipo de módulos ofrece la posibilidad de cambiar por otro tipo de módulo (con mayor o menor rechazo de sales o bien otro tipo de membrana) sin necesidad de cambiar tubos de presión tuberías, soportes, válvulas etcétera.

Esta última característica es la que ha originado que la mayoría de los módulos que se utilizan en la actualidad sean de enrollamiento espiral, y que de los siete fabricantes de membranas para desalación por medio de ósmosis inversa en su mayoría ofrecen módulos de este tipo y tan sólo tres de ellos ofrecen módulos de fibra hueca.

## 4.7 Agrupación de los módulos

### 4.7.1 Bastidores de ósmosis inversa

Están constituidos por una estructura metálica sobre la cual se colocan los distintos tubos de presión, debidamente sujetos para evitar posibles desplazamientos como consecuencia de golpe de ariete que se produce en el arranque de la instalación.

Al aumentar la capacidad del bastidor la altura del mismo también lo hace, por lo que pueden resultar incómodas algunas operaciones de manipulación. Debe estudiarse por tanto la distribución adecuada de los módulos para evitar alturas innecesarias. Sobre estos bastidores se sujetan también tanto colectores de alta presión de alimentación y rechazo, como los de baja presión de agua de producto.

En la parte superior de todos ellos es conveniente disponer de llaves de purga para la eliminación del aire en los arranques de la instalación.

La separación de los bastidores debe de ser suficiente para poder realizar trabajos de mantenimiento entre ellos. Asimismo, entre los extremos anterior y posterior de los bastidores y las paredes intermedias más próximas debe de existir una distancia mínima de 2 metros en tubos de enrollamiento espiral de 6 módulos y tres en los de 7, para facilitar la instalación tanto de los tubos como la de los módulos.

En las figuras 4.15 y 4.16 pueden verse distintos bastidores para módulos de enrollamiento espiral y de fibra hueca. Generalmente, todos los tubos y módulos de una línea de producción se agrupan en un sólo bastidor, aunque se trate de dos o tres etapas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

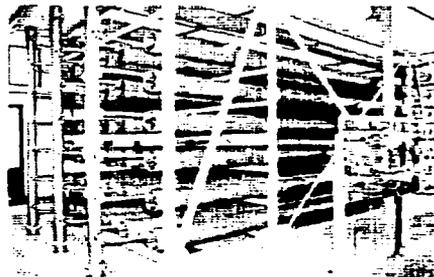


Figura 4.15. Bastidores de módulos con enrollamiento espiral (Medina, 2000).



Figura 4.16. Bastidores de módulos de fibra hueca (Medina, 2000).

Sin embargo, cuando existe un segundo tratamiento de afine que procesa el producto del primer paso, se colocan dos o más bastidores independientes, cuyo tamaño va lógicamente en disminución.

Como las módulos tiene conductos para el producto y la salmuera abiertos en ambos extremos, los colectores de uno y otro tipo pueden colocarse a conveniencia tanto en su parte frontal como trasera.

La salida de cada módulo individual es conveniente colocarla, en el caso de los bastidores con membranas de fibra hueca, y en la de cada tubo de presión, en el de los módulos de enrollamiento espiral, una conexión con tubo muy fino que permita realizar la correspondiente toma de muestras periódicamente.

Las distintas tuberías de toma de muestras del conjunto del bastidor se conducen a un panel, provisto de un conductivímetro en el que se dispone de válvulas que permiten controlar la calidad del agua de producto en cada instante y detectar cual o cuales son las membranas defectuosas cuya excesiva salinidad afecta la salinidad del producto.

Las membranas separadoras tiene hasta un 60% de agua en su composición, por lo que deben estar permanentemente húmedas.

Si se dejan secar, se contraen, pudiéndose desprender la capa de separación de la capa de soporte, arruinándose irreversiblemente.

Por esta razón, cuando las membranas están fuera de servicio, se conservan en una solución que además contiene biosulfato sódico que actúan como conservante.

Otra situación es la que se presenta cuando se para una instalación. Entonces las dos caras de la membrana están en contacto con agua, pero al no existir presión se produce el fenómeno de ósmosis natural, que arruga y encoge la membrana inutilizándola. Por tanto, cuando la planta se hace parar, hay que suministrar agua en el lado del producto.

En consecuencia es necesario diseñar la instalación para que haya siempre humedad en ambos lados. Esto se consigue en las instalaciones pequeñas dando a la tubería de agua de producto, mediante un sifón, un recorrido ascendente hasta una altura al menos igual al módulo más alto, de forma que siempre exista agua en el sifón.

Para instalaciones de mayor capacidad puede disponerse además de un depósito elevado; según el tamaño del bastidor puede ir colocado sobre el mismo o en otro lugar diferente pero también elevado.

El colector de agua producto a la salida del bastidor se hace pasar este depósito antes de llevarlo al depósito general de almacenamiento de la instalación (Medina, 2000).

La entrada del agua desalada a este depósito, que se conoce también como depósito de compensación, se hace en la parte inferior de este y la salida es por la parte superior.

De esta forma se garantiza que al pararse la instalación por cualquier causa el agua desalada existente en este depósito retrocede y empapa a las membranas.

Cuando las membranas son de poliamida aromática de enrollamiento espiral, aunque el depósito también es conveniente, sus exigencias son menores, de forma que existen instalaciones que no disponen del mismo.

Cuando por las dificultades constructivas, la altura del bastidor o su tamaño, no es posible colocar el citado depósito en su parte superior, puede instalarse en otro lugar a nivel inferior y utilizar una pequeña bomba con sistema automático de puesta en marcha, al producirse el paro del bastidor.

La capacidad del depósito de equilibrio osmótico debe de ser la suficiente para llenar las membranas del bastidor y sus correspondientes colectores de interconexión.

#### **4.7.2 Número de módulos**

Partiendo del caudal que es necesario producir, y de los datos de superficie por módulo y flujo elegido, se tiene la primera cifra de módulos necesarios, que permite iniciar una serie de tanteos hasta dar con el número apropiado.

Con carácter general puede decirse que las cifras de producción nominal que aparecen en los catálogos de módulos responden a pruebas realizadas en unas condiciones estándar de salinidad, presión, temperatura y conversión, que normalmente no van a coincidir con las de la situación particular de la instalación que queremos diseñar.

Pero además, existen otra serie de circunstancias que nos obligan a realizar sucesivos ajustes en el número de módulos:

- Por ejemplo, en los módulos espirales, los tubos de presión en que se alojan los módulos son normalmente para capacidad de 6 o 7 módulos, por lo que si queremos salirnos de ese número es necesario solicitar al fabricante pedidos especiales que tiene un costo superior.
- Los fabricantes suelen recomendar unos límites máximos de recuperación por módulo que no conviene sobrepasar, por tanto el número de módulos hay que ajustarlo dentro de estos valores.
- La producción de una membrana está en función de la presión que se aplica y de la salinidad del agua que se va a desalar.

Cuanto más salina es el agua, mayor es su presión osmótica y más elevada por tanto la presión que debe de aplicarse al módulo para obtener el caudal nominal de permeado.

Como el caudal de rechazo de un módulo se utiliza como caudal de alimentación del siguiente, el agua se va concentrando al pasar de un módulo a otro mientras que la presión de alimentación se va reduciendo como consecuencia de la pérdida de carga. Por tanto, el caudal que produce un módulo es superior al del siguiente.

Si representáramos gráficamente esta situación de cada módulo, en el interior de un tubo de presión, respecto al caudal, se obtiene una línea descendente como la de la figura 4.17 y el caudal medio por módulo, representado por la línea de punteada es también inferior al nominal.

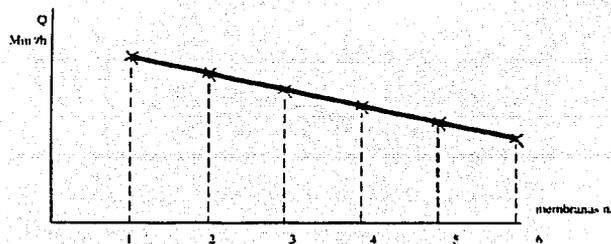


Figura 4.17. Variación del caudal de los módulos de un tubo de presión (Medina, 2000).

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Si se determina la recuperación de cada elemento, se comprueba que esta es descendente, de forma que el caudal medio suele estar alrededor del 60-70% del nominal y es el que se emplea en el diseño.

La causa es el continuo descenso de presión neta, dado que la presión aplicada disminuye por el rozamiento con las membranas y la presión osmótica aumenta al hacerlo la salinidad del rechazo.

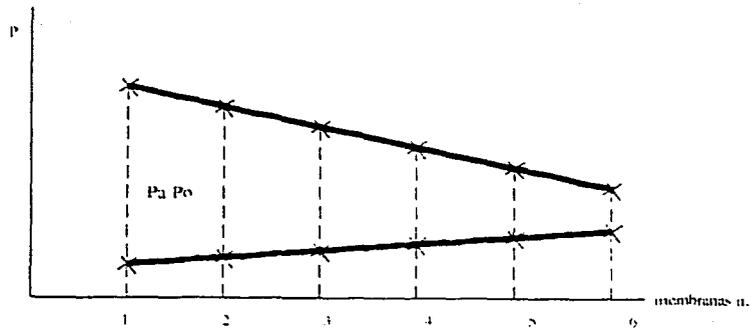


Figura 4.18. Curvas de variación de presiones de alimentación y osmóticas (Medina, 2000).

Estas diferencias se traducen en la práctica en la mayor recuperación que se consigue en los tubos de presión de la primera etapa.

Por ejemplo, si queremos diseñar una instalación de 20,000 m<sup>3</sup>/día de capacidad utilizando módulos de producción nominal de 28 m<sup>3</sup>/día, según los datos del fabricante, tendríamos:

$$\begin{aligned} \text{Caudal real del cálculo del módulo :} & \quad 28 \cdot 0.7 = 19.6 \text{ m}^3/\text{día} \\ \text{Numero de membranas:} & \quad 20,000/20 = 1,000 \end{aligned}$$

Si alojamos en un tubo seis membranas tendríamos:

$$\begin{aligned} \text{Tubos de presión:} & \quad 1,000/6 = 166.67 \text{ tomaríamos } 167 \\ & \quad \text{tubos de presión} \end{aligned}$$

Este sería el punto de partida del diseño, puesto que a partir de aquí habría que comprobar otros parámetros del sistema, antes de decidir finalmente cual sería el número final.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Pero además el diseño se hace, no pensando en el arranque de la planta, sino en su situación al cabo de 3 o 5 años.

Desde el mismo momento de su puesta en funcionamiento, la membrana empieza a perder caudal y rechazo a un ritmo generalmente muy lento, como consecuencia de dos factores:

- La presión a que se ve sometida y que le produce compactación.
- El aporte de partículas que superan todos los elementos del pretratamiento.

Por tanto sus datos iniciales de funcionamiento deben de ser corregidos, para establecer predicciones a los 3 o 5 años citados.

Esta corrección se considera mediante lo que se conoce como coeficiente de ensuciamiento, (FF) por sus siglas en inglés y que se describe detalladamente en el capítulo 5.

La compactación depende de la temperatura del agua y de la presión aplicada, como se observa en la figura 4.19.

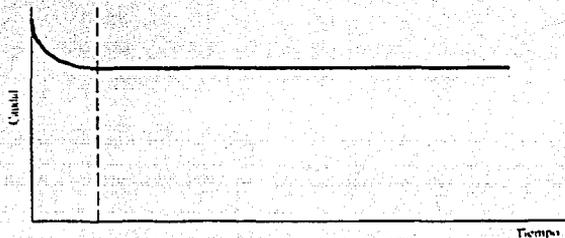


Figura 4.19. Curva de compactación de la membrana (Medina, 2000).

Esta curva varía según el fabricante del módulo, y generalmente no está a disposición del proyectista.

El segundo aspecto a considerar se contempla como un coeficiente reductor entre el 5 y 10 % según el tipo de agua a tratar. Así pues el FF es un coeficiente reductor que incluye el conjunto de ambos aspectos.

Queda un último punto a considerar: el flujo específico, es decir, el caudal que se recupera por unidad de superficie unitaria por membrana (GFD).

Calcularíamos el factor de diseño GFD en cada caso que sería para nuestro ejemplo

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

anterior y suponiendo una superficie de 300 pies cuadrados:

$$20,000 \times 1,000 / (167 \times 6 \times 300 \times 3.785) = 17.57 \text{ GFD}$$

Por tanto este número de tubos y membranas sería válido, si suponemos que para agua de mar proveniente de un pozo profundo se recomienda de 18 a 22 GFD. Si las condiciones de toma fueran otras más complicadas habría que cambiar el diseño incrementando el número de membranas y tubos.

En el caso de los módulos de fibra hueca ocurre lo mismo, si bien al colocarse únicamente dos membranas en serie, las diferencias entre una y otra no son tan grandes como en el otro caso y las recuperaciones tampoco.

El caudal de diseño de partida es pues el nominal del módulo cuando esta se utiliza aisladamente y un 80-85% cuando se utiliza por parejas.

### **4.7.3 Número de etapas**

#### *Conversión*

La elección de la conversión o recuperación del sistema no es un parámetro que pueda decidir libremente el técnico, sino que está condicionada por la composición iónica del agua que se va a tratar.

Las sales rechazadas por la membrana se concentran en el rechazo donde pueden superar su límite de solubilidad y precipitar sobre ella.

Las principales sales que crean estos problemas son el bicarbonato de calcio, el sulfato cálcico, el fluoruro cálcico y el sílice. En el agua de mar también los sulfatos de bario estroncio y magnesio.

El control de los precipitados de carbonato de calcio se realiza mediante la determinación del índice de saturación de Langelier en el caso de los bicarbonatos y de la constante de su producto de solubilidad para los sulfatos.

Como es conocido, el índice de Langelier viene definido por la fórmula:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHs}$$

Donde:

$$\text{pH} = \text{Valor determinado en el análisis del agua.}$$

$pH_s$  = el pH de saturación calculado.

La determinación de este último se hace a partir de:

$$pH_s = pCa - pAlk - C$$

$$C = \text{Incrustación} = pK'_2 - pK'_s$$

En el caso del agua de mar, dada su mayor fuerza iónica, se emplea en lugar del índice de Langelier el de Stiff & Davis, dado por:

$$SDSI = pH - pCa - pAlk - K$$

siendo K una constante que tiene en cuenta la temperatura y la fuerza iónica del agua. Un índice de Langelier positivo indica una tendencia a la precipitación de sales. Un índice negativo representa la tendencia agresiva del agua.

La determinación de estos índices así como los productos de solubilidad se explica detalladamente en el anexo 4.

Así, la capacidad de recuperación de los módulos es limitada siendo los valores máximos, según datos de los fabricantes:

- Membranas espirales de agua salobre: 15%
- Membranas espirales de agua de mar: 10%
- Membranas fibra hueca: 40%

Así mismo, cuando se colocan los módulos de enrollamiento espiral en los tubos de presión, los valores máximos de recuperación por tubo de 6 módulos son:

- Agua salobre: 55%
- Agua de mar: 42%
- Agua de mar (tubo de 7 módulos): 45%

### *Etapas*

De lo anterior se puede ver que para implantar sistemas de ósmosis inversa en la desalación de aguas de mar y salobres de manera eficiente, es necesario en algunos casos utilizar más de una etapa.

En las aguas salobres cuando requieran recuperaciones por arriba del 50%, es necesario utilizar más de una etapa:

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

- Un sistema de dos etapas puede operar un 60-75 % de conversión. En este caso la recuperación por módulo es del 7 al 12%.
- Si se recupera más del 75% los elementos individuales superan la conversión por lo que es necesario una tercer etapa.
- Si se opera al menos del 60% de recuperación, se requería de dos etapas, sin embargo, en la práctica se observa que el caudal en ambas etapas es muy desigual, de forma que el de la primera etapa resulta excesivamente grande, por lo que se producen pérdidas de carga excesivas y pueden dañar las membranas. En estos caso es preferible una sola etapa, aunque se fuerce un poco la capacidad de producción de los módulos, con una vigilancia especial sobre los parámetros de ensuciamiento y caudales.

En cuanto al agua de mar, por su elevada salinidad no se aconseja recuperación al 45% debido la elevada concentración que adquiere la salmuera.

Con tubos para módulos de enrollamiento espiral de 6 metros se puede conseguir ese 45% en dos etapas, mientras que con tubos de 7 metros y en una sola etapa la recuperación aconsejable es del 43% pudiendo elevarse hasta el 45 % citado cuando la operación de la instalación es más cuidadosa. En el caso de sólo operar al 43% la disminución de la productividad se compensa con una mejor calidad del producto.

Respecto a la decisión de colocar una o dos etapas, deben de analizarse las circunstancias que ocurren en la instalación.

Si la toma de agua de mar es un pozo playero, es decir, el agua de alimentación no está contaminada y el índice de SDI es muy bajo, cualquiera de las dos soluciones es correcta, pero la de dos etapas permite la recuperación ligeramente superior, aunque una calidad media algo inferior. La recuperación de la primera etapa suele ser un 65% del total y el restante 35% la segunda etapa.

La calidad que se obtiene en la primera etapa es muy superior a la de la segunda y el ensuciamiento a lo largo del tiempo es inferior. Cuando la toma es abierta se obtienen mejores resultados con una sola etapa.

Aunque las instalaciones de ósmosis inversa deben de funcionar de forma ininterrumpida, no siempre ocurre así. En caso de que haya que someter la instalación a sucesivas paradas y arranques es preferible usar tubos de 6 módulos de enrollamiento espiral que de 7. Esto se debe principalmente a que con tubos de 7 módulos son más sensibles al golpe de ariete, esto en muchas ocasiones se alarga debido a este fenómeno originando fugas de agua que contaminan el producto.

En las instalaciones de fibra hueca, al colocarse éstas por pares, son siempre

disposiciones de dos etapas que cubren ampliamente las recuperaciones de agua de mar.

Precisamente con este tipo de membranas se están haciendo intentos de aumentar la recuperación hasta el 55%, sin embargo, la experiencia existente no es grande y conviene ser prudentes con estas elevadas conversiones.

En teoría, la mayor superficie unitaria de la membrana de fibra hueca permitirá recuperaciones superiores a esta cifra, sin embargo, se superarían los límites de solubilidad de algunas de las sales en el rechazo y se requeriría de antiincrustantes fiables y seguros.

### *Colocación de tubos*

La unidad de producción en las instalaciones con membranas de enrollamiento espiral es el tubo de presión, generalmente con 6 o 7 membranas, mientras que en la fibra hueca es la membrana simple o doble.

Para conseguir una producción determinada será por tanto necesario colocar en paralelo las unidades de producción, teniendo en cuenta las limitaciones de recuperación, por tubo o membrana.

Esto nos lleva a establecer un determinado escalonamiento en la colocación de las unidades, que se conoce como arreglo.

A medida que va aumentando el número de etapas, se va reduciendo el número de membranas en cada escalón. Esto es lógico si se tiene en cuenta que el caudal que se procesa en los distintos escalones es sólo una parte del que alimenta a las membranas del primer escalón.

Para mantener las mismas velocidades de circulación y arrastre deberán colocarse menos membranas. De no actuarse de esta manera podrían producirse desequilibrios en el funcionamiento de las membranas y en consecuencia se podrían producir problemas antes de lo esperado. El caudal específico (GFD) de cada escalón debe de mantenerse sensiblemente igual.

En el caos de las membranas espirales, cada escalón suele tener aproximadamente la mitad del número de membranas y tubos que tiene el anterior. Un arreglo normal con estas membranas es 8:4:2, es decir, ocho tubos en la primera etapa, cuatro en la segundo y dos en la tercera.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

En las membranas de fibra hueca las cuales se colocan en parejas, los arreglos normales suelen ser del tipo 1:1 o similares (Medina, 2000).

### Velocidades y flujos

Además debe de tenerse en cuenta que las membranas están sometidas a las leyes hidráulicas y que en consecuencia debe de existir un caudal suficiente para el barrido del concentrado de sales y una red hidráulica en su interior que facilite tanto el paso del agua a través de la membrana como la no deposición sobre la misma de partículas o precipitados.

También deben de mantenerse unas relaciones entre los caudales de salmuera y permeado de la membrana.

Esto nos lleva a acotar entre ciertos límites los caudales que deben de llegar a las membranas. Según datos facilitados por los fabricantes de membranas dichos valores serán:

- Tubos de presión con 6 membranas de enrollamiento espiral

Caudal máximo para membranas 4":	10-40 lpm
Caudal máximo para membranas 8":	40-200 lpm
Caudal de salmuera para membranas 4":	101 lpm
Caudal de salmuera para membranas 8":	401 lpm
Relación concentrado/permeado:	5:1

- Membranas de fibra hueca

Caudal máximo una sola membrana por tubo:	5-150 m <sup>3</sup> /día
Caudal máximo dos membranas por tubo:	50-150 m <sup>3</sup> /día

*Factor beta*

Mide la relación entre la velocidad del agua de alimentación paralela a la superficie de la membrana y la velocidad del permeado perpendicular a la membrana.

Este valor está relacionado con la recuperación de la membrana, pues el aumentar ésta, también lo hace el caudal del permeado en detrimento de la salmuera.

Para efectos de diseño se considera en la mayoría de los casos que este valor sea menor de 1.2. A medida que aumenta el número de membranas en serie (paralelo), disminuye el factor beta.

## 4.8 Equipo de bombeo

En esta parte del diseño se deben de tomar decisiones sobre el equipo de bombeo de alta presión que es el elemento del sistema que implica el mayor consumo de energía de la instalación.

No obstante que en la actualidad las mejoras a las membranas han permitido reducir bastante las presiones de funcionamiento, muy particularmente en el caso de las membranas de agua salobre, y que por tanto en muchos casos los equipos de impulsión son de presiones medianas y bajas, se mantiene este término de bombas de alta presión, porque en los orígenes del proceso todas las bombas eran de alta presión, y además este bombeo es siempre el de mayor presión dentro de la instalación.

El tipo de bomba a utilizar depende de la membrana que, como ya se mencionó puede ser de ultrabaja, baja, media y alta presión y esta se seleccionan dependiendo de la concentración de sales. Sin embargo, además de la concentración de sales se debe considerar que las condiciones del sitio no necesariamente coincide con las condiciones de prueba que se tenían en la fabrica, por lo que es necesario tomar en cuenta esta situación antes de optar por uno u otro tipo de bomba.

### 4.8.1 Presiones de operación

En la práctica el agua de cada instalación desaladora presenta diferencias, aunque sean ligeras, respecto a cualquier otra. En particular por lo que se refiere a las presiones, la instalación va a funcionar en otras condiciones.

Al producirse el arranque de la planta se practica un ajuste a la presión con objeto de que la producción y la salinidad sean los previstos. Dicha presión va a ser lógicamente lo más baja posible puesto que en esos instantes las membranas están completamente nuevas. A partir de ese momento se empieza a producir un paulatino ensuciamiento y compactación de las mismas, por lo que el caudal empieza a descender.

Este proceso continúa a lo largo de todo el tiempo de funcionamiento de la instalación, y si se quiere mantener el caudal nominal de la misma hay que aumentar la presión del agua que alimenta las membranas.

El diseño debe por tanto tener en cuenta este aspecto fundamental y en consecuencia los equipos de presión deben de estar previstos para dar la presión que se requerirá en tres o cuatro años.

El límite superior de dicha presión es el que establece el fabricante para cada tipo de

membrana y que en esencia es el siguiente:

- Membranas de ultrabaja presión: 15.5 kg/cm<sup>2</sup>
- Membranas de baja presión: 20.7 kg/cm<sup>2</sup>
- Membranas de media presión: 27.7 kg/cm<sup>2</sup>
- Membranas de acetato de celulosa: 41.4 kg/cm<sup>2</sup>
- Membranas de alta presión: 69-82 kg/cm<sup>2</sup>

En la práctica no se deben de alcanzar estas presiones pues ello significaría que se está forzando demasiado la membrana, permitiendo un ensuciamiento excesivo de la misma, y, al mismo tiempo, se produce un aumento del consumo energético. Antes de llegar a esas presiones las membranas han debido someterse a un proceso de limpieza adecuado.

Existe una relación directa o lineal entre la presión y el caudal de la membrana, es decir, a mayor presión aumenta la producción, pero esta relación sólo se mantiene mientras la membrana es nueva. Con el tiempo la membrana se va obstruyendo y al aumentar la presión lo único que se consigue es que la suciedad se adhiera con más fuerza a la membrana y que por tanto por muchos aumentos de la presión no consigamos sino que el caudal vaya disminuyendo. Es en este momento en que se debe de proceder al cambio de membranas.

#### 4.8.2 Bombas de alta presión

Lo primero que se debe de definir es el caudal y la presión que debe de suministrar la bomba.

Para fijar el caudal hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Características químicas del agua a tratar, que determinan la conversión máxima a la que se va a trabajar.
- Condiciones de funcionamiento de la instalación, dado que de la forma de operar la planta y la disponibilidad o no de determinados equipos de control nos puede llevar a actuar de distintas maneras

##### *Selección de la bomba*

La selección de la bomba se hará teniendo en cuenta las curvas de funcionamiento y de rendimiento.

Por ello, el caudal con el que se debe de seleccionar debe de quedar a la derecha del punto de máxima eficiencia de la curva. Esto se debe a que el caudal de diseño es el

máximo que va tener que impulsar la bomba, pero no el normal de operación, que será algo menor y por tanto más próximo al punto de eficiencia máxima.

TESIS CON  
FALLA DE

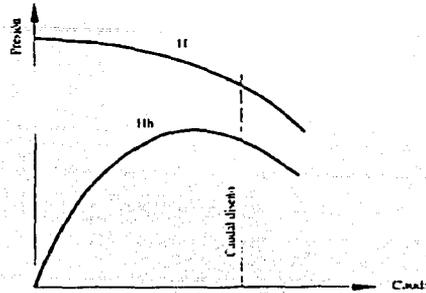


Figura 4.20. Curvas para la selección de la bomba (Medina, 2000).

Respecto a la forma de operar la instalación y por tanto las bombas de alta presión, se presentan dos casos: Funcionamiento continuo con producción constante y funcionamiento a presión constante.

#### Funcionamiento continuo manteniendo el caudal de producción constante

En esta situación y aunque se disponga de equipos de control bastante fiables, las oscilaciones en la producción y las pérdidas de carga en las membranas, están sujetas a múltiples e imprevistas circunstancias que son difíciles de controlar, por lo que frecuentemente hay que operar a un porcentaje de 2 o 3 % por debajo o por encima de la conversión prevista.

Esto obliga a actuar sobre la presión de alimentación de la membrana, que deberá de incrementarse en forma continua.

La regulación del sistema se consigue mediante un medidor de gasto, situado en el permeado, que envía una señal a la válvula de control produciendo una apertura o cierre para producir el aumento o reducción de la presión de alimentación al bastidor que equilibrará las variaciones de caudal detectadas.

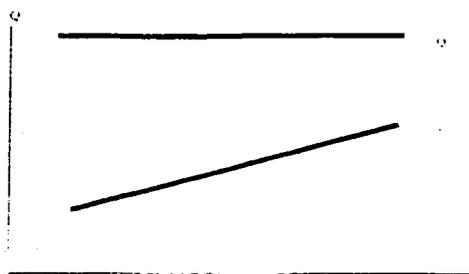


Figura 4.21. Funcionamiento a caudal constante (Medina, 2000)

### Funcionamiento a presión constante

En este caso las membranas se alimentan desde el principio a la presión más alta posible, con lo que el caudal es más alto al principio y va disminuyendo con el tiempo a medida que se produce el ensuciamiento.

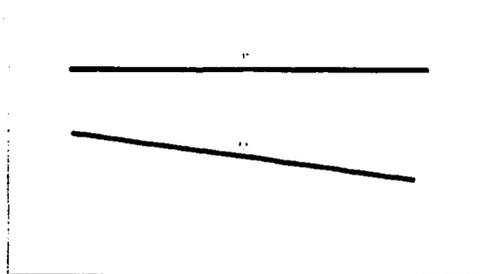


Figura 4.22. Funcionamiento a presión constante (Medina, 2000).

Si se decide operar a una presión inferior a la máxima, un transmisor de presión es el que determina la apertura o cierre de la citada válvula de control para mantener la presión.

## 4.9 Ejemplo de diseño

Para ejemplificar el uso de la desalación de agua por ósmosis inversa como una fuente alternativa de abastecimiento de agua potable en México se eligió la zona norte de le estado de Quintana Roo, conocida como Riviera Maya.

### 4.9.1 Condiciones de la zona

La zona norte de el estado de Quintana Roo cuenta con el 90% de la infraestructura turística del estado y las actividades económicas preponderantes corresponden al sector servicios: hoteles, comercios y restaurantes. La industria de la construcción presenta un marcado crecimiento generador debido al acelerado desarrollo de la zona. En ella se asienta el 47.1% de la población y esta integrada por los municipios de Isla Mujeres, Benito Juárez, Cozumel y la costa Solidaridad (Web 4).

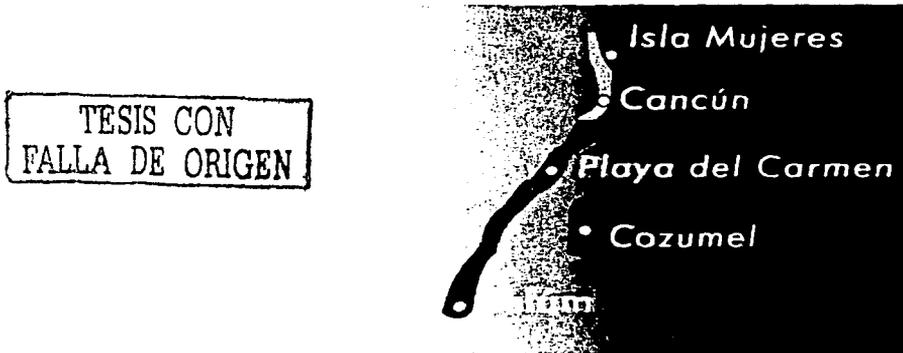


Figura 4.23. Localización de la zona (Web 5).

Como parte de las estrategias de desarrollo urbano y turístico de la zona que para el año 2025 visten la zona 11 millones de turistas, para ello se deberá de duplicar la capacidad actual de alojamiento de 55 mil cuartos de hotel a 110 mil cuartos. Se pretende lograr esto a través de la captación de nuevos segmentos del mercado turístico mediante el impulso a:

- Distritos de golf
- Turismo náutico.

Para cumplir con estos objetivos es necesario que se cuente con la infraestructura

suficiente para proveer de servicios a estos complejos (Web 5).

La concentración de sales del agua subterránea es inaceptable para el consumo humano, debido a la naturaleza caliza del suelos a que llos complejos se encuentran a la orilla de mar.

Debido a esto se cree que la desalación es la opción más viable para abastecer de agua a esta zona, ya que se puede utilizar el agua de mar. Dentro de las tecnologías de desalación la ósmosis inversa es la más viable debido a que es la que presenta costos operacionales más bajos y una mano de obra no tan especializada.

#### 4.9.2 Tamaño de la planta

El primer factor que se debe de considerar en la implantación de un sistema de ósmosis inversa es su capacidad, recordando que existe una importante economía de escala en la inversión, lo que se traduce en la conveniencia de centralizar la producción de agua salada, aumentando lo más posible el tamaño de la planta.

Por ello es que aquí se plantea la construcción de un sólo sistema de desalación de ósmosis inversa, que permita satisfacer la demanda de todos los complejos que se piensa que serán construidos en los próximos 20 años.

Para calcular el tamaño de la planta se hicieron las siguientes consideraciones:

Número de habitaciones :	55,000
Número de huéspedes por habitación	2
Dotación:	300 l/huésped/día
Ocupación media anual proyectada:	74%

Así, la planta deberá de tener una capacidad de:

$$Q_a = (55,000)(2)(0.300)(0.74) = 24,420 \text{ m}^3/\text{día}.$$

#### 4.9.3 Selección de la membranas

El primer paso del diseño de una planta de ósmosis inversa es la selección del tipo de membrana a utilizar; para determinarlo se considera el tipo de agua que se va a tratar y la capacidad que tendrá la planta.

Las opciones disponibles para este tipo de agua son sólo dos: las membranas de enrollamiento espiral y las de fibra hueca. De éstas, las primeras dominan el mercado, ya que tienen la posibilidad de ser intercambiables entre las distintas marcas que existen, por

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

lo que sus costos de operación y mantenimiento son menores que las membranas de fibra hueca.

Debido a las dimensiones de la planta se utilizarán membranas de 8" ya que de otra forma su tamaño sería excesivo, y debido al gran número de tubos de presión la operación se complicaría.

En la tabla 4.10 se presentan las membranas de enrollamiento espiral de 8" existentes en el mercado para desalación de agua de mar por ósmosis inversa. Los datos con que se elaboró esta tabla fueron recopilados de los sitios en internet que cada uno de los fabricantes.

Tabla 4.10. Membranas para desalación de agua de mar.

Fabricante	Material	Modelo	GFD	Rechazo de sales	Area Ft <sup>2</sup>
Hydranautics	Poliamida	SWC1	5,000	99.6 %	315
	Pliamida	SWC2	6,200	99.2 %	315
	Poliamida	SWC3	5,900	99.6 %	315
Osmonics	Poliamida	SW1-825	4,000	99.5 %	320
	Poliamida	SW2-825	6,000	98.6 %	320
Filmtec	Poliamida	SWC3 8040	6,000	98.6 %	300
	Poliamida	SW30 HR 8040	4,000	99.2 %	300
	Poliamida	SW30 HR 380	6,000	99.4 %	300
Fluid Systems	Poliamida	TFC 2822SS	N/D	N/D	N/D
	Poliamida	TFC 2822SS-360	N/D	N/D	N/D

De las membranas listadas en la tabla 4.10 se eligió el modelo SWC2 por ser la que presenta el mayor caudal con uno de los rechazos más altos, además de que está diseñada para utilizarse en la primera etapa.

Para la segunda etapa se utilizará una membrana modelo SWC3 con el objetivo de tener la mayor calidad posible en el producto, ya que esta membrana aunque tiene una menor capacidad posee un mayor rechazo de sales, lo cual incrementa notablemente la calidad del agua producida.

En la figura 4.24 se muestran las características técnicas de esta membrana.

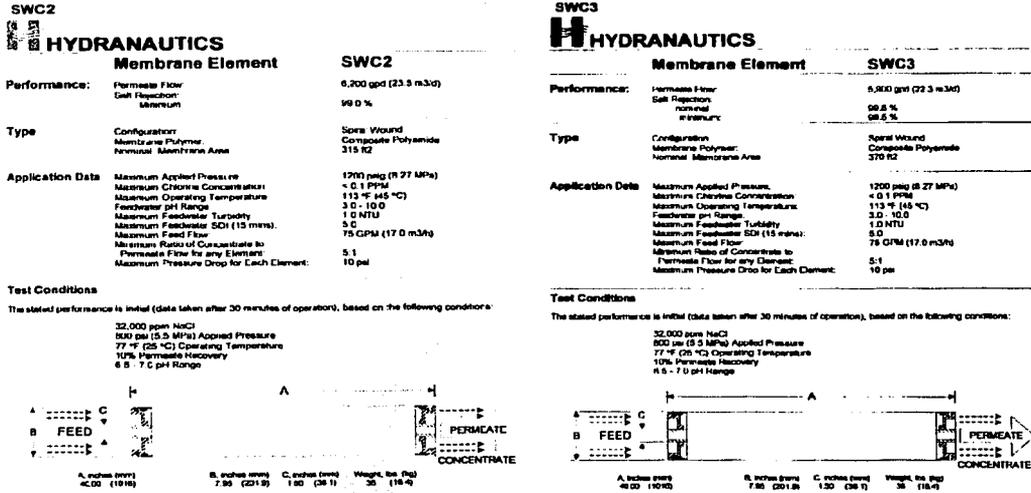


Figura 4.24. características técnicas de las membranas utilizadas membrana (Web 6).

Con el fin de que el diseño sea lo más exacto posible, se utilizó el programa de computadora que el fabricante distribuye de manera gratuita para la utilización de sus productos en un sistema de ósmosis inversa, con la advertencia de que éste no se puede tomar como el diseño definitivo, no obstante, se acerca mucho al que habría de realizarse.

Antes de comenzar a utilizar el programa debe considerar que el agua de alimentación debió de haber tenido un pretratamiento de tal modo que el agua contenga un SDI menor a 5, turbiedad menor a 1 UTN, pH lo más cercano al neutro y una temperatura no mayor a 45° C. Los pretratamientos que se utilizan para lograr estas condiciones son la filtración, coagulación-floculación, cloración, dechloración y ajuste de pH.

Con los dos primeros se buscara reducir el índice de ensuciamiento y la turbiedad del agua de alimentación.

Posteriormente, la cloración se utiliza para reducir al máximo el contenido de materia orgánica presente en el agua, ya que se bien es cierto que las membranas de ósmosis inversa son capaces de rechazar casi en su totalidad los virus bacterias contenidos en el agua, éstos microorganismos pueden depositarse sobre la superficie de la membrana haciendo que las limpiezas sean más frecuentes, por lo que es recomendable clorar el agua para evitar este problema.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Una vez clorada el agua se debe realizar una dechloración ya que las membranas hechas con poliamida no soportan dosis superiores a 0.1 mg/l de cloro libre, y finalmente se hace un ajuste de pH de tal manera que las membranas trabajen en el rango óptimo de pH.

### Características del agua

El primer paso es alimentar al programa con la composición iónica del agua a tratar, y éste calcula el contenido de SDT, conductividad, presión osmótica de la solución, así como el porcentaje de saturación de algunas sales que tienden a precipitarse, se debe de poner especial atención en el índice de Langelier, que mide la precipitación de carbonatos de calcio, ya que su valor no debe de ser mayor a -0.2. En la figura 4.25 se muestra la pantalla correspondiente.

The screenshot shows the 'Analysis' window of the Hydranautics RO Projection Program. It displays various water quality parameters and their calculated values. The interface includes a menu bar (File, Analysis, RO Design, Calculation, Help) and a title bar (Hydranautics RO Projection Program - [Analysis]).

Project	Code	Feed	Date
pH	7.00	Seawater - open intake	11/11/20
Temp	25.0 c	E cond	54693 uS/cm CO2
		H2S	0.0 ppm
		Fe	0.0 ppm
Ca	412.0 ppm	CO3	0.0 ppm
Mg	1290.0 ppm	HCO3	0.1 ppm
Na	10760.2 ppm	SO4	2710.0 ppm
K	400.0 ppm	Cl	19443.4 ppm
NH4	0.0 ppm	F	1.0 ppm
Ba	0.000 ppm	NO3	0.0 ppm
Sr	7.900 ppm	SiO2	0.0
		Autobalance	Total negative
			604.99 meq
Calculated TDS	35025 ppm	Ionic strength	0.697
CaSO4 saturation	21.1 %	BaSO4 saturation	0.0 %
Silica saturation	0.0 %	SrSO4 saturation	25.3 %
Saturation Index	-3.1 Langelier	Osmotic pressure	371.2 psi

Figura 4.25. Pantalla de análisis de la calidad del agua de alimentación.

Para este ejemplo se consideró una concentración de sales de 35,000 mg/l, que es la concentración media para un agua de mar, y sólo se incluyeron los iones presentes en el agua con concentraciones superiores a 1mg/l.

### Arreglo

Una vez realizado esto y ya que se ha verificado que ninguno de los porcentajes de saturación están por encima del máximo permitido, se pasa a la ventana de diseño. En esta

se debe incluir solamente el caudal de permeado y el porcentaje de recuperación.

El caudal de permeado ya lo hemos calculado anteriormente con base en la demanda que deberá satisfacerse el sistema, y es de 24,420 m<sup>3</sup>/día.

El porcentaje de recuperación, es el cociente, expresado en porcentaje, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas y se representa por Y, es decir:

$$Y = 100 (Q_p/Q_a)$$

Caudal :                    Qa caudal de alimentación  
Caudal :                    Qp caudal de permeado

Este porcentaje de recuperación no puede ser elegido a criterio del diseñador, sino que depende de una gran número de variables las cuales afectan la solubilidad de los compuestos presentes en el rechazo y la capacidad de rechazo de sales de la membrana. Así que hasta este punto no podemos determinar este valor, aquí solo se toma el porcentaje máximo que en teoría pueden tener los módulos espirales de ósmosis inversa para desalación de agua de mar, que es del 50% por etapa.

Para este ejemplo se eligió un porcentaje de recuperación del 75 %, de modo que el sistema tenga al menos dos etapas.

Una vez definido esto se ingresan al programa como se muestra en la pantalla de la figura 4.26.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Project Name: Calculated by: Date: 11/11/10

pH: 7.0 | Membrane size: 0.0 | Acid type: H2SO4

Temp: 25.0 C | Acid dosing rate: 0.0 | Acid concentration: 2.0

Flow: 2.0 m3/hr | Feed water type: Seawater, tap water

SP recovery % per pass: 10.0 | Membrane leaching:  | Permeate treatment:

Product recovery %: 75.0 | Concentrate recirc:  | Booster pump:

Permeate flow: m3/hr: 244.200

Average flow rate: m3/hr: 0.0

Feed flow: m3/hr: 2,966.00

Concentrate flow: m3/hr: 811.00

System Specs

Element type	Stage 1
Elements/vessel	0
Vessels	0

Stages: Pass 1

Recalc Array

AutoDisplay

Figura 4.26. Pantalla de diseño del sistema.

Posteriormente debemos de incluir el número de etapas que se tendrán; en la parte inferior se pueden ir agregado estas etapas hasta un máximo de 4, oprimiendo el botón que se encuentra en la parte superior izquierda como se muestra en la figura 4.27.

System Specs

Element type	Stage 1	Stage 2
Elements/vessel	0	0
Vessels	0	0

Stages: 2

Recalc Array

Element type

Elements/vessel

Vessels

Figura 4.27. Definición del número de etapas.

Una vez que hemos definido el número de etapas se selecciona el tipo de módulo que se utilizar. Para este caso se selección el modelo SWC2 en la primera etapa y el SWC3 en la segunda.

	Stage 1	Stage 2
System Specs		
Element type	SWC2	SWC3
Elements/vessel	6	6
Vessels	142	73

Stages	2
Pass 1	
Recalc Array	

Element type
Elements/vessel
Vessels

Figura 4.28. Etapas, tipo y número de elementos definidos.

Como se puede ver en la figura anterior, una vez que se selecciona el tipo de membrana a utilizar el programa calcula el número de tubos a presión necesarios y el número de membranas por tubo de presión. Este cálculo sólo toma en cuenta el caudal de permeado que deberá producirse y la capacidad media de las membranas, y la relación del número de tubos de presión siempre será de 2:1 en etapas subsecuentes. Esta es tan solo una aproximación, ya que el diseñador tiene la oportunidad de modificar el número de tubos de presión por etapas y la relación entre etapas subsecuentes con el fin de mejorar la calidad del producto o bien las condiciones de operación.

### Cálculo

Una vez realizado todo lo anterior se corre el programa de diseño apretando el botón "run".

Cuando las suposiciones iniciales no son correctas el programa presentará dos distintos tipos de errores, estos indican que el diseño no es el más adecuado.

El primero es cuando el programa no converge, esto se debe a que dadas, las características del agua de alimentación, el porcentaje de recuperación propuesto excede la capacidad de las membranas, como se muestra en la figura 4.29.:

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.29. Diseño fuera del rango de conversión.

Para solucionar esto se deberá de disminuir este porcentaje de recuperación hasta encontrar el máximo admitido para el arreglo propuesto. En este caso se disminuyó el porcentaje de recuperación hasta un 69 %, y el programa realizó el diseño tal y como se puede ver en la figura 4.30.

Array	Vessels	Feed	Conc.	Feed	Conc.	Flux	Beta
1-1	202	1205.9	23.0	14.8	11.7	1.04	
1-2	146	1196.3	14.8	13.8	0.7	1.01	
1-3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
1-4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	

Permeate concentration (ppm)	
Ca	3.59
Mg	11.25
Na	444.65

Concentrate parameters	
CaSO4 sat. %	92
BaSO4 sat. %	0
Saturation Index	1.7

Figura 4.30. Diseño por encima de las recomendaciones del fabricante.

En este segundo caso, aun cuando el diseño pudo ser realizado por el programa, uno o más parámetros del sistema está por encima de los límites recomendados por el fabricante o las condiciones de operación no son las adecuadas, que es el segundo tipo de error que se puede llegar a tener.

*Verificación de los parámetros de operación*

Las características de operación de la planta se muestran en la figura 4.31, que corresponde a la pantalla de resultados de los cálculos; cuando un valor se encuentra en rojo es que éste no cumple con la especificación del fabricante y el diseño deberá de ser modificado.

Calculation Results							
	Pressure	psi		Flow/vessel	gpm		
Array	Vessels	Feed	Conc.	Feed	Conc.	Flux	Beta
1-1	282	1211.0	1205.9	23.0	7.7	11.7	1.04
1-2	146	1205.9	1196.3	14.8	13.8	0.7	1.01
1-3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
1-4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00

Figura 4.31. Resultados del cálculo.

La primera columna corresponde al número de tubos de presión que se utilizaron en el diseño del sistema el primer renglón corresponde a la primera etapa y así sucesivamente.

La segunda columna corresponde a la presión que debe de ser suministrada en la primera etapa, iguala a la diferencia de presiones osmóticas entre ambos lados de la membrana  $\Delta\pi$  más todas las pérdidas del sistema

$$P = \Delta\pi + H_{f_{sis}}$$

Donde:

$\Delta\pi = \pi_a - \pi_p$  : diferencia de presiones entre ambos lados de la membrana.  
 $P_a$  : presión del caudal de aporte.

Y la diferencia de presiones osmóticas se calcula como:

$$\Delta\pi = \left( \frac{SDT_r + SDT_a}{2} - SDT_p \right) (0.011)$$



## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

---

Donde:

- SDTr: concentración de sales disueltas en el caudal de rechazo en mg/l.
- SDTa: concentración de sales disueltas en el caudal de alimentación en mg/l.
- SDTp: concentración de sales disueltas en el caudal de permeado en mg/l.
- (0.011): factor de conversión, 1000 mg/l de SDT corresponden a una presión osmótica de 11 psi.

Como se observa, la presión efectiva depende de la concentración de sales en el agua de alimentación, rechazo y permeado, por lo que para que éste dentro de los límites recomendados por el fabricante habrá que disminuir el porcentaje de recuperación para que el gradiente de presiones se reduzca y tenga una presión máxima menor a 1,200 psi.

La tercera columna corresponde a la presión que se tiene en el rechazo al abandonar la membrana y alimentar a la siguiente etapa, dicha presión también deberá de estar por debajo de 1,200 psi.

La cuarta y la quinta columnas corresponden al caudal que se tendrá en cada uno de los tubos a presión, la primera corresponde al caudal de alimentación y la segunda al caudal de rechazo. Los valores recomendados por los fabricantes se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Caudales recomendados.

Diámetro de la membrana	Caudal máximo de alimentación	Caudal mínimo de rechazo
8"	75 GPM	12 GPM

Si sólo el caudal no cumple con las especificaciones propuestas por el fabricante, se podrá aumentar o disminuir el número de tubos de presión, pero el diseñador deberá de tener en cuenta que un aumento o una disminución de tubos repercute de igual manera en el flujo a través de la membrana con el consecuente aumento o disminución de presión, como a continuación se explica.

La penúltima columna corresponde al flujo del solvente a través de la membrana, que se define como:

$$J_a = A (\Delta P - \Delta \pi)$$

Donde:

$J_a$	:	flujo de solvente en GFD.
$A$	:	coeficiente de permeabilidad.
$\Delta P = (P_a - P_p)$	:	diferencia de la presión hidráulica entre ambos lados de la membrana.
$\Delta \pi = \pi_a - \pi_p$	:	diferencia de presiones entre ambos lados de la membrana.
$(\Delta P - \Delta \pi)$	:	gradiente de presión efectiva a través de la membrana.

Se observa que un aumento en el flujo del solvente representa un aumento en la presión osmótica.

Si las características del agua se mantienen constantes al aumentar la presión osmótica aumenta el rechazo de sales, ya que la concentración de sales en el permeado es inversamente proporcional al gradiente de presiones, por lo que un aumento en el flujo se traduce en un aumento en la calidad del agua tal y como se explicó en el Capítulo 3.2. Sin embargo, se deberá verificar que la presión efectiva no rebase los límites de operación de la membrana.

Si las características del agua varían, también lo hace el coeficiente de permeabilidad de la membrana, ya que su valor depende de la concentración de sales en el agua de alimentación, del pH y de la temperatura, ocasionando que el flujo varíe aun cuando la presión se mantenga constante.

Finalmente, en la última columna se tiene el factor beta, cuyo valor debe de ser menor a 1.2; dicho factor mide la relación entre la velocidad del agua de alimentación paralela a la superficie de la membrana y la velocidad de permeado perpendicular a la membrana. Su valor está relacionado con la recuperación de la membrana, pues al aumentar ésta, también lo hace el caudal de permeado en detrimento de la salmuera.

### *Diseño final*

Considerando todos los puntos anteriores se realizan los ajustes necesarios, haciendo distintas pruebas hasta encontrar el diseño óptimo, que cumpla con las especificaciones del fabricante y que el caudal de permeado tenga la calidad deseada.

Para este ejemplo sólo se modificó el porcentaje de recuperación introduciendo 61 para disminuir la presión que se debía de suministrar y se redujo el número de tubos de presión por etapa a 130 en la primera etapa y 65 en la segunda, de modo que se cumpliera con las recomendaciones del fabricante y que el agua fuera adecuada par el uso y consumo humano.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Los ajustes se muestran en la figura 4.32.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Project Parameters:**
  - Calculated by: [ ] Date: 11/22/02
  - pH: 7.00 Membrane age: 0.0 years Acid type: HCl
  - Temp: 25.0 C Acid dosing rate: 0.0 ppm Acid concentration: 30%
  - Flux decline % per year: 7.0 Feed water type: Seawater - open intake
  - SP increase % per year: 10.0 Permeate blending: [ ] Permeate throttling: [ ]
  - Product recovery: 61.0 Concentrate recirc.: [ ] Booster pump: [ ]
  - Permeate flow: m3/d 24420.0
  - Average flux rate: gfd 16.5
  - Feed flow: m3/d 40032.8
  - Concentrate flow: m3/d 15612.8
- Calculation Results:**

Array/Vessels	Pressure psi	Feed Conc.	Flow/vessel gpd	Conc.	Flux gpd	Beta
1-1	130	1199.9	1173.2	56.5	26.2	23.1
1-2	65	1173.2	1134.0	52.4	44.1	5.4
1-3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1-4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- Permeate concentration (ppm):**

Ca	1.19	K	6.87	Sr	0.02	SO4	8.30	NO3	0.00	CO2	0.02
Mg	3.71	NH4	0.00	CO3	0.00	Cl	237.28	SiO2	0.00	pH	6.5
Na	147.99	Ba	0.00	HCO3	0.00	F	0.02	Total TDS	405.4	ppm	
- Concentrate parameters:**

CaSO4 sat. %	69	SrSO4 sat. %	81	Ionic strength	1.78	pH	7.4
BaSO4 sat. %	0	SiO2 sat. %	0	Osmotic pressure	944.6	psi	
- Saturation Index:**

Langelier	-2.0	Stiff & Davis	-2.98	Total TDS	89172.1	ppm
-----------	------	---------------	-------	-----------	---------	-----

Figura 4.32. Pantalla del diseño final.

## Calidad del permeado

En la parte inferior a los parámetros de operación se muestra la calidad del agua que tendrá el agua de producto como a se muestra en la figura 4.33.

Permeate concentration (ppm)											
Ca	1.19	K	6.87	Sr	0.02	SO4	8.30	NO3	0.00	CO2	0.02
Mg	3.71	NH4	0.00	CO3	0.00	Cl	237.28	SiO2	0.00	pH	6.5
Na	147.99	Ba	0.00	HCO3	0.00	F	0.02	Total TDS	405.4	ppm	

Figura 4.33. Calidad del permeado.

Estos valores se comparan con los establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, en los cuales

se estipula las características que debe de cumplir una agua para uso y consumo humano. En la tabla 4.12 se muestra dicha comparación.

Tabla 4.12. Comparación entre la calidad esperada del agua producida y la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetro	Agua producida (ppm)	NOM-127-SSA1-1994 (ppm)
Ca	1.20	N/E
Mg	3.70	0.15
Na	148.00	200
K	6.90	N/E
NH <sub>4</sub>	0.00	0.50
Ba	0.00	0.70
Sr	0.00	N/E
CO <sub>3</sub>	0.023	N/E
HCO <sub>3</sub>	0.00	N/E
SO <sub>4</sub>	8.3	400.00
Cl	237.3	250.00
F	0.00	1.5
NO <sub>3</sub>	0.00	N/E
SiO <sub>2</sub>	0.00	N/E
TDS	405.40	1,000
PH	6.5	6.5-8.5

N/E: No especificado.

Como se puede ver el agua producida por el sistema cumple con los requerimientos de dicha norma.

#### Caudal de rechazo

En el caudal de rechazo las concentraciones no son relevantes para efectos del diseño pero sí lo será el porcentaje de saturación de algunas sales que pueden llegar a precipitarse, así como la presión osmótica y la concentración de SDT en el rechazo. Estos se muestran en la pantalla debajo de la calidad del agua de permeado, como se puede ver en la figura 4.34.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

**Concentrate parameters**

CaSO <sub>4</sub> sat. %	69	SrSO <sub>4</sub> sat. %	81	Ionic strength	1.78	pH	7.4
BaSO <sub>4</sub> sat. %	0	SiO <sub>2</sub> sat. %	0	Osmotic pressure	944.6	psi	
Saturation Index: Langelier		-2.0	Stiff & Davis		-2.98	Total TDS	89172.1 ppm

Figura 4.34. Saturación de sales en el rechazo.

Los límites de saturación para estas sales se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Límite de solubilidad de algunas sales en el rechazo.

Sal	Límite de saturación
CaSO <sub>4</sub>	230
SrSO <sub>4</sub>	800
BaSO <sub>4</sub>	6,000
SiO <sub>2</sub>	100

Además de esto se debe de tomar en cuenta que los índices de Langelier y Stiff & Davis no deben de ser mayores a -0.2. Recordemos que estos índices miden la precipitación de carbonatos de calcio.

Al analizar estos datos se puede ver que ninguno de los parámetros aquí mencionados está por encima del límite de saturación, por lo cual el diseño propuesto no deberá de tener problemas durante su operación.

**Diagrama del sistema.**

Por último, para resumir toda esta información y mostrarla de manera gráfica, se puede realizar por medio del programa de computadora un diagrama de flujo del sistema que se diseño como se muestra en la figura 4.35.

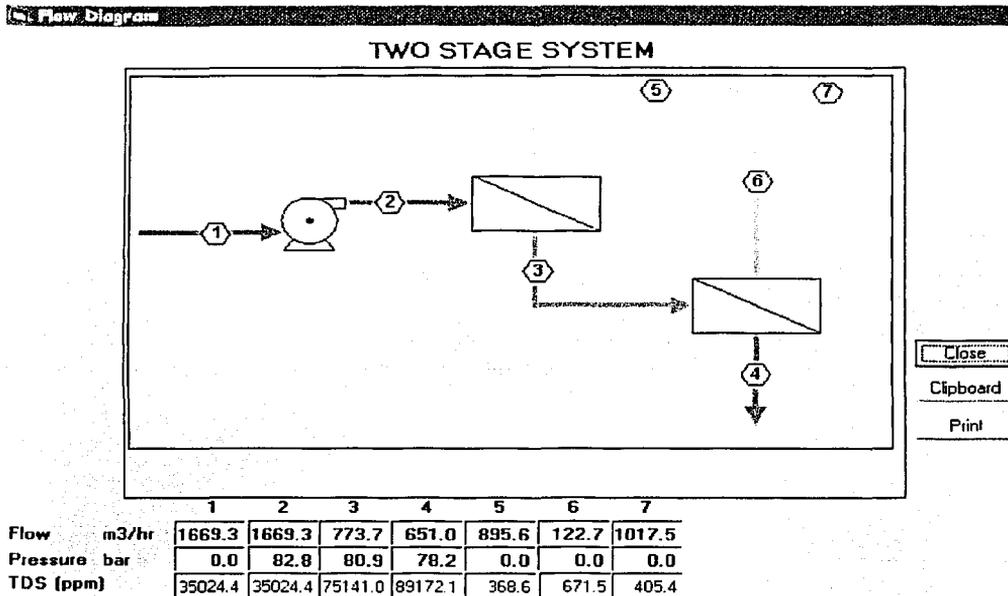


Figura 4.35. Diagrama de flujo del sistema.

## 5 Operación y mantenimiento

Una vez realizado el diseño, construida la planta, y realizado el montaje de la instalación de los equipos, es el momento de ponerla en operación.

La comprobación del funcionamiento correcto de todos los elementos de la instalación es fundamental, por lo que antes de empezar a producir agua es necesario realizar una serie de pruebas.

Como las instalaciones de ósmosis inversa son de características muy específicas y muchos equipos requieren de materiales especiales, la mayoría de ellos no responde a elementos de serie.

Debido a lo anterior, en este capítulo sólo se han recopilado solo los pasos más esenciales a seguir en la operación de este tipo de sistemas.

### 5.1 Arranque inicial

#### *Captación*

En la prueba real de la instalación hay que comenzar con la comprobación de la bomba de captación de agua.

Cuando las bombas son del tipo sumergido se requiere de un equipo de vacío par el cebado. En muchas ocasiones, esta es la parte que más problemas genera, especialmente cuando existe sólo un equipo para un conjunto de bombas, pues son fáciles las fugas de aire a través de los colectores y accesorios de unión.

El fallo del equipo de vacío impide el arranque de las bombas y está ligado generalmente a pérdidas en la red, que por tanto deberá de ser estudiado concienzudamente. El arranque de las bombas, cuando exista más de una se hará primero individualmente y posteriormente de manera escalonada.

En cada prueba individual la bomba se tendrá en funcionamiento al menos dos horas de forma ininterrumpida. Al cabo de este tiempo se parará la bomba probada y se pondrá en marcha la siguiente.

Una vez que se han arrancado las bombas una a una, se hará una comprobación conjunta de todas las bombas que deben de funcionar simultáneamente. La prueba simultanea de estas bombas se prolonga durante 24 horas.

### *Depósito intermedio*

Cuando en la instalación existe un depósito para regular el suministro de agua procedente de la toma, se aprovecha la puesta en marcha de las primeras bombas para realizar el llenado y limpieza del mismo y posteriormente sus desinfección para lo cual debe de mantenerse una dosis de cloro libre (unos 5 mg/l) durante 24 horas.

Pasado el tiempo se vacía el depósito, se limpia y si es necesario se limpia con bisulfato sódico.

En esta fase se comprueba y regula la situación de los niveles, cuya respuesta habrá sido simulada con anterioridad, si en la instalación existe un sistema de control automático.

En el caso de que la toma de agua se realice mediante una serie de pozos con bombas sumergibles, es el momento, a falta de medidores de caudal en cada una de las bombas, de la comprobación aunque sea aproximada de los caudales de cada una de ellas. Para ello y con la ayuda de cronómetros se miden los niveles del depósito funcionando las bombas, primero individualmente y luego en conjunto.

### *Pretratamiento físico*

Es necesario disponer de un colector de drenaje, que se encuentre después de los filtros de cartucho y antes de las bombas de alta presión, se puede circular el agua por los filtros de cartucho antes de la colocación de éstos.

A continuación se comprueba el funcionamiento del equipo de aire para el lavado de filtros, regulando las válvulas correspondientes para ajustar los caudales y las presiones previstas en el diseño.

Se lavan también de esta forma los materiales filtrantes de los productos extraños que han podido recoger durante su manipulación.

También resulta conveniente la desinfección de materiales filtrantes que, al igual que en otros casos, se realiza con hipoclorito de sodio en las dosis ya antes mencionadas.

Como los filtros multicapa tienen un complejo sistema de válvulas y colectores de entrada y salida de agua y aire, se comprueba la perfecta colocación de cada una de dichas válvulas y, si el sistema es automático, la correcta transmisión de las señales eléctricas hasta el centro de control, así como el funcionamiento de los finales de carrera de las válvulas y el sentido de apertura y cierre de éstas, en sus cabezales hidráulicos.

## Diseño de sistemas de desalación

Dada la importancia que tiene el correcto lavado de filtros, es el momento de establecer las secuencias de entrada y salida del aire y agua y los tiempos de duración de cada una de éstas, así como el funcionamiento de los niveles a los que ascenderá el agua por encima del material filtrante.

Si el funcionamiento es manual hay que entrenar a los operarios sobre la forma de realizar estas acciones, mientras que si es automático se deberán establecer las correcciones necesarias en los programas de computadora.

Si existiera más de una etapa de filtración multicapa, las mismas pruebas se extenderían a los demás filtros y también se haría lo mismo para los filtros de precapa o nuevas etapas de cartuchos si existieran. Con todo este sistema hidráulico en funcionamiento se pasa al pretratamiento químico.

### *Pretratamiento químico*

La puesta a punto comienza por la desinfección y, tras la aplicación de diversas dosis y el análisis correspondiente del agua a tratar para comprobar su respuesta, se pasa a los restantes tratamientos como regulación de pH, coagulación, y estabilización.

Los variadores de frecuencia de los distintos equipos de dosificación deberán de quedar perfectamente ajustados.

También en estas pruebas es el momento de ensayar distintos productos químicos para conseguir el funcionamiento óptimo de la instalación.

Se requiere por tanto un laboratorio de análisis para la comprobación de todos los resultados.

Una vez ajustados todos los pretratamientos y comprobados todos los elementos de seguridad de la instalación se mantiene funcionando el sistema en estas condiciones durante varios días.

### *Bombas de alta presión*

El verdadero corazón de la instalación está constituido por las bombas de alta presión y los bastidores con los módulos de ósmosis inversa.

Desde el momento en que se arranca la bomba de alta presión comienza a entrar agua a los bastidores y por tanto a producirse agua desalada.

Es imprescindible de nuevo, antes de este arranque, comprobar la inexistencia de cloro

libre después de los filtros de cartucho, en el caso de que las membranas de ósmosis inversas que se utilicen sean de poliamida.

Antes de arrancar las bombas de alta presión, se habrá puesto a funcionar cada uno de los motores en vacío durante algunas horas para comprobar el sentido del giro. Posteriormente se realiza el acoplamiento de bombas y motores, y su alineación y equilibrado.

Como las bombas de alta presión necesitan de una presión mínima de succión o aspiración, tienen en la succión un *perostato* de baja presión y/o un trasmisor de baja presión que habrá que regular de acuerdo a la presión disponible en el sistema.

Dado que el arranque de las bombas de alta presión se hace de una en una, para esta primera fase del arranque se regula dicho instrumento por encima de la presión necesaria y posteriormente y una vez que toda la instalación esté funcionando correctamente se realiza el ajuste definitivo, aunque es posible que a lo largo del funcionamiento de la planta sea conveniente realizar más de un ajuste.

Las presiones disponibles siempre estarán en función de las pérdidas de carga que se produzcan en los distintos filtros del sistema, que lógicamente al arrancar la instalación están completamente limpios, pero que a lo largo de su funcionamiento van adquiriendo una pérdida de carga permanente que se incrementa con el paso del tiempo, debido al ensuciamiento.

Llegando el momento del verdadero arranque de la instalación se hará siempre con la válvula de control cerrada, para ir abriéndola lentamente.

Durante esta fase que se realiza bastidor por bastidor, primero individualmente durante al menos 8-12 horas y posteriormente en forma escalonada hasta que todos estén funcionando simultáneamente, se ajustan los tiempos y porcentajes de apertura de la correspondiente válvula de control.

### *Bastidores*

Normalmente durante el arranque se producen fugas por distintos lugares del bastidor, tanto en la alta como en la baja presión, pues es la parte de la instalación con más conexiones. Si las fugas no son exageradas no se actuará sobre ellas, hasta que al cabo de algunas horas se proceda a detener el flujo sobre el bastidor.

Las fugas del bastidor son más frecuentes en la parte de baja presión que en la de alta, pues en esta última generalmente se utilizan conexiones del tipo "victaulic", que son muy seguras e impermeables, o soldaduras.

También se pueden detectar fugas, en el caso de las membranas de enrollamiento espiral, en el acoplamiento de los módulos en el interior de los tubos de presión, mediante los interconectores, o si existieran membranas defectuosas, aunque este caso sea menos frecuente, ya que todas han sido probadas anteriormente en fábrica.

Este tipo de fuga se comprueba por el lado de alta salinidad que puede tener un bastidor en el arranque, lo que es normal al ser membranas nuevas.

Una vez detectada, es fácil comprobar el tubo de presión que produce la fuga, puesto que en los batidores de una cierta importancia existen tomas de muestra en cada tubo de presión.

Si no disponen de éstas hay que abrir cada tubo por el lado de baja presión y analizar con un conductímetro la calidad del permeado.

En la parada que hay que hacer del bastidor se aprovecha no sólo para corregir las fugas de agua externas, en los accesorios de conexión, sino también las interiores al tubo de presión, posiblemente en los interconectores.

Una vez corregidas todas ellas se vuelve a poner en marcha el bastidor y se la hace funcionar de forma continua durante 24 o 48 horas, al cabo de las cuales se desplaza el agua del bastidor y equipos de alta presión, se preservan las membranas en conservante (bisulfato sódico) y se pasa a la comprobación de los restantes bastidores de que conste la instalación, de forma individual.

Cuando ya están todos los bastidores se pone en funcionamiento toda la planta para comprobar la producción y conductividad media total.

Las membranas tardan un cierto tiempo en estabilizarse en su funcionamiento, dando salinidades iniciales superiores a las previstas. Así mismo, las presiones y caudales experimentan oscilaciones, pero posteriormente, entre 4 y 8 días, la salinidad mejora y los restantes parámetros se van acercando a las condiciones normales de funcionamiento previstas en el diseño. Por tanto no deben de producirse alarmas por este comportamiento inicial.

Dicha anomalía se debe generalmente al tiempo transcurrido desde que fueron fabricadas y a su conversión durante el mismo tiempo en productos químicos, fundamentalmente biosulfito sódico, del que quedan impregnadas.

Al arrancar la planta por primera vez conviene hacerlo con una presión lo más baja posible y con una conversión ligeramente inferior a la proyectada.

En estas condiciones el caudal que se obtiene es inferior al de diseño y una concentración de sales mayor. Con el paso de las horas la planta va estabilizándose en valores adecuados.

Durante las primeras horas de funcionamiento de la instalación, el permeado se tira al drenaje para evitar que pueda arrastrar algunos de los productos que han sido utilizados en la fabricación de las membranas, y que hayan quedado adheridos a ellas.

La estabilización de las membranas se suele producir durante un período de 72 horas siguientes a la puesta en marcha de la instalación, aunque a veces puede durar hasta 7 o 10 días.

Esta estabilización consiste en alcanzar las condiciones de producción y calidad a una presión igual o inferior a la proyectada, de una manera continua.

## 5.2 Válvulas

Hay dos válvulas fundamentales que son las que dirigen el funcionamiento del sistema: La válvula de control de la alimentación y la válvula de la salmuera..

### *Válvula de control*

La válvula de control se coloca a la salida de la impulsión de la bomba de alta presión y por tanto antes del bastidor de ósmosis inversa. Su papel es la regulación de la presión de alimentación de las membranas.

Como la bomba de alta presión se elige para un caudal igual al de diseño aumentado en un 5-10%, y para una presión equivalente a la máxima presión de alimentación de las membranas, la presión de descarga de la bomba es siempre bastante más elevada, que la que requiere la instalación cuando se pone en marcha por primera vez cuando las membranas están limpias.

Con esta válvula se introduce por tanto una pérdida de carga en el colector de alimentación de las membranas para conseguir adecuar la presión a las necesidades de cada momento. Por tanto en la válvula de control se pueden perder según el caso de 5 a 10 kg/cm<sup>2</sup>. Se comprende, por tanto, la importancia de realizar un buen diseño, puesto que posteriormente no resulta posible corregir estas elevadas pérdidas de carga, que en definitiva no son sino un incremento en los costos de funcionamiento.

A medida que vamos abriendo esta válvula va disminuyendo esa pérdida de carga y aumentando la presión de alimentación de las membranas.

En teoría, si no hay variación en ninguno de los parámetros de funcionamiento de la instalación, a mayor presión corresponderá un mayor caudal de producto, pero también se produce un aumento en la captación y más rápido ensuciamiento de las membranas.

En la práctica, la apertura de la válvula y por tanto la elevación de la presión, se realiza para equilibrar los efectos que se producen como consecuencia del uso de la instalación y para compensar la pérdida de caudal producido.

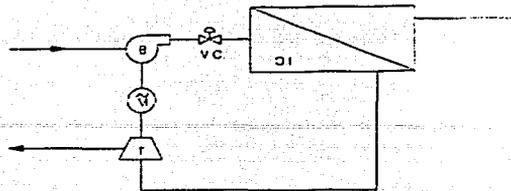


Figura 5.1. Posición de la válvula de control (V.C.) (Medina, 2000).

### Válvula de salmuera

La válvula de salmuera es la que regula la conversión de la instalación, pero su colocación tiene bastante que ver con el tipo de instalación de que se trate.

En las pequeñas instalaciones de agua salobre se coloca en la tubería de alta presión de salida del bastidor de ósmosis. Cerrándola más o menos se permite una salida variable de la salmuera y de esta forma se consigue la regulación.

Como la salmuera sale del bastidor a alta presión, unos 2-6 kg/cm<sup>2</sup> inferior a la de alimentación, dicha válvula tiene que ser tal que provoque la pérdida de carga de salida necesaria, puesto que a dicha presión sería peligroso el manejo del rechazo. En pequeñas instalaciones se emplean usualmente válvulas de aguja.

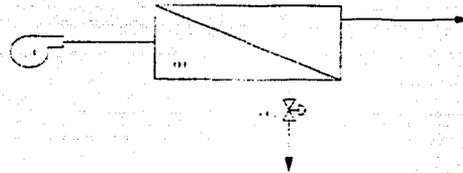


Figura 5.2. Colocación de la válvula de la salmuera (Medina, 2000).

Cuando en la instalación de ósmosis inversa se utiliza un equipo de recuperación de energía esta válvula cambia su papel e incluso se sustituye por algún dispositivo que realiza la misma función.

La turbina, del tipo bomba invertida Pelton, realiza el papel de control y por tanto regulación de la conversión.

La elección de la turbina requiere de un cuidado especial, realizándose el diseño para un

caudal óptimo de rechazo y una determinada presión que permita la mayor recuperación de energía.

Para hacer más flexible la operación del sistema de ósmosis inversa sin afectar las condiciones de operación de la turbinas se utiliza una válvula de by-pass, situada entre la tubería de alta presión, de alimentación de la turbina, y la tubería de baja presión de la misma.

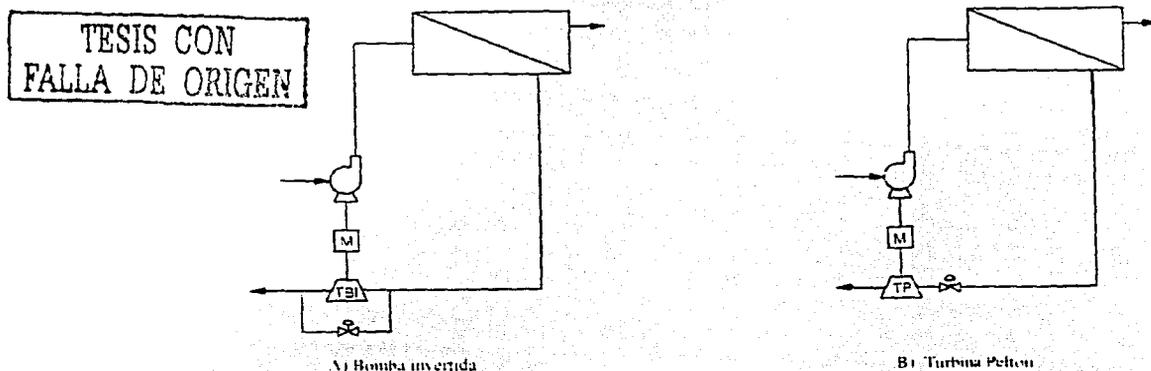


Figura 5.3. Colocación de la válvula de by-pass de la turbina (Medina, 2000).

Esta válvula dispone de un disco de orificio a su salida y tiene una capacidad máxima que suele estar entre el 5 y el 10 % del caudal máximo de alimentación a la turbina.

Como a lo largo del funcionamiento de la instalación el caudal de rechazo puede variar, no sólo por ensuciamiento de las membranas con el consiguiente descenso en la producción, sino también por variar la conversión en función de las necesidades de la operación, la válvula permite hacer frente a estas contingencias.

Cuando está completamente cerrada, la turbina aprovecha toda la energía de la salmuera, que de acuerdo con la presión y caudal, puede o no corresponder al punto óptimo de funcionamiento de la misma.

Si aumenta el caudal de alimentación a las membranas manteniendo la misma conversión, o si se reduce ésta, aumenta el caudal de rechazo, que al no poder pasar a través de la turbina se tendrá que derivar a través de la válvula de by-pass, para evacuar ese exceso de caudal con respecto al nominal de la turbina.

Este by-pass permite que a la turbina llegue la salmuera con el caudal y la presión adecuada para que la turbina funcione cerca de su punto de funcionamiento máxima eficiencia, consiguiendo una óptima recuperación.

Todo caudal que se deriva a través de la válvula de by-pass es energía que se pierde y que por tanto no puede ser recuperada por la turbina, pero sin embargo, permite esa mayor capacidad de operación del sistema de salmuera y mantener rendimientos.

Pero la válvula de by-pass desempeña otro papel muy importante que es la modificación de las condiciones de funcionamiento de la instalación, para permitir una operación que responda a las condiciones en que se sitúa la planta.

Su papel es fundamental para prolongar el periodo de funcionamiento de la instalación entre dos limpiezas de membranas consecutivas, cuando las condiciones de abastecimiento del agua son precarias.

En estos casos la instalación, que a lo largo del tiempo va perdiendo sus parámetros nominales de funcionamiento, por ensuciamiento y compactación, empieza a tener pérdidas de carga diferenciales elevadas, que aconsejarían la limpieza de las membranas.

Si las circunstancias no permiten parar la instalación para la limpieza, lo que consumiría de 8 a 12 horas con la consiguiente pérdida de producción, continuar funcionando en esas circunstancias provocaría un nuevo aumento de presión diferencial que podría producir un ensuciamiento irreversible de las membranas.

Abriendo la válvula de by-pass poco a poco se puede derivar a través de ella un 5-10% del caudal. Por tanto, al disminuir la contrapresión en el bastidor, aumentará el caudal de salmuera, es decir se reducirá la conversión en un 2-5%. La correspondiente disminución de la producción en ese porcentaje permite mantener o incluso disminuir la presión diferencial a través de las membranas, que pueden seguir funcionando sin que se rebasen los parámetros de riesgo de las mismas.

Esta variación produce lógicamente un aumento en el consumo específico, pero al menos permite continuar con el funcionamiento si interrupciones durante el tiempo necesario.

### **5.3 Monitoreo**

Una aspecto fundamental del funcionamiento de una instalación de ósmosis es el comportamiento de las membranas.

Para ello, a lo largo de la operación de la planta, se toman periódicamente una serie de datos o parámetros que directa o indirectamente nos dan información sobre la misma.

Los datos principales son el caudal, presión de alimentación, salinidad, pérdida de carga en las membranas y temperatura.

Para poder interpretar dichos datos es necesario conocer el comportamiento de las membranas respecto a dichos parámetros.

Las variaciones que se presentan en la operación de una instalación de ósmosis inversa por lo general se debe a variaciones: presión, temperatura o la salinidad.

#### **5.3.1 Influencia de la presión**

Las condiciones nominales de funcionamiento de una membrana nueva o limpia vienen dadas por una presión y un caudal determinado, además del consiguiente rechazo de sales.

Desde el momento en que la instalación se ha puesto en marcha y ha quedado estabilizada, la pérdida de carga o presión diferencial a través de las membranas empieza a aumentar, por ensuciamiento u otras causas. En consecuencia la presión neta, diferencia entre la alimentación y la pérdida de carga, que inicialmente da el caudal nominal previsto, empieza a disminuir y consiguientemente el caudal empieza a descender.

La recuperación de dicho caudal se consigue aumentando la presión, que está limitada por la máxima resistencia que la membrana puede soportar.

Cuando se llega a este punto, para recuperar la capacidad de producción de las membranas hay que proceder a su lavado con diversos productos químicos.

Sin embargo, en la operación normal de una instalación nunca debe de llegarse a estos valores extremos, pues al aumentar la presión se produce una mayor compactación y un incremento de la pérdida de carga, dado que las partículas que producen el ensuciamiento de las membranas son presionadas con más fuerza sobre ella produciendo en ocasiones una película de suciedad que tiene otros efectos.

A su vez al disminuir la permeabilidad a través de la membrana, aumenta el caudal de rechazo, por lo que si no regulamos convenientemente la válvula de salmuera o el by-pass de la turbina, se produce una contrapresión que favorece la disminución del caudal.

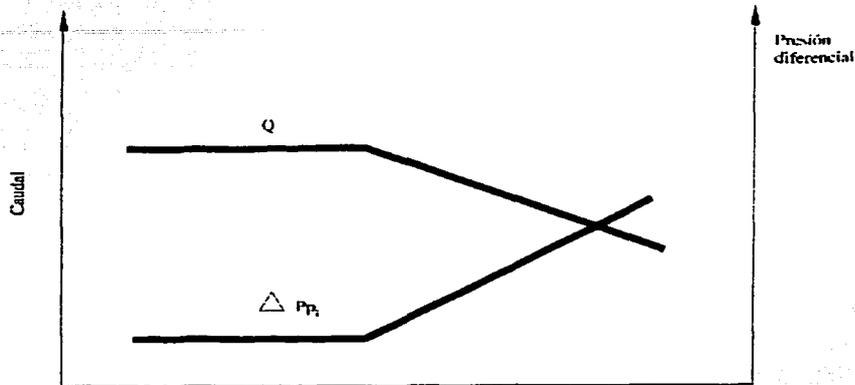


Figura 5.4. Variación del caudal y la presión diferencial con el tiempo (Medina, 2000).

Además de los efectos físicos sobre la membrana, el aumento de la presión de operación produce un aumento en el consumo energético de la instalación.

### 5.3.2 Influencia de la temperatura

La comprobación de las variaciones de la temperatura es también importante, puesto que existe una relación directa entre ésta y el caudal.

Al elevarse la temperatura se produce una especie de dilatación de los poros de la membrana y una variación en la viscosidad del agua a desalar, por lo que no sólo el caudal aumenta sino que además pasan más iones a través de la membrana, es decir, disminuye el rechazo y en consecuencia la calidad del permeado es inferior.

Por tanto, un aumento del caudal o salinidad puede no ser signo de que las membranas estén funcionando mal, sino consecuencia de la temperatura.

En las instalaciones de desalación se observa una importante variación en la cantidad y calidad del agua producida en verano y en invierno, e incluso a lo largo del día, dependiendo de la época del año.

En el caso de tratamiento de aguas en extensiones abiertas, como lagos o el mar, las temperaturas más bajas se producen en las primeras horas del día y las más elevadas después de la puesta de sol.

El aumento de la temperatura favorece también la actividad biológica, por lo que son de prever ensuciamientos más frecuentes e importantes, que habrá que tratar de controlar mediante productos químicos adecuados.

A su vez, el aumento de la temperatura puede contrarrestarse con una disminución de la presión de alimentación y de esta forma, sin disminuir el caudal, se consigue al menos que la suciedad, la materia orgánica o las bacterias no queden fuertemente pegadas o adheridas a las membranas, a la vez que se reduce el consumo energético.

### **5.3.3 Influencia de la salinidad**

También es importante el control de la salinidad, tanto en el agua producto, como en el agua de alimentación.

La variación de la salinidad puede inducir a errores si no ha sido advertida previamente, pues se produce no sólo una disminución importante del caudal, que puede compensarse con un aumento de presión, sino un aumento de la salinidad del producto que no tiene otra solución que recurrir a la instalación de otras membranas que tengan un mayor rechazo de sales.

Hay que tener en cuenta que la ósmosis inversa aplica una presión para vencer la presión osmótica diferencial entre la de la solución que se trata desalar, y el agua de producto. Esta diferencia entre ambas presiones es la que obliga al agua a pasar a través de la membrana.

Como la presión osmótica de una solución depende de la salinidad, al aumentar ésta disminuye la presión neta y en consecuencia se produce un caudal menor.

Pero además, el rechazo de sales de una membrana es una característica fija de la misma, por tanto en el producto habrá más sales si el agua que se desea desalar es más salina.

El aumento de la salinidad del permeado puede deberse a otras causas como:

- Deterioro irreversible de las membranas, que con el tiempo o en determinadas circunstancias pierden parte de sus características de rechazo.
- De alguna fuga de agua salada en los interconectores que unen los

- módulos en el interior de los tubos de presión.
- De la formación de una capa de suciedad sobre la superficie de la membrana, que la hace actuar como si fuera una membrana distinta de menor rechazo y que se recupera mediante el lavado.
- De la parada de la instalación por causas accidentales, especialmente si son frecuentes.

En cada una de estas circunstancias se requieren soluciones muy distintas y en las dos primeras hay que proceder al cambio de membranas o interconectores.

Para vigilar estas variaciones y su causa, se recomienda lavar las membranas cuando la salinidad se incrementa en un 10-15%. Si no existe recuperación adecuada de la calidad hay que proceder al citado cambio de membranas.

Las fugas de los interconectores son más fáciles de detectar pues se producen periódicamente y de inmediato generan un fuerte incremento en la salinidad.

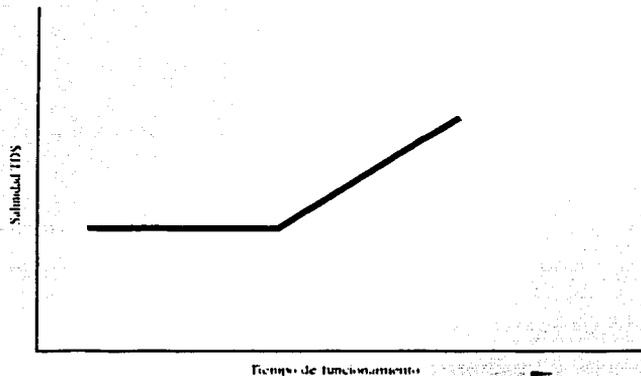


Figura 5.5. Variación de la salinidad con el tiempo (Medina, 2000).

#### 5.3.4 Influencia del pH

El rechazo de sales depende en cierta medida del pH, pues cada material tiene un pH al que el rechazo es máximo: No todas las membranas reacciona de igual forma a la variación del pH del agua de alimentación.

Las membranas de acetato de celulosa son muy sensibles a estas variaciones, de forma que sólo pueden actuar entre valores de pH de 4 a 7 de una forma continua y durante

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

periodos reducidos, como ocurre durante el lavado, pueden separarse ligeramente de estos valores.

Fuera de estos valores recomendados de pH las membranas se hidrolizan y pierden por tanto de forma irreversible sus características. La membrana de poliamida, menos sensible, funciona sin mayores problemas entre valores del pH de 4 a 11 y durante periodos cortos soporta valores de pH de 3 o de 12.

La flexibilidad de las membranas es pues bastante distinta y por tanto los cuidados que hay que tener con una y otra son también diferentes. Pero el que una membrana pueda funcionar dentro de un rango de valores de pH determinados, no significa que sea igualmente eficiente a todos ellos.

Normalmente hay un valor óptimo de pH al que la membrana tiene el mayor rechazo de sales y por tanto conviene trabajar lo más cerca a éste valor.

A medida que nos separamos de este valor el rechazo de sales se deteriora y, por tanto, en igualdad de las restantes condiciones de temperatura o presión la calidad del agua de producto es inferior.

Sin embargo, a pesar de ello, por las características del agua de alimentación, en determinadas circunstancias puede interesar trabajar a un pH distinto al óptimo de la membrana.

## 5.4 Limpieza

A pesar de todos los pretratamientos que se aplican a las instalaciones desaladoras, antes o después de este se puede producir ensuciamiento, que dependiendo del tipo de agua a tratar tiene uno o varios orígenes.

Los elementos más susceptibles de las plantas de ósmosis inversa son los filtros de arena y las membranas, dichos elementos se deberán limpiar periódicamente según las condiciones de operación de cada planta para evitar pérdidas excesivas de carga o bien una calidad deficiente en el agua de producto.

### 5.4.1 Filtros de arena

El lavado de los filtros de arena o multicapa se hace con aire y agua que se inyectan a contracorriente, estableciendo una secuencia de la lavado (Medina, 2000).

El proceso de lavado se aplica cuando se detecta una pérdida de carga importante entre la entrada y salida de los filtros. Aunque dicha pérdida de carga puede variar según el diseño entre 0.4 y 1 kg/cm<sup>2</sup>, según se trate de filtros abiertos o cerrados, debe de analizarse, en función de las condiciones del agua, la solución más económica respecto al consumo energético, comparando el consumo extra de energía al funcionar de forma prolongada con alta pérdida de carga en los filtros y el que se produce a consecuencia de la parada de un filtro, que por tanto incrementa la pérdida de carga en los restantes.

Las velocidades de lavado de agua y aire y las presiones deben también estudiarse para no producirse arrastres excesivos de material filtrante.

Para evitar tener que parar la instalación se realiza filtro a filtro, aislándolos del sistema mediante la apertura y cierre de las válvulas adecuadas de interconexión.

La secuencia de lavado se inicia con la entrada de aire por la parte inferior del filtro que remueve las partículas del medio filtrante, facilitando la liberación del material atrapada por las mismas.

Sin embargo, para que la agitación sea eficaz se necesita disminuir el espesor de la carga de agua que hay sobre le mismo, y que puede ser de hasta de 1 metro. Se abre la válvula de drenaje inferior del filtro para evacuar el agua sobre le mismo hasta que la lámina sea de unos 5 cm, en cuyo momento empieza la agitación.

Al cabo de 10 a 20 minutos se introduce agua a contracorriente por la parte inferior del

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

filtro, que arrastrar las partículas de suciedad que han quedado liberadas y las elimina al drenaje por rebose en la parte superior.

El proceso se puede repetir varias veces si se considera oportuno, hasta que en el proceso de agitación se vea que el agua está limpia, en cuyo momento el filtro se vuelve a poner en servicio. La clave de una buena filtración está en la eficiencia del retrolavado.

Cada medio filtrante tiene una velocidad de lavado óptima que asegura una expansión adecuada de la arena para su limpieza.

Una velocidad inferior no asegura un lavado adecuado, mientras que si es superior arrastra el material filtrante y disminuye la eficiencia. La presión no tiene en cambio efecto en la eficiencia del retrolavado.

En ocasiones puede ocurrir que el SDI del agua a la salida del filtro sea superior que la existente a la entrada del mismo, debido a que en el filtro se acumula material orgánico coloidal que origina una actividad biológica que puede ser peligrosa para las membranas y que por tanto hay que evitar.

Esta situación se puede producir incluso en el caso de tomas de agua de pozo de excelente calidad y por tanto con un SDI muy bajo, y obliga a la desinfección de los filtros con hipoclorito sódico, a veces con cierta frecuencia.

En estas circunstancias puede estudiarse si es conveniente realizar la filtración sobre arena, pudiéndose prescindir de los filtros, para lo cual se suele dotar a las instalaciones de un colector adecuado para realizar esta operación.

Los filtros de arena pierden material filtrante por dos causas principales:

- Por rotura de las boquillas de los colectores de recogida del agua filtrada.
- Como consecuencia de los procesos de lavado.

La primera no es muy frecuente pero es la que ocasiona mayores trastornos. Dado que el material que pasa a través de los huecos de las boquillas llega al depósito o colector de agua filtrada y de allí a los filtros de cartucho, puede también ocasionar problemas a estos, al incrustarse en ellos o por rozamiento, obligando al cambio de cartuchos.

En algunos casos se han producido averías mayores al llegar la arena a las membranas de ósmosis inversa y a las bombas de alta presión a las que pueden erosionar.

Por ello antes de realizar el llenado de los filtros debe comprobarse el perfecto estado de todas las boquillas eliminando aquéllas que planten algunas dudas.

En el caso de los filtros a presión a veces pueden producirse roturas de boquillas, por sobrepresiones producidas en el proceso de filtrado.

Una vez detectadas las fugas de arena resulta relativamente fácil localizar la boquilla defectuosa ya que constituye un camino preferencial para el paso del agua que se ve perfectamente en la superficie del filtro ya que se forma un burbujeo o un remolino. Sin embargo, la sustitución es más laboriosa puesto que hay que retirar la capa de material filtrante colocado sobre ella, hasta alcanzar el falso fondo en que se encuentra. El posterior relleno con material filtrante es muy difícil hacerlo de manera homogénea.

Además, todas estas operaciones son más fáciles de realizar con filtros abiertos que con filtros cerrados.

La segunda causa es no sólo muy frecuente sino casi inevitable. En el proceso de lavado hay una fase en que el agua se introduce en el filtro a contracorriente para provocar el desprendimiento de la suciedad adherida a los granos de material filtrante. Pero por muy bien que se regule la velocidad y los caudales de lavado, siempre se produce un pequeño arrastre que se elimina por drenaje.

Además, con el tiempo, el material filtrante se impregna de suciedad y los lavados sucesivos no consiguen desprenderla, por lo que el filtro queda saturado.

En los dos primeros casos se produce una pérdida de calidad del filtrado que puede ser insignificante para las exigencias del proceso. En el último hay además una pérdida de carga permanente que afecta a los caudales y presiones.

En dichos casos se procede a sustituir el material filtrante a rellenar los filtros parcialmente para que el lecho de filtración alcance el espesor de diseño.

Hay otra situación que se produce a veces en las instalaciones con toma de agua abierta, como consecuencia del desconocimiento que se tiene de la calidad de ésta hasta el mismo momento de arranque de la instalación.

El diseño de los filtros y la elección del material correspondiente se basa en análisis que se hacen sobre el terreno y que pueden resultar muy diferentes de la situación real que se produce, cuando se extraen los elevados caudales que requiere la instalación.

La calidad del filtrado no es entonces la adecuada y en muchos casos para mejorarla no hace falta cambiar todo el lecho filtrante, sino que basta con retirar la capa superficial de 15-20 cm y sustituirla por otra de material algo más gruesa.

De esta forma, se consigue un efecto de filtración en profundidad que mejora

considerablemente el producto (Medina, 2000).

### **5.4.2 Membranas**

Cuando las membranas de una planta de ósmosis inversa se ensucian y sobre todo si dicho ensuciamiento tiene lugar en un corto periodo de tiempo, las posibilidades de recuperación dependen fundamentalmente de la rapidez con que se actúe una vez detectado el problema. Si las membranas se limpian nada más al producirse su ensuciamiento, su recuperación puede ser posible. Por el contrario, si una membrana sucia continúa trabajando, su deterioro puede ser irreversible, ya que se produce un ensuciamiento elevado que origina, a su vez, caminos preferenciales que impiden posteriormente que la solución de limpieza llegue a la suciedad o a los precipitados que hay que eliminar.

La primera indicación de la existencia de un ensuciamiento o precipitación en las membranas suele ser el incremento de la pérdida de carga a través de los módulos. Esta circunstancia suele presentarse generalmente antes de que el porcentaje de rechazo de sales o permeado comience a disminuir.

Otro buen indicador del funcionamiento estable de las membranas es su paso de sales. Cuando las membranas están limpias, el rechazo de sales se mantiene constante durante largos períodos de tiempo.

Finalmente, otros indicadores de la necesidad de una limpieza son la variación de los caudales de rechazo y de permeado así como la necesidad de aumentar la presión de trabajo.

Aunque sólo sea de forma aproximada, se pueden detectar las causas de ensuciamiento por una serie de características o síntomas que son:

- Precipitados de calcio: marcado descenso del rechazo de sales y moderado aumento de la pérdida de carga.
- Hidróxidos metálicos de Fe, Ni, Cu: rápido descenso del rechazo y rápido aumento en las pérdidas de carga.
- Coloidales: ligero descenso del rechazo y aumento de las pérdidas de carga.
- $\text{SO}_4\text{Ca}$ : importante descenso en el rechazo y ligero a moderado aumento de las pérdidas de carga.
- Materia orgánica: marcado descenso del rechazo y aumento gradual en las pérdidas de carga.
- Ensuciamiento biológico: marcado descenso del rechazo y marcado descenso en la presión diferencial.

Cuando se produce un descenso en el caudal de agua, un aumento en la salinidad, o un pérdida de carga en los tubos de presión por encima del 10 %, hay que proceder al lavado de las membranas. Por medio del lavado se pueden recuperar total o parcialmente las características de funcionamiento de las membranas.

### *Limpieza mecánica*

La limpieza mecánica de las membranas consiste en pasar un cepillo o una esponja para desprender mecánicamente la suciedad depositada sobre ellas.

Este procedimiento requiere de tener acceso a la superficie activa de la membrana, lo cual sólo es posible en los módulos de placas. En los módulos tubulares podría hacerse circular por el interior de las membranas pequeñas bolas de esponja. En los módulos espirales y en los de fibra hueca, debido a su fabricación, el acceso es imposible.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el espesor de la capa activa es sumamente pequeña (del orden de 0.2 micras) y que la limpieza de esta naturaleza puede rayar y destruir dicha capa con las partículas abrasivas desprendidas, por lo que no es aconsejable utilizar como técnica de limpieza.

### *Limpieza a presión*

Este tipo de limpieza consiste en hacer llegar a las membranas, siguiendo el mismo recorrido de la solución a tratar, una solución exenta de sustancias en suspensión y disueltas, susceptibles de depositarse sobre la superficie.

Esta técnica se utiliza normalmente durante las paradas del sistema con objeto de:

- Reducir el retorno del solvente debido al fenómeno de ósmosis natural.
- Desplazar totalmente la solución a tratar del interior de las tuberías impidiendo así la corrosión de las partes metálicas y la precipitación de aquellas sales que puedan encontrarse en sobresaturación si se usase un dispersante.

Este procedimiento se utiliza también para desplazar los reactivos del interior de la planta cuando se somete a una limpieza química.

Los equipos de limpieza consisten normalmente en una o dos bombas que aspiran el permeado del depósito de almacenamiento y lo inyectan en la aspiración de las bombas de alta presión forzándolo a atravesar éstas y a llegar hasta las membranas a través de las tuberías de impulsión.

### *Limpieza química*

La limpieza química consiste en recircular a través de los módulos una serie de productos químicos capaces de disolver las precipitaciones o de eliminar los depósitos existentes sobre las membranas.

Los productos químicos que se emplean en el lavado deben de ser apropiados al agente causante del ensuciamiento y además la cadencia y el tiempo de duración es distinto según el tipo de ensuciamiento presente. En ocasiones el proceso se complica por haber más de una causa.

Tres son los tipos principales de lavados que se aplican a las membranas:

- Ácido para la eliminación de precipitados orgánicos.
- Alcalino para el ensuciamiento por materia orgánica.
- Lavados especiales para ensuciamientos biológicos.

Aunque el lavado que suele hacerse es el específico para cada situación, en muchos casos no se conoce la causa exacta del ensuciamiento y se realiza en dos fases, comenzando por un lavado ácido y siguiendo por otro básico, aunque en caso de ensuciamientos muy persistentes se realizan también lavados especiales.

Cualquiera que sea el lavado que se necesite se realiza de la misma forma. La limpieza se lleva a cabo recirculando a través de los módulos, en circuito cerrado, las soluciones preparadas. Como se puede ver en la figura 5.6.

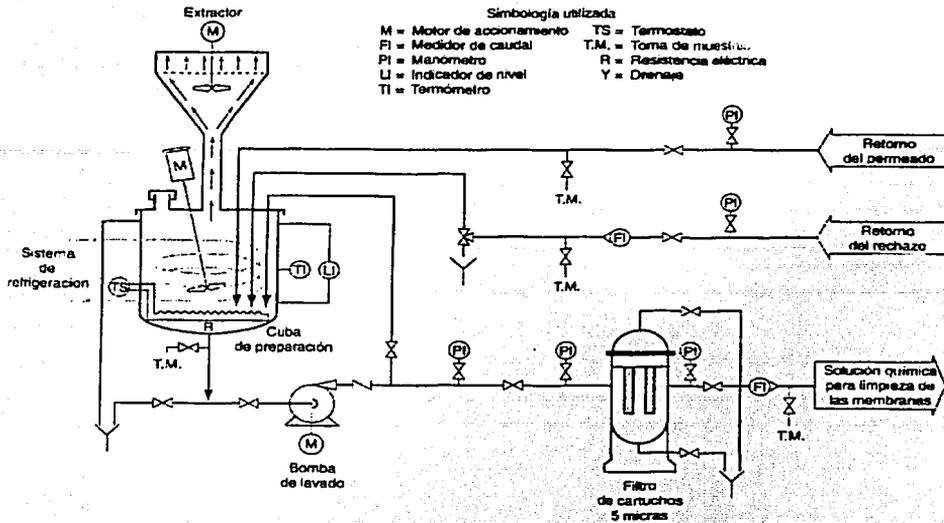


Figura 5.6. Representación esquemática del sistema de limpieza (Fariñas, 1999).

### Ácido

Tiene por fin la eliminación del ensuciamiento químico, es decir la disolución de precipitados salinos, carbonatos y sulfatos que se han depositado sobre las membranas.

En el depósito de lavado se disuelve el ácido en una solución de agua producto, libre de cloro hasta conseguir un pH muy bajo (3-4) y se empieza a recircular bombeando por el circuito de lavado, que deberá de llevar intercalado un filtro para proteger a las membranas de sustancias extrañas que se agregan con los reactivos o de la mala disolución de éstos, llevando el agua tratada al bastidor de membranas y tras pasar sobre ellas se recoge y se devuelve al depósito.

Si el pH baja demasiado se sube hasta los valores citados con hidróxido de amónico.

Se comprueba que el pH de salida de las membranas, que generalmente habrá subido algo y se continúa añadiendo ácido en el depósito y recirculándolo hasta que el pH se mantenga constante en todo el circuito.

Una vez lograda esta uniformidad, se paraliza la recirculación y se dejan las membranas embebidas en el líquido durante un periodo variable entre 2 y 4 horas. Pasado el tiempo

indicado, se pone en marcha nuevamente la recirculación con agua tratada que va expulsando al drenaje el líquido acidificado hasta que a la salida de las membranas se obtenga la misma calidad que a la entrada, en cuyo momento se considera que se ha producido el desplazamiento de todo el producto de lavado y se puede volver a poner en marcha el bastidor.

La limpieza se puede ensayar inicialmente con ácido acético, pero si los precipitados son persistentes, en su lugar se utiliza el ácido clorhídrico en solución del 0.1%, el fosfórico 0.4% o el cítrico 1%, que resultan más energéticos y eficaces. Además existe un conjunto de reactivos que recomienda el fabricante y que en esencia realizan el mismo papel que éstos, facilitando el desprendimiento de los precipitados.

Como los resultados no son siempre positivos se pueden ensayar otros productos aunque es aconsejable consultar con el fabricante de las membranas o de los productos químicos de la compatibilidad de ambos.

Aunque muchas veces el ensuciamiento no está claramente producido por precipitados, y en el caso del hierro es muy fácilmente detectable por el color rojizo que adquiere el agua de lavado, generalmente junto con los precipitados quedan retenidos contaminantes orgánicos o microorganismos, por lo que es aconsejable realizar seguidamente un lavado alcalino.

#### *Alcalino*

Es para combatir el ensuciamiento biológico y se realiza llevando el líquido de lavado a un pH muy alto, de al menos 11, mediante la adición al agua tratada de hidróxido sódico, conjuntamente con algún producto más energético entre los que se emplean:

- STPP (tripolifosfato sódico)
- EDTA en polvo o en solución.
- TSP (fosfato trisódico)

Cuando se ha introducido en las membranas la solución limpiadora se dejan también empapadas en ellas, pero durante un periodo más largo, que será como mínimo de ocho horas, y pudiendo prolongarse en función del grado de ensuciamiento y contaminación hasta 24 horas. El desplazamiento es similar como se ha referido anteriormente.

#### *Lavado mixto*

Se realiza para provocar la rotura de la capa de bacterias que cubren la superficie de las membranas y eliminarla posteriormente con un lavado normal y consistente en la aplicación de ambos tipos de lavado.

El primer lavado, que debe de ser alcalino, mata y desprende las bacterias, mientras que el ácido, que se aplica en segundo lugar elimina las precipitaciones y con ellas se arrastran las bacterias muertas.

Para ello se prepara en la cuba de lavado una solución de sosa hasta pH 12, utilizando sosa líquida. Se recircula la solución de lavado, añadiendo sosa en la cuba de lavado hasta estabilizar el pH.

Esta operación puede tardar más de una hora y deberá de hacerse con cuidado para no pasarse, efectuando lecturas periódicas de pH a la salida del bastidor hasta conseguir el valor deseado de pH.

A continuación con el pH estabilizado en 12 se recircula en el bastidor durante 1.5-2 horas.

Se desplaza todo el líquido de lavado con agua producto y a continuación se realiza el lavado normal con productos apropiados como el laurilsulfato, que resulta más fácil y no requiere elevar el pH. Posteriormente, se realiza un lavado con ácido como se ha descrito con anterioridad.

En otras ocasiones se realiza el lavado ácido y básico por duplicado, manteniendo la recirculación de la solución alcalina durante toda la noche.

Por la mañana se desplaza la solución básica y se lava con ácido cítrico o clorhídrico durante 2 horas. Se desplaza la solución ácida y se vuelve a lavar con una solución básica, recirculando durante 4 horas. Se vuelve a desplazar y se da un segundo lavado ácido recirculando durante un tiempo menor al anterior.

### *Lavados especiales*

Cuando la contaminación orgánica y biológica es importante, se recurre a tratamientos más intensos que el lavado alcalino. Estos no sólo se aplican en el proceso sino que en ocasiones se extienden a aplicaciones preventivas, aplicadas de forma periódica como pretratamiento, inmediatamente antes de las membranas.

Los productos que se aplican en estos casos responden al nombre genérico de biocidas, aunque su composición es muy variada. Sin embargo, deben tomarse precauciones en su uso y asegurarse después del lavado de que no quedarán restos sobre las membranas, puesto que son peligrosos.

También se puede hacer la desinfección con peróxido de hidrógeno diluido al 25% en

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

agua de producto. Como alternativa a veces se usa ácido acético y ácido peracético que se diluyen al 1% en agua de producto para obtener peróxido de oxígeno.

El peróxido se recircula durante 20 minutos y a un pH 3-4 para conseguir los mejores resultados biocidas. Después, como en los casos anteriores, se dejan empapar las membranas en una solución durante un tiempo de al menos 2-12 horas.

El formaldehído al 0.3-0.5 % también puede emplearse pero al ser peligroso para la salud se recomienda que después de su aplicación se haga funcionar la instalación durante al menos 6 horas tirando el agua al drenaje, para garantizar que no está contaminada. Además cuando se arranca de nuevo tras el tratamiento se produce un descenso en el caudal que se recupera posteriormente.

El sulfato de cobre, que es también alguicida, puede utilizarse en concentraciones de 0.1-0.5 ppm en continuo pero a pH bajo para evitar precipitados de hidróxido de cobre. Sin embargo, por esta causa no es tan frecuente su uso, siendo preferible su utilización en los depósitos o tomas desde los que se alimenta la instalación para evitar la proliferación de algas en ellos.

Como algunos de estos productos se aplican a veces en línea de forma periódica, hay que suspender durante la aplicación del producto el suministro de agua tratada que se debe de tirar al drenaje.

Aparte de biocidas más o menos específicos, se emplean también en la desinfección tanto el formaldehído como el peróxido de hidrógeno.

## **5.5 Consideraciones económicas**

La viabilidad de una instalación de desalación depende en primera instancia del precio final al que se pueda obtener el agua producto.

Sin embargo, hay que tener en cuenta la necesidad que se va a cubrir mediante el agua desalada y el sector económico al que se dedique, que por su mayor o menor poder adquisitivo podrá justificar la instalación, al menos desde un punto de vista social o puramente económico.

Las instalaciones desaladoras precisan de una fuente de energía para realizar el proceso, sea en forma de vapor o electricidad, y dado que ésta es escasa y por tanto cara, deberá buscarse siempre el menor consumo energético.

Como hemos visto la tecnología de desalación ha progresado notablemente en los últimos 15 años, el mercado se ha ampliado considerablemente y las aplicaciones también, sin embargo, es todavía el aspecto económico el que limita su expansión.

La escasez de agua en muchos lugares del mundo es importante, las sociedades ven limitado su progreso por la dependencia creciente que existe con respecto a ese elemento y los ciudadanos padecen con más frecuencia de escasez, a pesar de que la tecnología es capaz de solucionar el problema.

No hay que olvidar que la civilización surge precisamente en una zona del mundo situada entre ríos importantes, y que durante siglos toda la historia se desarrolla en ese ambiente de abundancia de agua.

### **5.5.1 Estructura de los costos**

Puesto que cada instalación desaladora constituye un ente único, dado que este tipo de plantas se construyen a la medida, los costos del agua pueden ser muy variables de un caso a otro, no sólo dependiendo del agua que se trate.

La ósmosis inversa tiene una gran flexibilidad para adaptarse a cualquier tipo de circunstancias, por lo que es posible realizar diseños muy distintos para un mismo tipo de agua, en función de las circunstancias que pueden presentarse, y cumpliendo en todas ellas el agua de producto unas condiciones mínimas.

La estructura de costos del producto obtenido en una planta de ósmosis inversa es, en general, como sigue :

<b>C O S T O S</b>	Fijos	Amortización Personal de operación	
	Variables	Reactivos Energía eléctrica Reposición de membranas Mantenimiento	Para el pretratamiento Para acondicionar el permeado Para la limpieza de las membranas

### 5.5.2 Costos fijos

Los costos fijos son los que se generan como consecuencia de la construcción de la planta. Una vez terminada ésta repercuten en la misma tanto si funciona como si, por circunstancias especiales, debe de estar parada.

Los principales costes dentro de los fijos se atribuyen a :

#### *Amortización de la inversión*

Se entiende por inversión todos los gastos iniciales que se generan al poner en marcha un proyecto de este tipo. La tabla 5.1 muestra la inversión a realizar en miles de dólares por cada m<sup>3</sup>/día instalado en función del tamaño de la planta. Esta inversión incluye todos los costos: captación, conducciones, edificios, equipos mecánicos, de control, montaje y puesta en marcha.

Tabla 5.1. Costos de inversión según el tamaño de la planta (Fariñas: 1999).

Producción (m <sup>3</sup> /día)	500	2,000	5,000	10,000	20,000	30,000	≥40,000
Inversión (dls/m <sup>3</sup> /día)	1,700	1,350	1,100	960	870	780	720
Costo de la planta (millones de dls)	0.85	2.70	5.50	9.60	17.40	23.40	28.80

Estos datos se han obtenido basándose en los costos de las distintas plantas construidas o en fase de construcción existentes en España, actualizando su inversiones al año 98.

Lógicamente, estos costos son aproximados e incorporan todos los elementos básicos exigidos por una planta desaladora (bombas de cámara partida, tuberías, válvulas y bombas de agua de mar, planta totalmente automatizada, sistemas de control etc.)

Como se puede ver en dicha tabla, en esta aplicación existe una importante economía de escala en la inversión, lo que se traduce en la conveniencia de centralizar la producción de agua desalada, aumentando el tamaño de la planta.

En las instalaciones desaladoras, al contrario de otro tipo de obras de tratamiento de aguas, la obra civil no es tan importante, pudiéndose establecer para el caso de las instalaciones de agua de mar los siguientes porcentajes respecto a la inversión total:

Tabla 5.2. Porcentaje de la inversión de cada componente (Fariñas, 1999).

Elemento	% de la inversión
Membranas	20-30
Bombas	15-20
Tuberías y válvulas	15-20
Equipos eléctricos	7-10
Instrumentación	3-5
Edificios	10-15
Toma de agua	2-5
Impulsión del producto	5-10

Aunque a principios de los años 70 se consideraba que el periodo de amortización de una desaladora era de 20 años, el tiempo transcurrido desde entonces ha puesto de manifiesto que la evolución de la tecnológica puede dejar la planta obsoleta a pesar de estar en funcionamiento.

Considerando este factor, los periodos de amortización "razonables" para esta tecnología se muestran en la tabla 5.3.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.3. Tiempo de amortización (Fariñas, 1999).

Producción (m <sup>3</sup> /día)	Tiempo de amortización (años)
< 5,000	10
≥ 5,000	15

No obstante que el tiempo de amortización pueda haber equipos que estén todavía en funcionamiento, la experiencia demuestra que no son aprovechables de cara a una que nueva planta sustituya a la antigua, lo que se traduce en que hay que considerar que el valor de la planta es nulo.

### *Personal*

El costo por m<sup>3</sup> debido al personal depende en gran medida del tamaño de la planta y de su grado de automatización. En las desaladoras de bajo caudal tiene especial relevancia el hecho de que la planta esté integrada o no dentro de un complejo productivo o turístico. En este caso, los operarios pueden realizar al mismo tiempo labores en otras instalaciones por lo que su dedicación a la planta de desalación sólo es parcial.

En las plantas con producciones iguales o superiores a los 10,000 m<sup>3</sup>/día la dedicación del personal de operación y mantenimiento debe de ser total y exclusiva.

Para las pequeñas instalaciones (500 - 2,000 m<sup>3</sup>/día) se precisa de cuatro operarios compartidos al 50% con otras instalaciones. Además del personal anterior se precisa de un mantenimiento externo.

Las desaladoras de tamaño medio precisan 5 operadores, 3 personas para mantenimiento, 1 analista de laboratorio, 1 jefe de producción y un administrativo.

Las de gran tamaño (superiores a 30,000 m<sup>3</sup>/día) precisan de una estructura más complicada como se muestra en la tabla 5.4

Tabla 5.4. Estructura del personal para una planta con una producción superior a 30,000 m<sup>3</sup>/día (Farías, 1999).

Puesto	Número de personas
Jefe de planta	1
Jefe de mantenimiento	1
Operadores	5
Oficiales de mantenimiento mecánico	2
Oficiales de mantenimiento eléctrico	2
Oficiales de mantenimiento y control	2
Mantenimiento de tuberías y válvulas	2
Analista de laboratorio	1
Auxiliar administrativo	1
Ayudantes	7
Total	24

Estos datos son aproximados. Circunstancias especiales pueden aconsejar realizar la producción con más o menos personal, de mayor o menor cualificación.

### 5.5.3 Costos variables

#### *Reactivos*

Todas las instalaciones desaladoras utilizan reactivos químicos tanto en el pretratamiento del agua a desalar como en el posterior del agua producida así como en la limpieza de las membranas, pero el número de productos empleados y las dosificaciones son muy variables, tanto en función de las características del agua a tratar como en la forma que opera la planta. Los principales reactivos químicos que se utilizan en las distintas fases del proceso se indican en la tabla 5.5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

Tabla 5.5. Reactivos y funciones de los mismos (Fariñas, 1999).

Fase de proceso	Producto químico	Funciones
Pretratamiento	Hipoclorito de sódico	Desinfectante
	Coagulante	Eliminación de materia orgánica y/o actividad biológica Reducción de SDI
	Ácido sulfúrico	Control de precipitados de $\text{CaCO}_3$ Mejor acción bactericida del cloro
	Polielectrolito	Ayuda para la floculación Produce flóculos de mayor tamaño
	Dispersante	Secuestrante de las poco solubles ( $\text{CaSO}_4$ , $\text{BaSO}_4$ , $\text{SrSO}_4$ , $\text{CaF}_2$ )
	Bisulfito sódico	Eliminación de cloro residual. En algunos casos se emplean para la regulación de pH y control de los desarrollos biológicos
	Hidróxido cálcico	Control del pH y calcificación del agua
Postratamiento	Anhidrido carbónico	Carbonatación del agua
	Hipoclorito sódico	Desinfectante
Limpieza de las membranas	Diversos reactivos	Limpieza química de las membranas

**Pretratamiento** El consumo de reactivos en esta fase depende de la calidad del agua de mar de partida y, por tanto, del tipo de captación realizado.

El agua de mar captada a través de un pozo costero tendrá en general muy poca materia en suspensión y escasas sustancias coloidales, por lo que los consumos de coagulantes y polielectrolito serán prácticamente nulos.

El agua de mar procedente de una captación superficial puede presentar un contenido apreciable en coloides y materia en suspensión según el tipo de captación realizado, la ubicación de la toma etc. En tal caso, los consumos de coagulante y polielectrolito pueden

ser importantes.

El agua captada a través de un pozo costero suele tener muy poca materia orgánica y consecuentemente poca actividad biológica. El agua superficial suele presentar una composición química estable con el tiempo, no existiendo riesgo de precipitación de sales insolubles, por lo que no suele requerir la adición de un dispersante. Sin embargo, la composición química del agua captada a través de un pozo costero suele evolucionar, pudiendo existir el riesgo de precipitación de sales insolubles. En este tipo de captación es preciso utilizar generalmente un dispersante.

El consumo de reactivos, particularmente el biosulfato sódico, también depende de la membrana seleccionada. Algunos fabricantes de membranas recomiendan utilizar dosis de bisulfato sódico de 30 a 60 mg/l para controlar los desarrollos biológicos y estabilizar las membranas. Esta dosificación elimina el consumo de ácido sulfúrico y de hipoclorito sódico, pero incrementa notablemente el costo del m<sup>3</sup> del agua desalada.

El tamaño de la planta tiene muy poca influencia en el costo del m<sup>3</sup> por este concepto. La economía que suele producirse en las plantas de gran tamaño se debe a la obtención de un mejor precio para el reactivo gracias a su elevado consumo.

La tabla 5.6 recoge, de forma aproximada, las dosis medias de reactivos por m<sup>3</sup> de agua bruta utilizadas habitualmente en este tipo de plantas. Para obtener las dosis por m<sup>3</sup> de agua desalada es necesario dividir las dosis indicadas por la conversión (porcentaje de recuperación expresado en tanto por uno).

Tabla 5.6. Dosis de reactivos para el pretratamiento (Fariñas, 1999).

	Tipo de funcionamiento	Consumo de productos comerciales (g/m <sup>3</sup> ) y riqueza de los mismos					
		Hipoclorito sódico 120 mg/l	Cloruro férrico 40%	Ácido sulfúrico 98%	Poli-electrolito 100%	Dispersante 100%	Biosulfato sódico 100%
Pozo	Convencional			30.6		3	
	Bisulfato					3	35
Superficial	Convencional	19.5	12.5	30.6	2		
	Bisulfato	19.5	12.5		2		35

**Acondicionamiento del permeado** Cuando el agua desalada se utiliza directamente para el abastecimiento público, sin mezclarse con otras aguas, es necesario que ésta cumpla con la reglamentación vigente.

Para ello, es necesario ajustar el pH y la dureza total, antes de su envío a la red, además

Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

del cloro necesario para asegurar la desinfección, una serie de sales, como:

- Bicarbonato sódico y una sal cálcica o magnésica.
- Hidróxido cálcico y una sala cálcica o magnésica.
- Hidróxido cálcico y gas carbónico.

**Limpieza de las membranas**, las membranas que trabajan con agua superficial suelen ensuciarse más rápidamente que las que lo hacen con agua de pozo, lo que se traduce en una mayor necesidad de limpieza por parte de las primeras.

La tabla 5.7 recoge el número de limpiezas anuales que puede esperarse con las dos procedencias del agua.

Tabla 5.7. Número de limpiezas anuales a realizar en función del origen (Fariñas, 1999).

Origen del agua	Número de limpiezas anuales
Pozo (agua de muy buena calidad)	1
Superficial (agua de mala calidad)	6-12

*Energía eléctrica*

Los consumos de energía eléctrica en una planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa se centran en tres puntos:

- Bombeo de agua de mar
- Bombeo de alta presión
- Equipos complementarios

Además de estos puntos habría que añadir el bombeo exterior del agua producida. Su valor no se ha considerado en el presente estudio debido a que cada instalación suelen requerir presiones diferentes, ajustadas a sus peculiaridades de la red de distribución.

En la actualidad, según el tamaño de la instalación, se utilizan distintos tipos de bombas para impulsar el agua de mar hacia las membranas y también distintos tipos de turbinas para recuperar la energía residual del rechazo.

Para agua de mar los consumos están entre 6.5 kwh/m<sup>3</sup>, cuando no se utilizan equipos de recuperación de energía, 3.75-4.5 kwh/m<sup>3</sup>, en función de los elementos que se instalen, dado que la capacidad de la planta también justifica la utilización de determinados equipos que no están disponibles en instalaciones pequeñas.

Los tipos de máquinas utilizados así como los consumos específicos de energía totales

en función del tamaño de la planta se recogen en la tabla 5.8. Dicha tabla es válida para obtener una salinidad inferior a 400 mg/l. Si se quisiera obtener agua cuya salinidad estuviese por debajo de los 200 mg/l habría que incrementar los consumos específicos en 0.77 kwh/m<sup>3</sup>.

Tabla 5.8. Consumos específicos de energía eléctrica en función del tamaño de la planta (Fariñas, 1999).

Producción (m3/día)		500-2,000		5,000-10,000		≥ 20,000	
Tipo de maquina	Bomba	Pistones	Segmentos	Segmentos	Cámara partida	Cámara partida	Camara partida
	Turbina	Pelton	Bomba segmentos	Bomba segmentos	Bomba cámara partida	Pelton	Bomba cámara partida
Consumo específico para agua de pozo (kwh/m <sup>3</sup> )		4.50	6.5	5.90	4.60	4.20	4.25
Consumo específico para agua superficial (kwh/m <sup>3</sup> )		4.85	6.85	6.20	4.90	4.45	4.50

### *Reposición de membranas*

Para hacer frente a la degradación que las membranas sufren con el tiempo, se debe de tener en cuenta un costo para sustituirlas, de forma que con esta reposición la planta siga manteniendo sus características normales de producción. Esta reposición de membranas debe, por tanto ser considerada como un gasto de producción al igual que los productos químicos o la energía eléctrica.

La experiencia ha demostrado que durante los primeros años de vida de una planta desaladora de ósmosis inversa, el grado de reposición es bajo. A medida que va aumentando la edad media de las membranas, se va incrementado su grado de deterioro, por tanto, el porcentaje de reposición.

El costo medio de la reposición de membranas durante la vida de una planta de ósmosis inversa ha sido estimado entre un 20 y 25 % del costo total de la operación. Esta situación se debió a que los fabricantes adoptaron un grado de reposición hasta un 20% anual. En la actualidad, tras más de 20 años de experiencia, se han mejorado notablemente los procesos de fabricación y, consecuentemente, tanto la calidad de las membranas como su precio, lo que ha reducido de forma notable su incidencia en el costo de producción de m<sup>3</sup> de agua desalada.

## Diseño de sistemas de desalación por ósmosis inversa

En estos momentos, el grado de reposición que garantizan los fabricantes de membranas es del 12% anual, a razón del 1% mensual en base acumulativa, con un tope del 60% en cinco años.

La práctica ha demostrado, sin embargo que la reposición anual de membranas, cuando se trabaja con agua de pozo, es del orden del 5 al 8%. Este porcentaje aumenta hasta el 10-18% cuando se trabaja con agua de mar superficial, dependiendo de su contenido de materia orgánica.

El costo de reposición de membranas depende sobre todo de las características del agua bruta y en muy poca medida del tamaño de la planta.

En el caso de trabajar con agua superficial muy contaminada, las frecuentes limpiezas que habrá que realizar, reducirán notablemente su vida media, lo que incrementa su reposición.

### *Mantenimiento*

En este apartado se debe de incluir los materiales de mantenimiento (repuestos, lubricantes , etc.), materiales para control preventivo y reparaciones para conservación de las instalaciones así como algunos consumibles (cartuchos filtrantes, por ejemplo). No se considerará el personal dedicado a estas operaciones que ya se ha considerado anteriormente.

El costo de mantenimiento de un equipo es variable a lo largo de su vida, pero para calcular el costo de metro cúbico de agua desalada es preciso simplificar el problema introduciendo un costo anual de mantenimiento (Fariñas, 1999).

La tabla 5.9 recoge, de forma resumida, los porcentajes a aplicar al precio de costo de los distintos equipos para obtener el gasto medio anual debido al mantenimiento.

Tabla 5.9. Costos anuales de mantenimiento. Porcentaje a aplicar a los distintos equipos (Fariñas, 1999).

Equipo	Porcentaje a aplicar
Recipientes y tanques	0.8
Equipos mecánicos rotativos	4.3
Equipos mecánicos de acondicionamiento de máquinas	1.5
Instrumentación	4.5
Tuberías, válvulas y accesorios	3.0
Bombas centrífugas	4.2
Electricidad	4.3
Obra civil	0.3

Evidentemente estos porcentajes pueden sufrir modificaciones en función del tipo de mantenimiento que se lleva a cabo por parte de los responsables de la planta. Los datos señalados son válidos para un mantenimiento preventivo de los equipos, lo que implica mayores gastos de mantenimiento pero también una mayor vida de los mismos.

Aplicando la tabla anterior se obtiene resultados bastante ajustados a la realidad. De forma global, para hacerse una estimación, puede considerarse que el costo de mantenimiento está comprendido entre el 1% y el 3% del valor de los equipos instalados.

#### 5.5.4 Costos totales

La figura 5.7 muestra la evolución aproximada del costo por m<sup>3</sup> de agua desalada en función del tamaño de la planta, con los parámetros económicos del año 1999.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

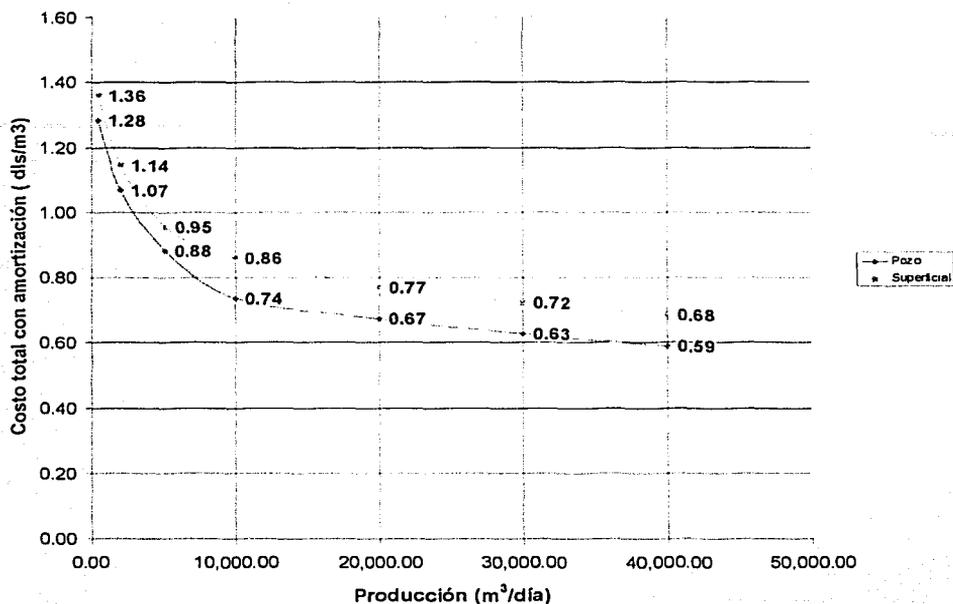


Figura 5.7. Intervalos de fluctuación del costo de m<sup>3</sup> de agua de mar desalada incluyendo amortización (Fariñas, 1999).

A la vista de todo lo indicado, puede concluirse en general que:

- Conviene centralizar la producción de agua salada y aumentar el tamaño de las plantas. La escala de plantas es importante.
- La instalación de bombas de cámara partida en lugar de bombas de segmentos en las plantas de gran tamaño incrementa ligeramente la inversión pero permite una economía importante en el consumo de energía eléctrica. El mismo efecto produce el uso de turbinas Pelton en lugar de turbinas de contra presión.
- Siempre que sea posible hay que recurrir a una captación del agua de mar a través de un pozo costero y utilizar una dosificación convencional, es decir, sin consumos elevados de bisulfato sódico. Estas soluciones permiten reducir tanto el costo de reposición de membranas como el consumo de reactivos.

## 6 Conclusiones

La tecnología de la ósmosis inversa se ha desarrollado de tal manera que su aplicación en la desalación de aguas ya es una realidad. Actualmente existen gran número de plantas de tamaño pequeño y grande, que funcionan correctamente y que permiten obtener un determinado producto, en este caso, agua apta para uso y consumo humano, a precios más competitivos que otras tecnologías.

Con respecto a los objetivos específicos de la tesis se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. La tecnología de ósmosis inversa se basa en el fenómeno natural de ósmosis, que se produce en las células de los ser vivos, por el cual dos soluciones de distintas concentraciones salinas puestas a través de una membrana tienden a igualar sus concentraciones. Se puede invertir este, proceso, si aplicamos una presión por arriba de la presión ósmótica en la solución más concentrada, el movimiento se produce desde la solución más concentrada hacia las más diluida, originándose el fenómeno de la ósmosis inversa.
2. Existen en la actualidad distintos tipos de membranas con las cuales se puede tratar casi cualquier tipo de agua y, en consecuencia, se ha buscado dar las mejores condiciones de rechazo, operación y durabilidad para la aplicación deseada, ya que los fabricantes de membranas de ósmosis inversa han diversificado sus aplicaciones.  
Los elementos principales de un sistema de ósmosis inversa son: el equipo de bombeo de alta presión y los equipos de recuperación de energía que son los encargados de aplicar la presión a la solución concentrada y, por otra parte, las membranas y los módulos en los cuales se agrupan éstas según las necesidades de producción.
3. El diseño de un sistema de ósmosis inversa se basa en el conocimiento de las características la composición del agua de alimentación, así como de los principales criterios de decisión para la elección de los distintos tipos de elementos que componen un sistema. Aunado a estos, los fabricantes han puesto a disposición de los técnicos programas de cómputo con los cuales es posible realizar un diseño preliminar bastante completo, uno de los cuales se aplicó en este trabajo.
4. Debido a que las características de operación en cada instalación de ósmosis inversa son muy específicas, sólo se realizó una secuencia general de los pasos esenciales a seguir en la operación de este tipo de sistemas.

## **Bibliografía**

- AWA, 1998. "Tratamiento del agua por procesos de membrana" Mexico, McGraw-Hill.
- Brown, T., LeMay, H., Brusten, B., 1993. "Química la ciencia central". Mexico, Prentice Hall.
- César Valdez, E., 1988. Desalación por ósmosis inversa. Tesis de Licenciatura, Facultad de ingeniería UNAM.
- Fariñas, M. 1999. "Ósmosis inversa. Fundamentos, Tecnología y aplicaciones". España, McGraw-Hill.
- Gutiérrez Morales, E., 1991. Procesos de desalación de agua de mar: principios y costos de implantación. Tesis de Licenciatura. México, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Maron, S.; Purtton, C., 1968. "Fundamentos de fisicoquímica" México, Editorial Limusa Wiley.
- Medina, J.A., 2000. "Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa" España, Ediciones Mundi-Prensa.
- Morales Mújica, R., 1999. La desalación como alternativa de abastecimiento de agua para las ciudades costeras de Baja California Norte. Tesis de Licenciatura. México, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ruiz Mazon, V., 2001. La desalinización. Una alternativa para el abastecimiento de agua en México. Tesis de Licenciatura. México, Facultad de ingeniería, UNAM.
- Vite Arroyo, M., 2001. Ingeniería de los sistemas de membrana aplicados a la desalación de agua. Tesis de Licenciatura. México, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Web 1 [http://www.go.hrw.com/atlas/span\\_hm/sdarabia.htm](http://www.go.hrw.com/atlas/span_hm/sdarabia.htm)
- Web 2 <http://www.agrwat.gov.sa/EnglishPg/EngPage.htm>
- Web 3 <http://www.rgsystems.org>
- Web 4 <http://www.quintanroo.gob.mx/nuestroestado/>
- Web 5 [http://www.fonatur.gob.mx/des-rivieramaya/home\\_riviera.htm](http://www.fonatur.gob.mx/des-rivieramaya/home_riviera.htm)

**Web 6** <http://www.membranes.com>

**Web 7** <http://www.osmonics.com/products/>

**Web 8** <http://www.dow.com>

**Web 9** <http://www.kochmembrane.com>

**Web 10** <http://www.somicon.com/products/>

**Web 11** <http://www.aedyr.com/desaladoras.htm>

**Weber, W., 1979. "Control de calidad del agua Procesos fisicoquímicos" España, Editorial reverté.**