

MÓDULO DESALACIÓN

Introducción a la Desalación por
ósmosis inversa. Conceptos Básicos

Profesor: Carlos Tejedor

Edición 2008

ÍNDICE:

- 1. PRINCIPIOS DE LA ÓSMOSIS INVERSA**
 - 1.1. INTRODUCCIÓN: LA IMPORTANCIA DEL AGUA COMO RECURSO ESCASO
 - 1.2. COMPONENTES DEL AGUA
 - 1.3. UNIDADES DE MEDIDA DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA
 - 1.4. FUENTES DE OBTENCIÓN DE AGUA
 - 1.5. TRATAMIENTOS ASOCIADOS AL ABASTECIMIENTO
 - 1.6. CALIDAD DEL AGUA POTABLE R.D. 140/2003
 - 1.7. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE DESALACIÓN.
- 2. OSMOSIS INVERSA.**
 - 2.1 CONCEPTO
 - 2.2 VARIABLES DEL PROCESO
 - 2.3 ESTRUCTURA DE LAS MEMBRANAS
 - 2.2.1.1 CONFIGURACIÓN DE LAS MEMBRANAS
 - 2.2.1.2 MONTAJE DE LOS MÓDULOS
 - 2.3 CRITERIOS DE OPERACIÓN
 - 2.3.1 INDICE DE FOULING
 - 2.3.2 CONCENTRACION DE SALES EN EL AGUA DE ALIMENTACIÓN CON TENDENCIA A PRECIPITAR
 - 2.3.3 PRESIÓN DIFERENCIAL
 - 2.3.4 OTROS PARÁMETROS DE CONTROL
 - 2.4 ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS DE R.O. Y SU ELIMINACIÓN
 - 2.4.1 ELEMENTOS QUE ORIGINAN FOULING EN LAS MEMBRANAS DE R.O.
 - 2.4.2 ELIMINACIÓN DE FOULING
 - 2.4.3 SOLUCIONES DE LIMPIEZA
 - 2.4.4 LIMPIEZA Y DESPLAZAMIENTO DE LAS MEMBRANAS
- 3. DISEÑO DE PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA**

1. PRINCIPIOS DE LA ÓSMOSIS INVERSA

1.1. La importancia del agua como recurso escaso.

La mayor parte de la gente es consciente de la importancia del agua para la vida. Los múltiples usos a que se destina el agua (consumo urbano, agricultura, ganadería, producción de energía, industria, etc) y la creciente demanda, la han convertido en un recurso limitado cuando no escaso, especialmente en nuestro país, lo que se ha puesto de manifiesto en las campañas promovidas en los últimos años por diversos organismos tratando de convencer a la población de este hecho. En los lugares con escasos recursos hídricos, se hace necesario la búsqueda e incorporación de nuevas fuentes de agua aptas para el consumo, es por ello que el hombre ha puesto el ojo en el mar como fuente de agua dulce y ha desarrollado las tecnologías necesarias para poder desalar su agua.

Por otra parte, todo ello ha significado una creciente intervención de los gobiernos en la gestión cuantitativa y en su regulación cualitativa. La incorporación de España a la CEE supuso la necesidad de equiparar nuestra reglamentación a la europea, para alcanzar los niveles de calidad, tanto en el suministro como en los vertidos, teniendo este aspecto gran importancia en el desarrollo de las diferentes tecnologías para el tratamiento del agua.

La capacidad total actual de agua desalada entre todas las técnicas en España se encuentra entorno a los 300 Hm³/año. Actualmente, existe una proporción similar entre el agua producto desalada obtenida de fuentes marinas y salobres. No obstante, esta proporción va a inclinarse hacia la desalación de aguas marinas ya que las aguas salobres se encuentran más explotadas y la profundidad a la que se encuentran en muchos casos, compromete la explotación de esta agua.

El 95% de producción de agua desalada procedente del mar se utiliza para abastecimiento urbano y el 5% en agricultura.

Del agua salobre un 20% se emplea para abastecimiento urbano, un 50 % en agricultura y un 30 % en industria.

Un 30% del total del agua desalada es utilizada para riegos agrícolas, con una extensión de riegos que supera las 10.000 ha.

PRINCIPALES PLANTAS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR EN ESPAÑA		
Nombre	Capacidad (m³/día)	Año
Carboneras (Almería)	125.000	2.002
Cartagena (Murcia)	65.000	2.002
Palma de Mallorca	63.000	1.998-2.001
Marbella (Málaga)	55.000	1.997
Las Palmas III (Gran Canaria)	53.000	1.990-2.001
Almería	50.000	2.002
Alicante	50.000	2.002
Las Palmas –Telde (Gran Canaria)	35.000	2.002
Cdad Reg Mazarrón (Murcia)	30.000	1.997-2.000
Sureste G.Canaria	25.000	1.995-2.000
Adeje – Arona (Tenerife)	20.000	1.998-2.000
Sta Cruz de Tenerife	20.000	2.001
Lanzarote III	20.000	1.992-1.996
Inalsa IV (Lanzarote)	20.000	1.999
Maspalomas II (Gran Canaria)	18.500	1.988-1.998
Ceuta	16.000	1.998
Aragua (Gran Canaria)	15.000	1.991-1.998
Telde (Gran Canaria)	10.000	1.998
Galdar II (Gran Canaria)	8.000	2.002
S. Antonio (Ibiza)	8.000	1.997
Tirme (Mallorca)	2.680	2.000

Fuente: AEDYR (Asociación Española de Desalación y Reutilización)

1.2. Composición del agua

A todos nos han explicado casi desde niños que el agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Sin entrar en las consideraciones de la forma de unión entre esos elementos químicos, el agua tiene otros componentes que, si bien intuimos, a veces no somos conscientes de su importancia.

Unas veces el contenido de contaminantes sólidos (TSS) es elevado, lo que implica que hay que aplicar procesos de separación y filtración más o menos selectivos (ver la tabla anterior) antes de su utilización.

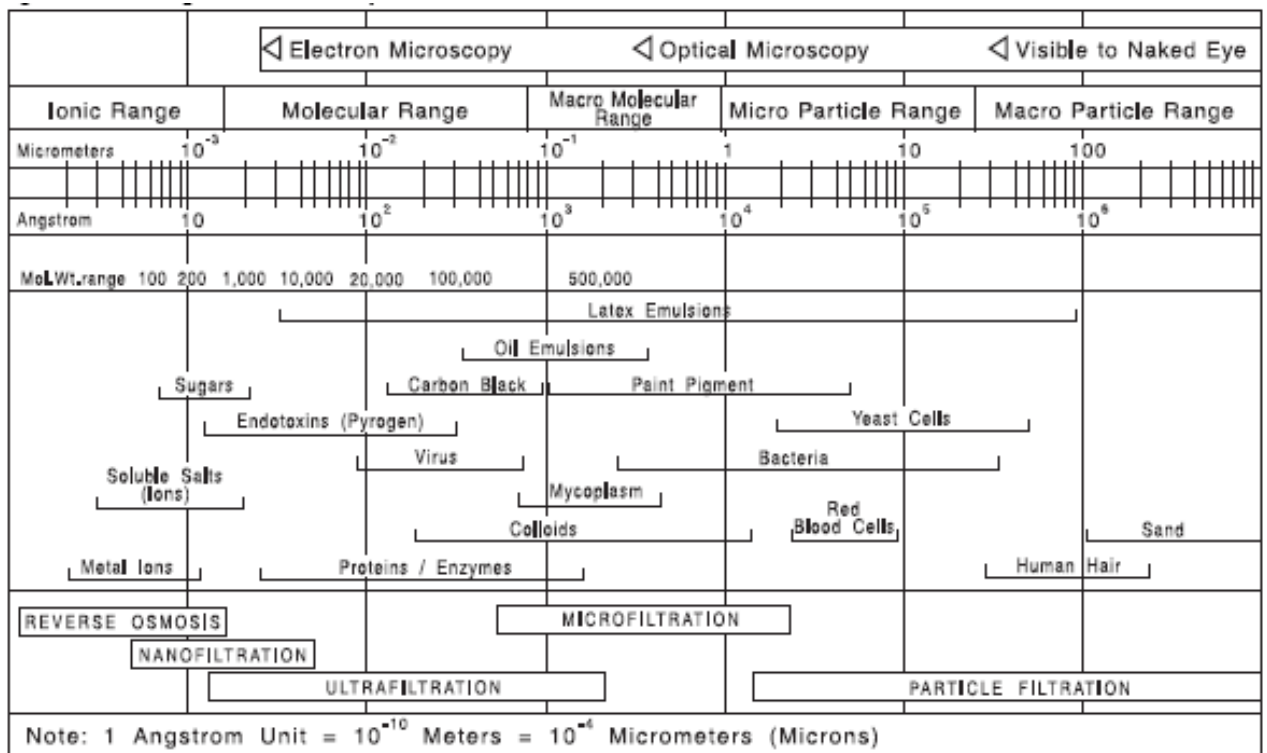
Otras el contenido de sales disueltas (TDS) es elevado o el tipo de sales es perjudicial para su uso posterior, lo que implica procesos físicos y químicos de separación (intercambio iónico, reactivos precipitantes, membranas semipermeables, etc).

En general es típico que el agua procedente de fuentes naturales contenga tanto materias en suspensión como disueltas, por lo que se requerirá aplicar una mezcla de procesos tanto físicos como químicos antes de su utilización.

Los sólidos en suspensión más comunes son: Algas, arena, limos, arcilla, polen, coloides, materia orgánica, restos de vegetales, bacterias. Virus,...

Los materiales en disolución suelen ser sales minerales, como carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, silicatos, en menor proporción fluoruros y a veces nitritos.

Estas sales están mezcladas con metales alcalinos y alcalino-terreos, como potasio, sodio, magnesio y calcio. En menor proporción puede haber estroncio, bario, boro y metales pesados.



1.3. Unidades de medida

La cantidad de estas sustancias en el agua se expresa en ppm, mg/l, g/m^3 o meq/l.

Una unidad de medida relacionada con la salinidad del agua es el $\mu S/cm$, que es un índice de cómo conduce el agua la electricidad, dado que las soluciones con sales disueltas son conductoras de la electricidad.

La relación aproximada es de 1 microS/cm es 0,62 mg/l, pero esta es una relación nada exacta, como veremos en los ejemplos de análisis que se exponen más adelante.

El pH del agua es un parámetro importante a al hora de diseñar un tratamiento, ya que los reactivos que se utilizan en los procesos requieren un rango de pH determinado para ser efectivos.

1.4. Fuentes de obtención del agua.

Las fuentes de las que se obtiene el agua en la naturaleza son las siguientes:

- Manantiales.
- Pozos.
- Embalses,
- Ríos.
- El mar.

Todas estas fuentes casi nunca permiten el consumo directo en su estado natural, con lo cual el agua es necesario tratarla.

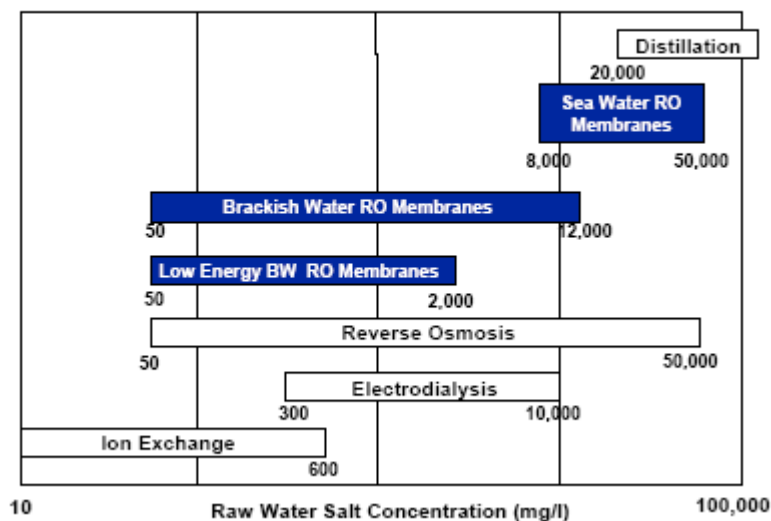
1.5. Tratamientos asociados al abastecimiento del agua

El abastecimiento de agua para cualquier uso supone unos costes que, de forma muy resumida, se pueden concretar, dependiendo de la calidad del agua bruta, de su fuente de suministro y del uso al que se destina.

En función de la calidad del agua bruta, de su fuente de suministro y del destino para el que se va a emplear se definen unos tratamientos que se aplican a dicho agua. Básicamente son los siguientes:

- Bombeo (energía eléctrica)
- Tratamientos:
 - Coagulación
 - Floculación
 - Decantación
 - Filtración
 - Microfiltración
 - Ultrafiltración
 - Nanofiltración
 - Ósmosis inversa
 - Electrodialisis
 - Desinfección.

Figure 1.1 Major desalination processes



La mayoría de estos tratamientos se estudian en otros módulos del master. En este módulo hablaremos de la ósmosis inversa básicamente, aplicada a la desalación para producir agua potable. Con objeto de hacernos una idea de la calidad del agua potable, en el apartado siguiente se mencionan los parámetros que debe cumplir todo agua potable según la normativa aplicable en nuestro país. Dicha normativa viene definida en el Real Decreto 140/2003, que supera y anula al previo R.D. 1138/1990.

1.6. Calidad De las aguas de consumo humano R.D. 140/2003

A continuación se incluye la tabla con los parámetros máximos de calidad según el R.D. 140/2003 relativo a aguas potables para consumo humano.

Parámetro	R.D. 1138/1990	R.D. 140/2003	Observaciones	Método estándar de tratamiento
Sabor	3-25°C	3-25°C		Carbón activado + convencional
Sodio	150 mg/l	200 mg/l	Mayor permisividad	Osmosis Inversa
Sulfato	250 mg/l	250 mg/l		Osmosis inversa (con precaución precipitación)
Turbidez ETAP	6 UNF	1 UNF	Valor mucho más restrictivo	Filtración fina
Turbidez en red	6 UNF	5 UNF	Más restrictivo	
Magnesio	50 mg/l		No aparece en nuevo Decreto	
Potasio	12 mg/l		No aparece en nuevo Decreto	
Dureza	30 mg Ca/l**		No aparece en nuevo Decreto	
Alcalinidad	60 mg HCO ₃ /l**		No aparece en nuevo Decreto	
Índice de Langelier		± 0,5	No aparece en Decreto antiguo	

* Plaguicida individual: 0,1 microg/l excepto: Aldrin, Dieldrin, Heptacloro y Heptacloro epóxido (0,03 microg/l)

Total plaguicidas: 0,5 microg/l

** Concentración mínima exigida para las aguas potables de consumo público que hayan sido sometidas a un tratamiento de ablandamiento.

Elaborado por: DINOPEC, Sociedad de Aguas y Medioambiente
Revisado por: Fundación Centro Canario del Agua

**COMPARATIVA ENTRE EL R. D. 1138/1990 y EL R. D. 140/2003
(CRITERIOS SANITARIOS PARA EL AGUA DE CONSUMO HUMANO)**

Parámetro	R.D. 1138/1990	R.D. 140/2003	Observaciones	Método estándar de tratamiento
Antimonio	10 microg/l	5 microg/l	Más restrictivo	Oxidación + convencional
Arsénico	50 microg/l	10 microg/l	Más restrictivo	Oxidación + convencional
Benceno		1 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Carbón activado + convencional
Benzo-pireno		0,01 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Carbón activado + convencional
Boro	1 mg/l (guía)	1 mg/l		Ósmosis inversa alto rechazo
Bromato		10 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Oxidación en medio básico + convencional
Cadmio	5 microg/l	5 microg/l		
Calcio	100 mg/l (guía)		No aparece en nuevo Decreto	
Cianuro	50 microg/l	50 microg/l		Oxidación en medio básico + convencional
Cobre	0,1 mg/l (guía)	2 mg/l		
Cromo	50 microg/l	50 microg/l		Oxidación en medio ácido + convencional
Dicloroetano		3 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Carbón activado + convencional
Fluoruros	1,5 mg/l	1,5 mg/l		Ósmosis inversa o alúmina activada
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	0,2 microg/l	0,1 microg/l	Más restrictivo	Carbón activado + convencional
Mercurio	1 microg/l	1 microg/l		
Microcistina		1 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Oxidación + convencional (cianobacteria eutrófica)
Níquel	50 microg/l	20 microg/l	Más restrictivo	
Nitrato	50 mg/l	50 mg/l		Ósmosis inversa / resinas
Nitrito	0,1 mg/l	0,1 mg/l salida ETAP(deposito; 0,5 mg/l en red de distribución	$[NO_2^-]_5 < 1$	

Parámetro	R.D. 1138/1990	R.D. 140/2003	Observaciones	Método estándar de tratamiento
Plaguicidas	0,1 microg/l	0,1 microg/l*		Carbón activado + convencional
Plomo	50 microg/l	25 microg/l (de 01/01/04 a 31/12/13); 10 microg/l (desde 01/01/14)	Más restrictivo	
Selenio	10 microg/l	10 microg/l		
Trihalometanos		150 microg/l (de 01/01/04 a 31/12/08); 100 microg/l (desde 01/01/09)	No aparece en Decreto antiguo	Carbón activado + convencional
Tricloroeteno + tetracloroeteno		10 microg/l	No aparece en Decreto antiguo	Carbón activado + convencional
Coliformes	0 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml		Desinfección (U. V. si es necesario)
Colonias a 22 °C	100 UFC/100 ml	100 UFC/100 ml		Desinfección (U. V. si es necesario)
Aluminio	200 microg/l	200 microg/l		Ósmosis inversa (con precaución precipitación)
Amonio	0,5 mg/l	0,5 mg/l		
TOC	Sin cambios	Sin cambios		
Cloro combinado residual		2 mg/l	Lo fija la Administración sanitaria competente	
Cloro libre residual		1 mg/l	Lo fija la Administración sanitaria competente	
Cloruro	25 mg/l (guía)	250 mg/l		Ósmosis Inversa
Color	20 mg/l Pt/Co	15 mg/l Pt/Co		Carbón activado + convencional
Conductividad	400 microS/cm (guía)	2500 microS/cm	Antes no había máximo	Ósmosis Inversa
Hierro	200 microg/l	200 microg/l		Oxidación + convencional
Manganeso	50 microg/l	50 microg/l		Oxidación + convencional
Olor	3-25°C	3-25°C		Carbón activado + convencional
Oxidabilidad	5 mg O ₂ /l	5 mg O ₂ /l		Oxidación con permanganato + convencional
pH	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5		Ajuste pH cal-ácido

1.7. Introducción a los procesos de Desalación

El proceso de separar las sales del agua se llama desalinización y a las aguas continentales con sales disueltas en general se les llama salobres. El nombre de desalación se aplica al proceso de separar las sales del agua, tanto del mar como de las aguas salobres.

La cantidad y tipo de sales en el agua salobre varía enormemente, siendo las combinaciones casi infinitas. Sin embargo la cantidad y tipos de sales en el agua de mar, aun cuando varían de unos mares a otros e incluso en el mismo mar difieren de unos lugares a otros, son más predecibles, encontrándose en manuales del ramo las composiciones del agua del mar de muchos sitios del planeta. A continuación, mostramos algunos análisis de aguas salobres y de aguas marinas, para que nos sirvan de comparación.

Algunos ejemplos de análisis de agua de diferentes fuentes:

<u>Cationes</u>	<u>Pozo</u>	<u>Pozo</u>	<u>Mediterráneo</u>	<u>Mar Rojo</u>
Na+	759	1250	11086	13505
K+	51	43	398	485
Ca++	263	7,21	433	527
Mg++	275	19,5	1330	11620
Sr++				
Ba++				
B+++			4	4,9
Aniones				
CO3=	0	113	0	0
CO3H-	305	1061	146	178
Cl-	2184	504	19960	24315
F-	0	0,1	1	1,2
NO3-	8	2,2	0	0
SiO2	28	38	1	1,2
SO4=	168	526	2787	3395
TDS (mg/l)	4013	4063	36.120	42.021
PH	6,9	8,6	7,9	8,1
C (microS/cm)	7.260	4.690	54.000	65.000

Más tarde veremos la importancia de estos análisis.

Aunque los procesos de separación de sales es la misma para el agua salobre que para el agua de mar, por su importancia, nos limitaremos solo al agua de mar, que, es una fuente inagotable de agua.

Resumimos los principales procesos de desalación, en orden creciente al número de plantas instaladas, tomando como medida la cantidad de m³ producidos por cada uno de los procesos:

- Intercambio iónico
- Electrodiálisis.
- Destilación
- Membranas (Osmosis inversa y electrodiálisis)

Intercambio iónico: Se realiza por medio de columnas de resinas “cambiadoras de iones”. La más simple es un sistema formado por una columna conteniendo resina tipo catiónica, que intercambia los cationes del agua por iones asociados al grupo funcional que constituye la base de la resina y una columna conteniendo resina tipo aniónica que intercambia los aniones del agua por iones asociados al segundo grupo funcional. Cuando se saturan hay que regenerarlas para volverlas a su estado inicial reponiendo el correspondiente ión asociado, mediante ácido y sosa. El inconveniente de este sistema es que los productos procedentes de la regeneración de las columnas, si no se neutralizan antes de enviarlos al vertido son muy contaminantes. La **electrodiálisis** es un proceso parecido, lo que ocurre es que las resinas van en unas placas cargadas eléctricamente una de las cuales retiene los aniones y otra los cationes.

No se emplean para desalar agua de mar.

Destilación: Desde muy antiguo se ha tratado de usar el agua de mar en aquellos lugares donde no tienen otra opción. Uno de los métodos más utilizados es la evaporación, dado que calentando agua de mar y recogiendo y enfriando el vapor se consigue agua con un contenido mínimo de sales disueltas.

Aprovechando esta técnica, se han construido grandes plantas de evaporación de agua de mar, que están funcionando actualmente. Sin embargo, la instalación y uso de las plantas de evaporación para desalación en sus diversas formas:

- Evaporación Súbita Múltiple
- Evaporación Multiefecto
- Compresión de Vapor

Cada una con diversas variantes, ha quedado restringida a los países con grandes recursos energéticos, como son los productores de petróleo, dado el alto consumo de energía necesario para este proceso o en instalaciones con vapor sobrante. A continuación mostramos la comparación de los consumos energéticos en cada tipo de tecnología.

TIPO DE PROCESO	CONSUMO ELÉCTRICO ESPECÍFICO
<i>Planta de CMV (Compresión mecánica)</i>	9,2 kWh/m³ (desde años 60)
<i>Planta de MSF (Flushing múltiple por etapas)</i>	6,5 kWh/m³ (desde años 70)
<i>Planta de ósmosis inversa 1 etapa.</i>	3,77 kWh/m³ (desde años 80)
<i>Planta de ósmosis inversa 2 etapas</i>	3,42 kWh/m³ (2.000)

Membranas: La tecnología de la membranas ha experimentado grandes progresos en los últimos años, lo que ha hecho la desalación del agua del mar se realice casi exclusivamente por este procedimiento.

2. OSMOSIS INVERSA.

2.1. CONCEPTO

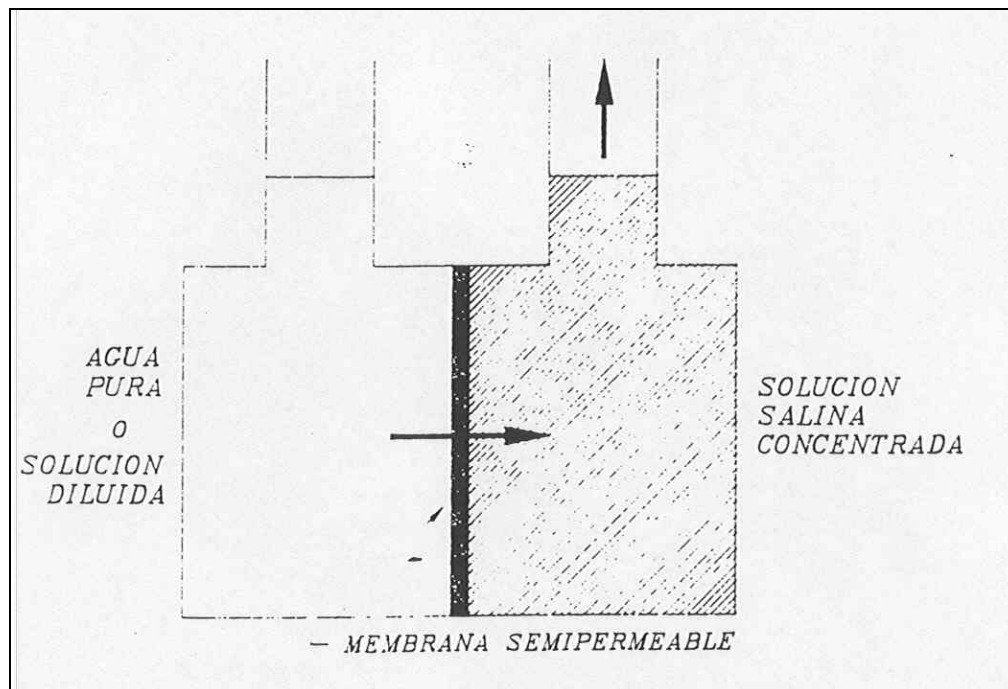
La osmosis inversa tiene su origen en la comprobación de la reversibilidad del fenómeno natural de ósmosis. La osmosis directa natural se conoce desde hace más de 200 años como un proceso natural el cual implica el flujo de un fluido a través de una membrana semipermeable. Las membranas son selectivas: habitualmente, el disolvente puede pasar a través de ellas pero los sólidos disueltos no. La dirección del flujo del disolvente se determina por su potencial químico, el cual depende de la presión, temperatura y concentración en sólidos disueltos.

Tomemos un recipiente y dividámoslo por medio de una membrana semipermeable (ejemplo la piel de un animal) de forma que entre las dos partes del recipiente no exista comunicación. Pongamos en una parte agua destilada, que podemos comprar en una gasolinera. En la otra parte del recipiente pongamos agua en la que hemos disuelto alguna sal (sal común, azúcar, bicarbonato sódico, etc). Aseguremos que ambas partes del recipiente tienen el mismo nivel. Al cabo de un tiempo observaremos que el nivel en el recipiente del agua destilada ha bajado en la misma cantidad que ha subido el nivel del recipiente con sal. Este desequilibrio de niveles se detiene cuando la presión que ejerce la columna de líquido del lado de la sal impide que pase más agua destilada al otro lado.

La medida de la presión causada por la diferencia de niveles se llama presión osmótica y se representa por Π .

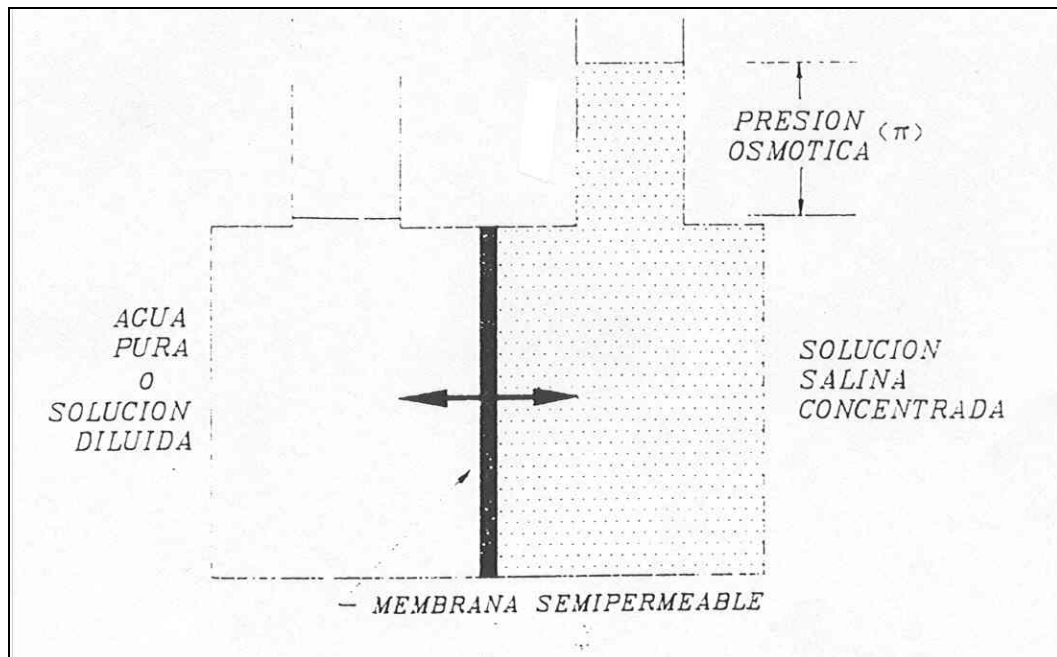
Si se analiza el agua de ambos recipientes se observará que al agua destilada no ha cambiado de composición, mientras que el agua con sal se ha diluido por efecto de la mezcla con el agua que ha pasado a través de la membrana. Esto nos lleva a la conclusión que a través de la membrana solo ha pasado agua y que la sal se ha quedado en su lado del recipiente

Para comprender el mecanismo mejor, se pueden ver los dibujos siguientes 3-1, 3-2 y 3-3



Dibujo 3-1 Osmosis directa

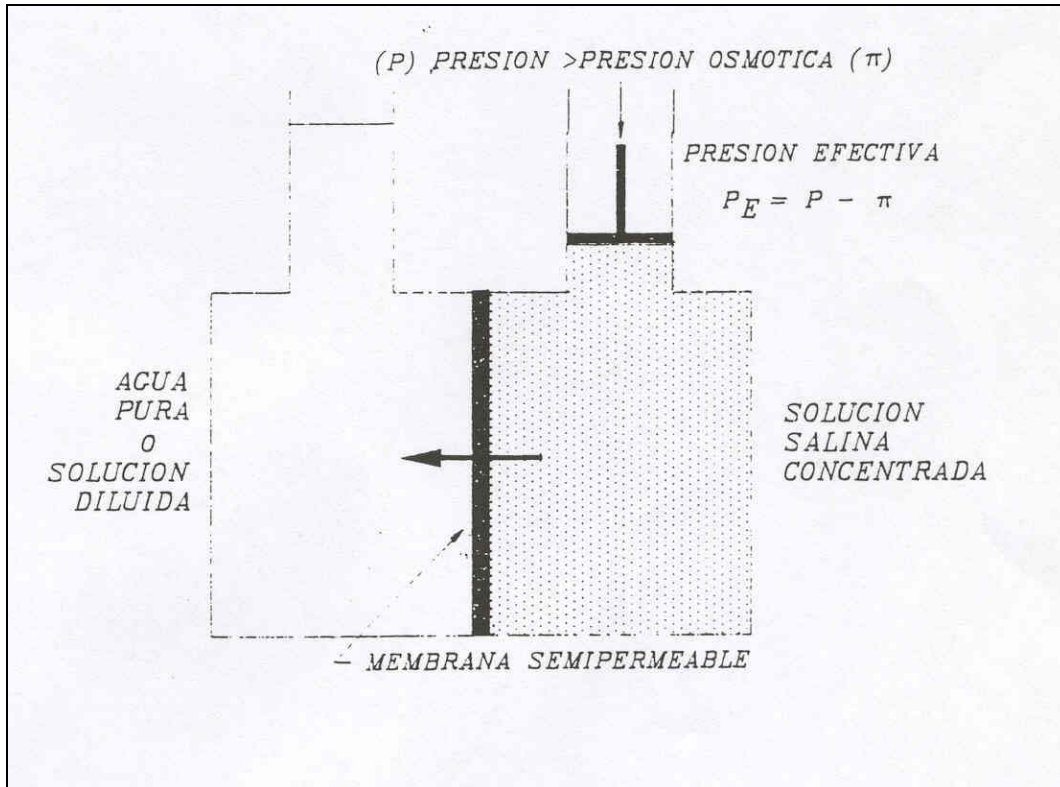
En el dibujo 3 – 1 están separados con una membrana semipermeable, dos soluciones acuosas, agua pura o una disolución muy diluida y otra concentrada. Podemos ver que un flujo de agua se establece desde la solución diluida a la solución concentrada.



Dibujo 3-2 Equilibrio osmótico

Tal y como se indica en el dibujo 3 – 2, el flujo de agua continua hasta que la altura alcanzada en la solución concentrada equilibra su presión osmótica. En este momento, se alcanza un equilibrio osmótico y el flujo de agua neto a través de la membrana es nulo.

Si, siguiendo, la solución concentrada está bajo una presión hidrostática por encima de su presión osmótica natural, el agua se mueve en la dirección contraria, tal y como se indica en el dibujo 3 – 3. La concentración de la solución más rica en sales se incrementa, mientras en el otro lado de la membrana, se obtiene agua ligeramente salobre. Este fenómeno es conocido como ósmosis inversa.



Dibujo 3-3 Osmosis inversa

La ósmosis inversa aprovecha este fenómeno para desalar agua. Para ello, siguiendo con el ejemplo, si de alguna forma aplicamos una presión en el lado del nivel alto, conseguiremos invertir el proceso, pasando agua del lado concentrado al lado diluido, con lo que tenemos un esbozo de “planta” desaladora.

Avancemos un poco más en el proceso. Sigamos ejerciendo presión hasta que observemos que hay paso de sales del lado concentrado al lado diluido, deteniendo en este momento el proceso. Recogemos el agua “desalada”, que llamaremos permeado y tiremos el resto del agua concentrada, que llamaremos concentrado o salmuera.

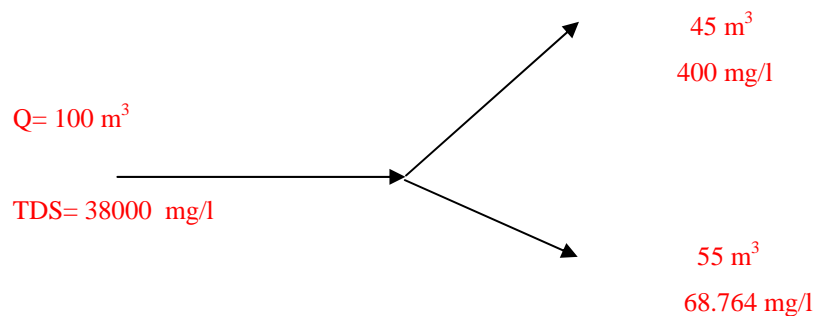
Si realizamos varias veces el proceso habremos conseguido una cantidad de permeado proporcional al número de veces que hayamos realizado la operación. Con esto tendremos una planta de OI muy primitiva.

Por último, tratemos de establecer un sistema que permita la alimentación en continuo de agua salada en el recipiente 1, recoger de forma continua el permeado del recipiente 2, retirar de igual forma el concentrado o salmuera y tendremos el embrión de una planta desaladora. De esta forma habremos separado el agua salada en dos corrientes:

- Permeado con bajo contenido en sales, que aprovechamos
- Salmuera con alto contenido en sales, que enviamos al vertido.

Aplicando este proceso al agua de mar en una planta desaladora industrial, podremos establecer un balance de masas simple:

Supongamos un caudal de agua de mar de 100 m^3 con un contenido total de sales de 38.000 mg/l .



En la OI se necesita una apreciable cantidad de energía, traducida en bombeo para vencer la presión osmótica y la pérdida de carga a través de la membrana.

2.2. VARIABLES DEL PROCESO

Del estudio de las tablas de composición química del agua vemos que el agua de mar tiene un elevado contenido de sales fundamentalmente Cl^- y Na^+ , lo que induce a pensar que será necesaria una presión elevada para conseguir la separación de las sales.

La presión osmótica del agua de mar suele estar entre 24 y 28 bar. Sin embargo, la presión necesaria para conseguir permear agua de mar suele estar en la industria entre 60 y 70 bares, que es la presión que vence la suma de la presión osmótica y las pérdidas de carga a través de las membranas, tuberías y válvulas incrementada lo suficientemente para conseguir la producción necesaria de las membranas.

Conceptos fundamentales de la ósmosis inversa:

Caudal de alimentación a la OI: Caudal necesario para obtener la cantidad de permeado especificada (Q_a).

Concentración de alimentación a la OI: Calidad del agua bruta de alimentación (C_a).

Presión de alimentación a la OI (P): Presión necesaria para impulsar el caudal de alimentación a través de las membranas de OI (P_a , entre 60 y 70 bar)

Caudal del permeado (Q_p): Caudal de agua osmotizada que sale de la ósmosis para su posterior utilización. Es uno de los datos fundamentales para el diseño (entre el 43 y 58,5% del Q_a)

Concentración de permeado: Calidad del agua permeada o producida en la OI (C_p).

Presión del permeado: Presión a la que sale el permeado a la salida de la OI. No es relevante. (0,5 bar típico. Depende del circuito o recipiente receptor)

Caudal del rechazo: Caudal de salmuera que no atraviesa la membrana (entre el 55% y el 41,5% del Q_r).

Concentración de rechazo: Calidad del agua de rechazo en la OI (C_r).

Presión del rechazo: Presión a la que sale la salmuera de la OI (entre 1 y 3 bar menos que la P_a).

Tasa de recuperación o conversión: Relación en % entre el caudal de permeado y el de alimentación (entre 43% y 58,5%)

Factor de concentración: Número de veces que la salmuera se concentra respecto al agua de alimentación.

Las membranas usadas en osmosis inversa retienen del 90% al 99,5% de las sales minerales disueltas, desde el 95% al 99% de la material orgánica y el 100% de los pequeños materiales coloidales (bacterias, virus, sílice coloidal, ...). Se dice que la eficiencia de las membranas, como opuesto a la de las sales, varía desde el 90% al 99,5%, o que su paso de sales está dentro del 10% al 0,5%.

Para indicar la fórmula, la cual da el flujo de agua y sales el cual pasa a través de una membrana, previamente definiremos las siguientes fórmulas:

– Permeabilidad : P ($l/m^2 \cdot día$).

– Flujo permeado medio : $Flux$ ($l/m^2 \cdot h$).

– Conversión : $y = \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de entrada}} \cdot 100 = \frac{Q_P}{Q_A} \cdot 100$

– Porcentaje de rechazo : $R = \frac{\text{Flujo de rechazo}}{\text{Flujodeentrada}} \cdot 100 = \frac{Q_R}{Q_A} \cdot 100 = 100 - y$

– Paso de sales : $PS = \frac{\text{concentr. de sales en permeado}}{\text{concentrac. sales en entrada}} \cdot 100 = \frac{C_P}{C_A} \cdot 100$

– Rechazo de sales : $RS = 100 - PS$

– Factor de concentración : $FC = \frac{C_R}{C_A} \approx \frac{100}{100 - y}$

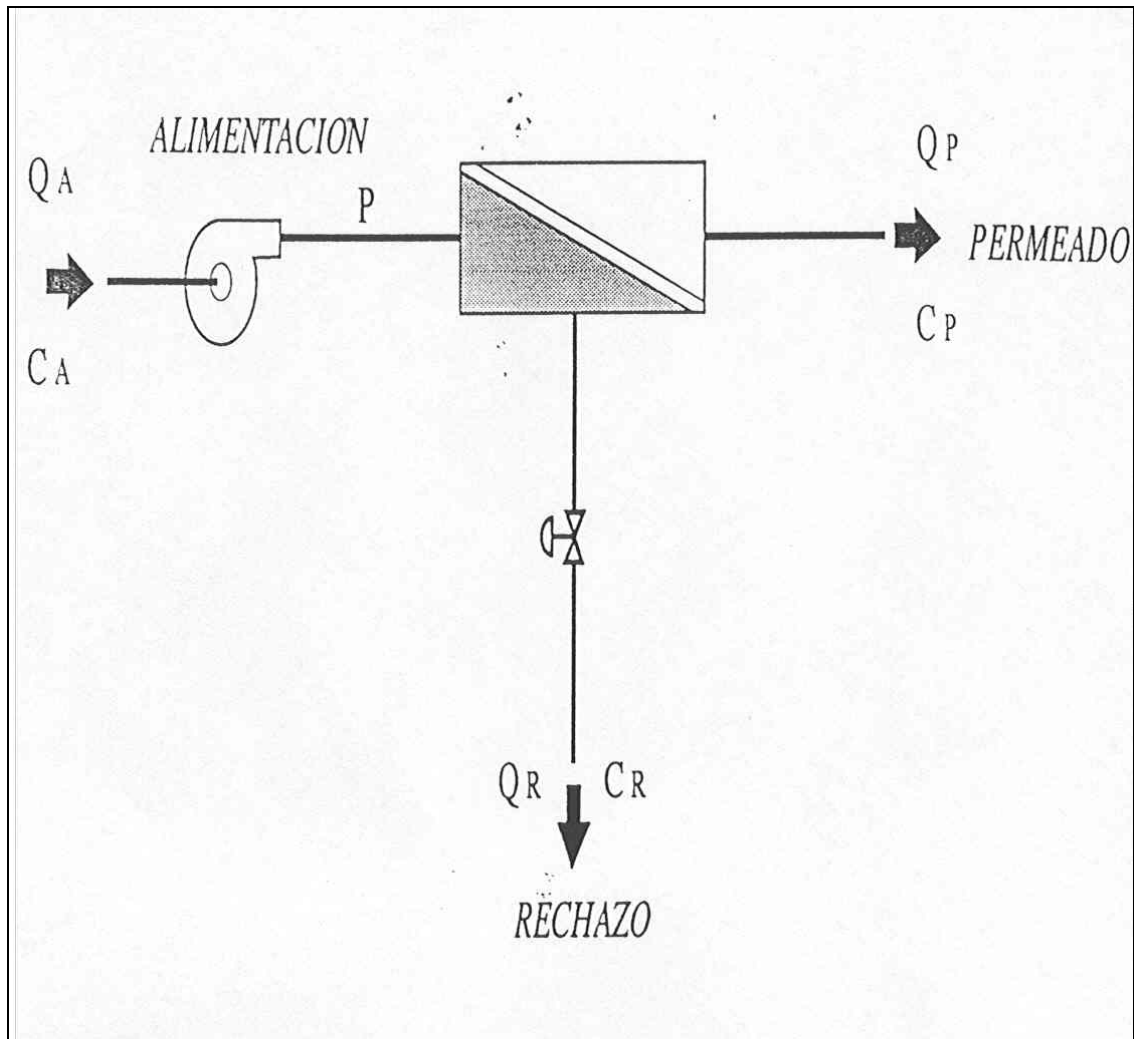


Gráfico 3-4 Diagrama de un modulo de ósmosis inversa.

El gráfico 3-4 representa un modulo de ósmosis inversa en el cual:

$$a) \quad Q_p = K_a \cdot \frac{S}{e} \cdot (\Delta p - \Delta \Pi) \cdot K_t \cdot K_c$$

Siendo :

Q_p	=	Flujo de agua a través de la membrana
K_a	=	Coefficiente de permeabilidad de la membrana
S	=	Superficie de la membrana
e	=	Espesor de la membrana
Δp	=	Presión diferencial hidráulica a través de la membrana
$\Delta \Pi$	=	Diferencial de presión osmótica a través de la membrana
K_t	=	Coefficiente de temperatura
K_c	=	Coefficiente de pérdida del flujo de membrana

$$b) \quad Q_s = K_s \cdot \frac{S}{e} \cdot \Delta c \cdot K_t \cdot K_c$$

Siendo :

Q_s	=	Flujo de sales a través de la membrana
K_s	=	Coefficiente de permeabilidad de la membrana para sales
S	=	Superficie de la membrana
e	=	Espesor de la membrana
Δc	=	Diferencia de concentración a través de la membrana
K_t	=	Coefficiente de temperatura
K_c	=	Coefficiente de pérdida de flujo a través de la membrana

- c) Dividiendo la expresión b) por la expresión a) C_p , se obtiene la concentración de sales en el agua permeada.

$$C_p = \frac{Q_S}{Q_P} = \frac{K \cdot \Delta c}{K_a \cdot (\Delta p - \Delta \Pi)}$$

Es necesario indicar, que en el mismo módulo, la concentración de sales a lo largo de las membranas varía desde la concentración de entrada C_A a la máxima concentración (concentración de rechazo, coeficiente de polarización X). Hay una capa límite próxima a la membrana donde se produce una acumulación y una difusión de sales simultáneamente.

- d) La energía necesaria para separar el agua, en la práctica, es ligeramente superior a la indicada en la tabla 3-3, así como la presión de operación necesaria es superior a la presión osmótica, debido a las siguientes circunstancias:
1. A mayor presión de operación, se produce un caudal mayor por unidad superficial de membrana.
 2. Es necesario vencer las pérdidas de carga del agua al pasar a lo largo de la membrana.
 3. Es necesario sobrepasar el incremento de presión osmótica debido al fenómeno de polarización.

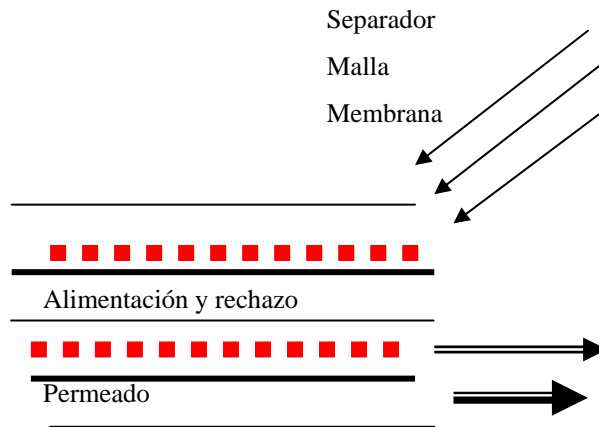
2.2.1. ESTRUCTURA DE LA MEMBRANA Y TIPOS DE MEMBRANAS

Forma y tipos de membranas:

Tipo plano: Fue la primera que se utilizó. Están constituidas por una lámina colocada dentro de un bastidor para darle consistencia y hacer de enlace con la siguiente, ya que se colocan una encima o al lado de las otras. Esta configuración representa una superficie pequeña y por tanto poca capacidad productiva. Su uso en plantas desaladoras es casi testimonial.

Fibra hueca: Hasta hace poco tiempo eran las membranas que más se utilizaban en las plantas desaladoras. Están constituidas por un haz de miles de tubos capilares, del tamaño de un cabello humano, interiormente huecos, empaquetados dentro de un tubo cilíndrico, que constituye la carcasa protectora y es además el camino por el que circula el agua a desalar. Desafortunadamente dejaron de fabricarse, por lo que no nos detendremos en más explicaciones acerca de ellas.

Arrollamiento en espiral: Son el tipo de membrana que se usa actualmente. Están formadas por varias láminas (membranas) rectangulares enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones, por donde se recoge el permeado. Entre cada membrana se colocan un separador impermeable, para evitar la comunicación entre dos membranas contiguas y una malla que constituye la vía de paso del agua a tratar y el rechazo.



A todas las membranas de ósmosis inversa se les llama asimétricas, dado que hay una capa superficial extremadamente densa y fina la cual se conoce como “capa activa” en la parte exterior en contacto con el agua que va a ser desalada.

Esta capa superficial es la barrera la cual previene el paso de las diferentes sales, permitiendo, a la vez, el paso de agua.

En la parte inferior de la capa activa, hay una estructura porosa la cual actúa como soporte mecánico a la “capa activa”, esta estructura puede ser del mismo material o no. En el caso que los materiales sean diferentes, las membranas se denominan “compuestas”.

Los gráficos 3-5 A y B muestran la estructura de algunos tipos de membranas.

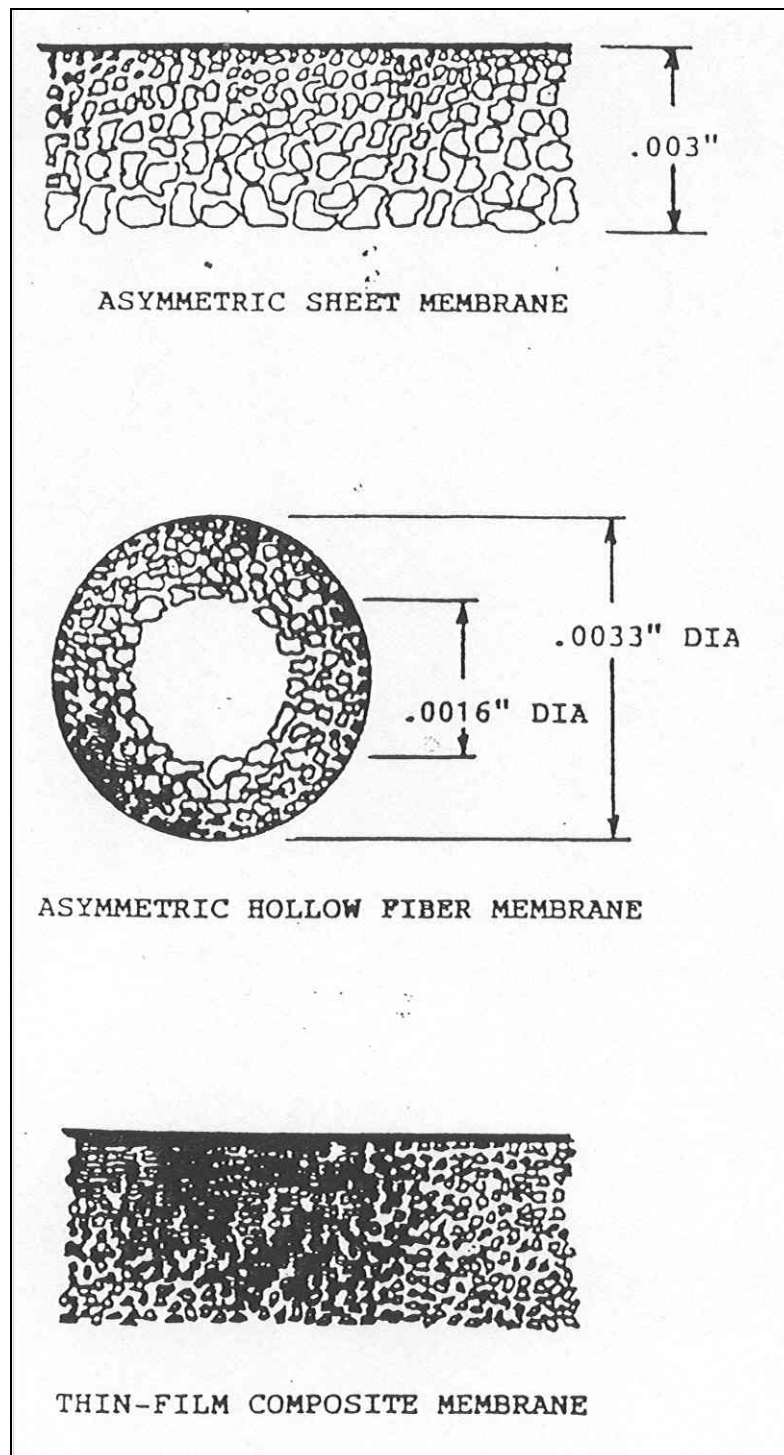


Gráfico 3 - 5 A Estructura de las membranas

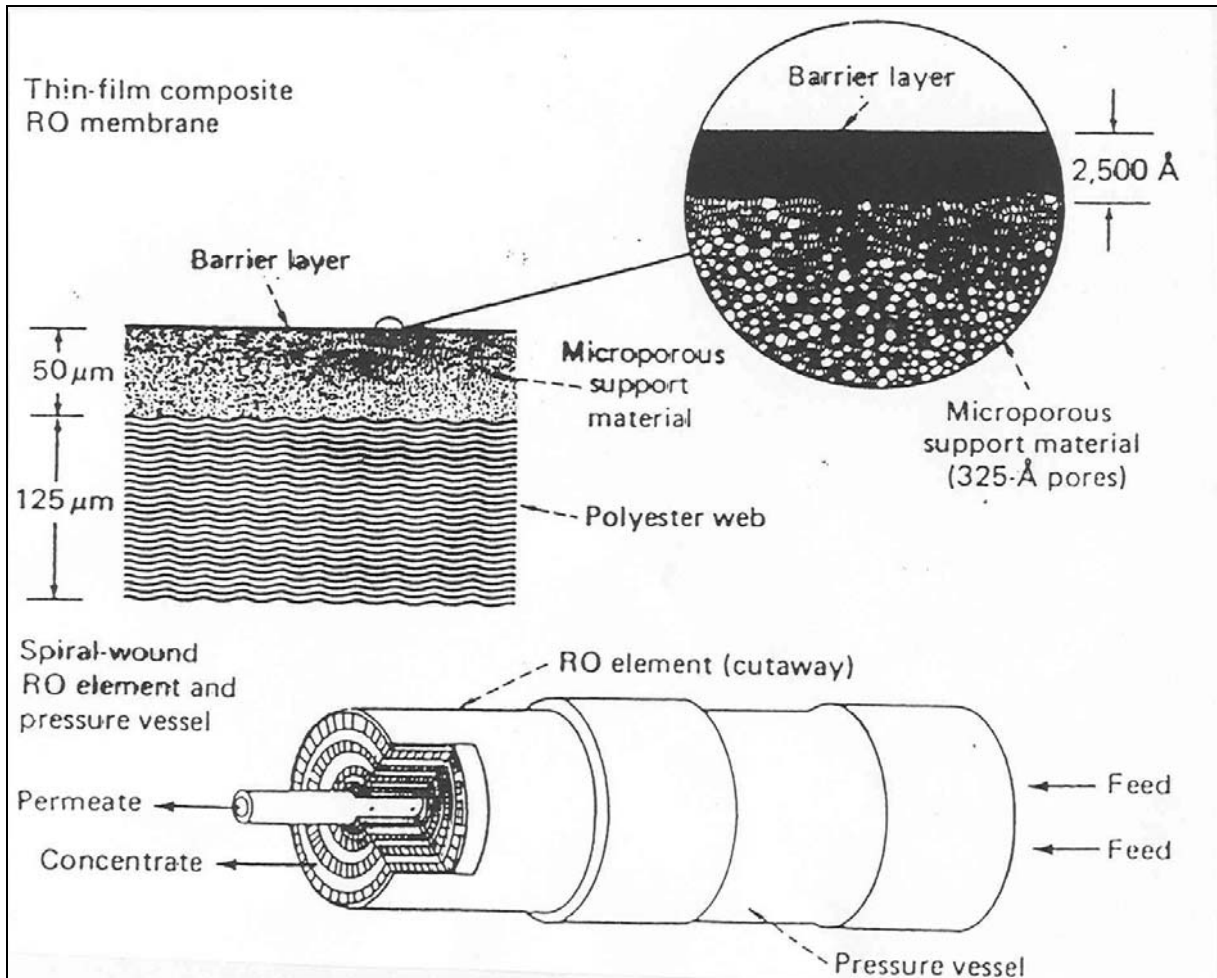


Gráfico 3 – 5 B Estructura de la membrana

2.2.1.1 Configuración de las membranas. Módulos

Con objeto de soportar altas presiones de operación ($15 - 80 \text{ Kg/cm}^2$) y permitir su uso industrial consiguiendo el máximo rendimiento por unidad de superficie en un diseño compacto, las membranas se configuran modularmente. Hay cuatro grandes familias de membranas, como ya hemos explicado anteriormente: *planos, tubulares, espirales y de fibra hueca*. Estos módulos se instalan dentro de tubos o recipientes los cuales facilitan su manejo y transporte.

Actualmente la configuración más extendida de módulos de membranas es del tipo espiral, por lo tanto a partir de ahora nos referiremos única y exclusivamente a las membranas de arrollamiento en espiral.

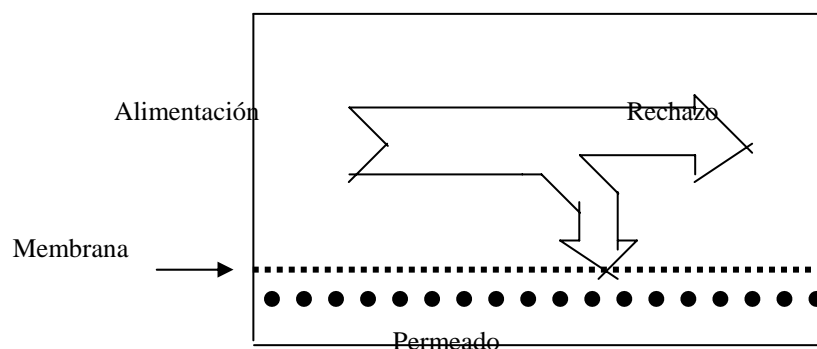
Las membranas de arrollamiento en espiral se obtienen, como se indica en el gráfico 3 – 6, enrollando en torno a un tubo central dos membranas separadas por un soporte poroso el cual drena el permeado hacia el tubo central. Un separador hecho de plástico asegura la separación de las membranas durante el enrollado de la misma.

El caudal de agua a ser tratada es axial, de manera, que el agua a tratar circula en paralelo al eje del modulo, mientras que el flujo de permeado es radial, (circula alrededor del eje de la membrana).

El conjunto de membranas, mallas y separadores se pegan por uno de sus lados al tubo, permitiendo la salida del permeado por las perforaciones de este. Los otros tres lados de sellan, se enrollan alrededor del tubo y se recubren por una envuelta exterior de poliéster reforzado con fibra de vidrio, con lo que se consigue una gran hermeticidad.

El material de las membranas que nos ocupa es poliamida aromática, aunque existen en el mercado membranas de otros materiales. El tamaño del elemento así constituido, que en el argot del sector llamamos “membrana”, se fabrica en varios tamaños, aunque los que se usan en las desaladoras industriales o de abastecimiento suelen ser de 8” (200 mm) de diámetro y 1 metro de longitud.

¿Como actúa una membrana en el proceso de OI?



El dibujo simplificado representa la superficie de la membrana en contacto con el agua que se pretende desalar. Como puede observarse el flujo del agua con respecto a la superficie de la membrana sigue una dirección paralela con respecto a ella, en lugar de perpendicular como podría pensarse. A este tipo de separación se llama “Tangencial”.

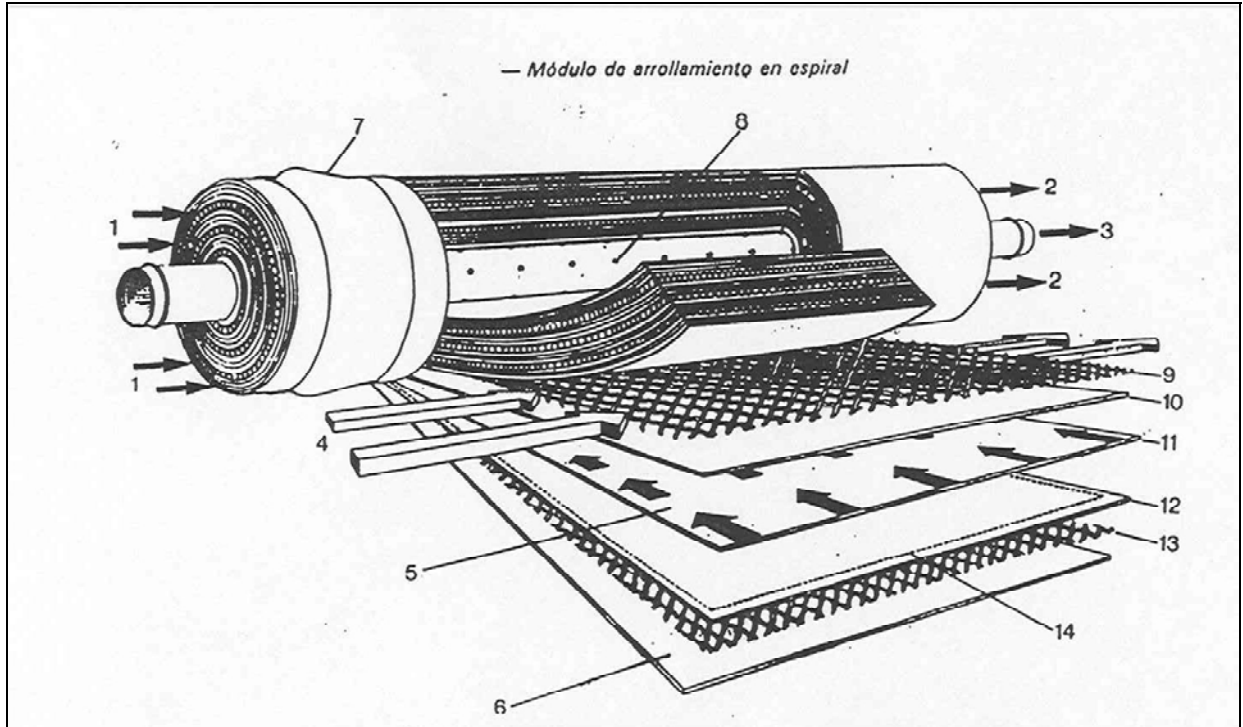
La explicación a este tipo de separación es la siguiente:

El agua bruta de alimentación es impulsada por una bomba a través del elemento, fluye en dirección paralela a la superficie de la membrana a una presión suficiente para que una porción del agua pase a través de ella. Las sales y partículas diluidas en el agua o en suspensión en ella se van acumulando en la superficie de la membrana, con lo que en cierta forma están impidiendo el paso de otras partículas que vienen detrás, pero una parte del agua y una pequeña porción de los iones más pequeños tienen la suficiente energía para atravesar la retícula que constituye la membrana, con lo que pasan a la corriente de permeado. A este lado de la membrana el agua se ha quedado sin presión. Las partículas e iones de mayor tamaño quedarán retenidas en el lado de la membrana donde hay presión, acumulándose sobre su superficie.

Si el diseño ha sido correcto, la velocidad del agua de alimentación será lo suficiente como para arrastrar las partículas que quedaron retenidas en la superficie, realizando un efecto de limpieza de la misma, incorporándolas a la corriente restante que constituye el rechazo o salmuera.

El efecto de autolimpieza no tiene una eficiencia del 100%, por lo que siempre queda alguna incrustación en la retícula de la membrana, restándole poco a poco eficiencia.

Si no hay otra causa externa que deteriore la membrana, esta es la causa de la pérdida de eficiencia de la misma a lo largo del tiempo. Cuando una membrana (o una instalación) llega a un grado de atascamiento que impide su funcionamiento eficiente, mediante una limpieza con productos químicos, se puede casi volver a sus condiciones iniciales. El “casi” es porque siempre queda alguna incrustación permanente que su acumulación hace que a lo largo del tiempo, la membrana pierda eficiencia y el elemento deba ser sustituido.



- 1 - Agua bruta
- 2 - Rechazo
- 3 - Salida del permeado
- 4 - Dirección del caudal de agua bruta
- 5 - Dirección del caudal de permeado
- 6 - Material de protección.
- 7 - Junta de sellado entre el modulo y el recipiente
- 8 - Taladros de paso del permeado
- 9 - Espaciador
- 10 - Membrana
- 11 - Colector del permeado
- 12 - Membrana
- 13 - Espaciador
- 14 - Línea de unión soldada de las dos membranas

Gráfico 3 – 6 Membrana de arrollamiento en espiral

Este tipo de membranas se ensamblan juntas, en series dentro de una caja de presión, tal y como se indica en el gráfico 3 – 7. El número de unidades por tubo suele ser de 6 ó 7 membranas. La longitud de las cajas de presión alcanza unos 6 metros para las cajas de presión de 6 membranas y de 7 metros para las cajas de presión de 7 membranas.

El agua bruta a tratar, cuando pasa a través de una caja de presión instalada, se va concentrando, saliendo el rechazo por el extremo opuesto de la caja de presión.

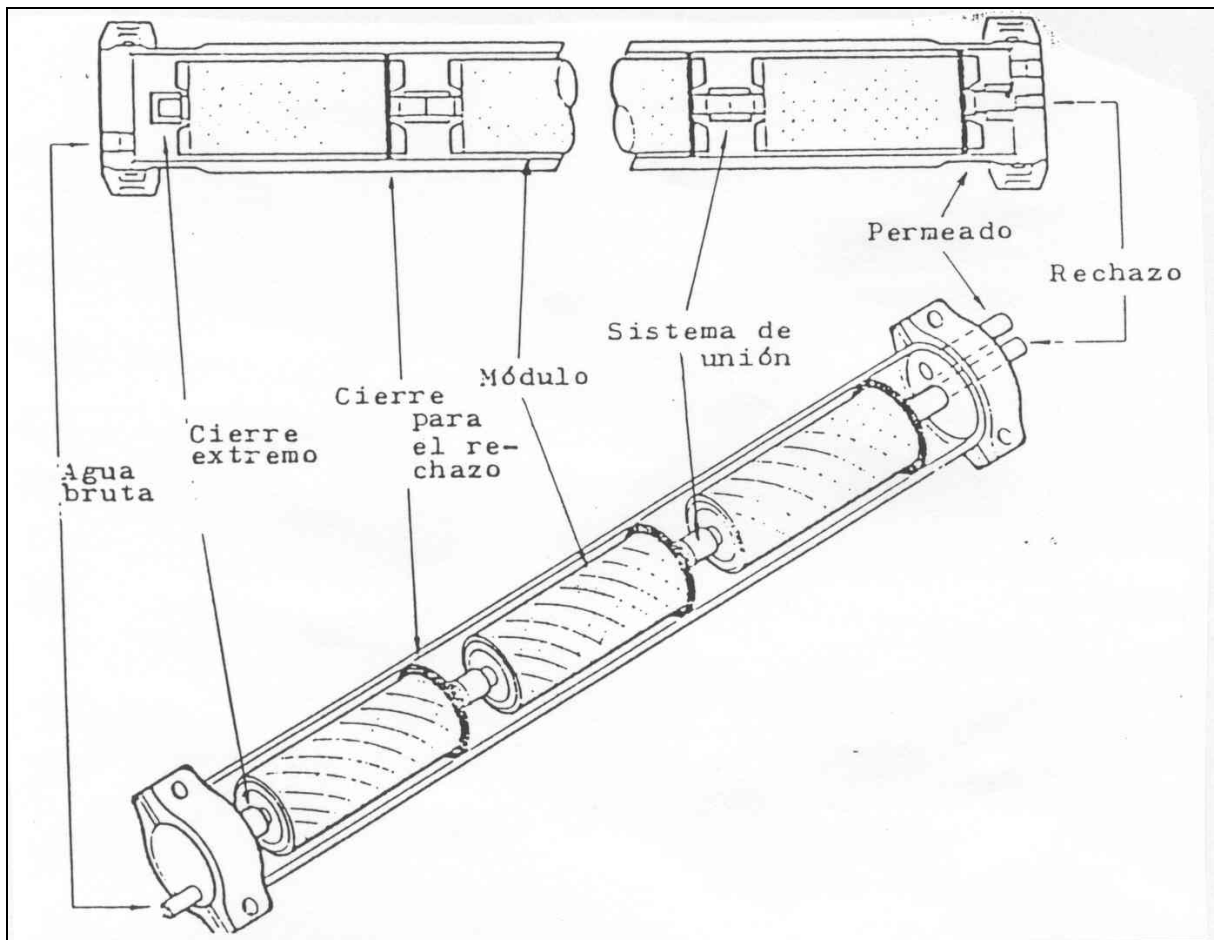


Gráfico 3 – 7 Montaje de las membranas dentro de una caja de presión.

2.2.1.2 Disposición de las líneas de ósmosis

Los módulos de osmosis inversa se pueden montar en paralelo (sistema denominado una etapa) o en series (2 o más etapas) con o sin bombeo intermedio.

Gráfico 3-8 muestra dos esquemas del tipo de disposición.

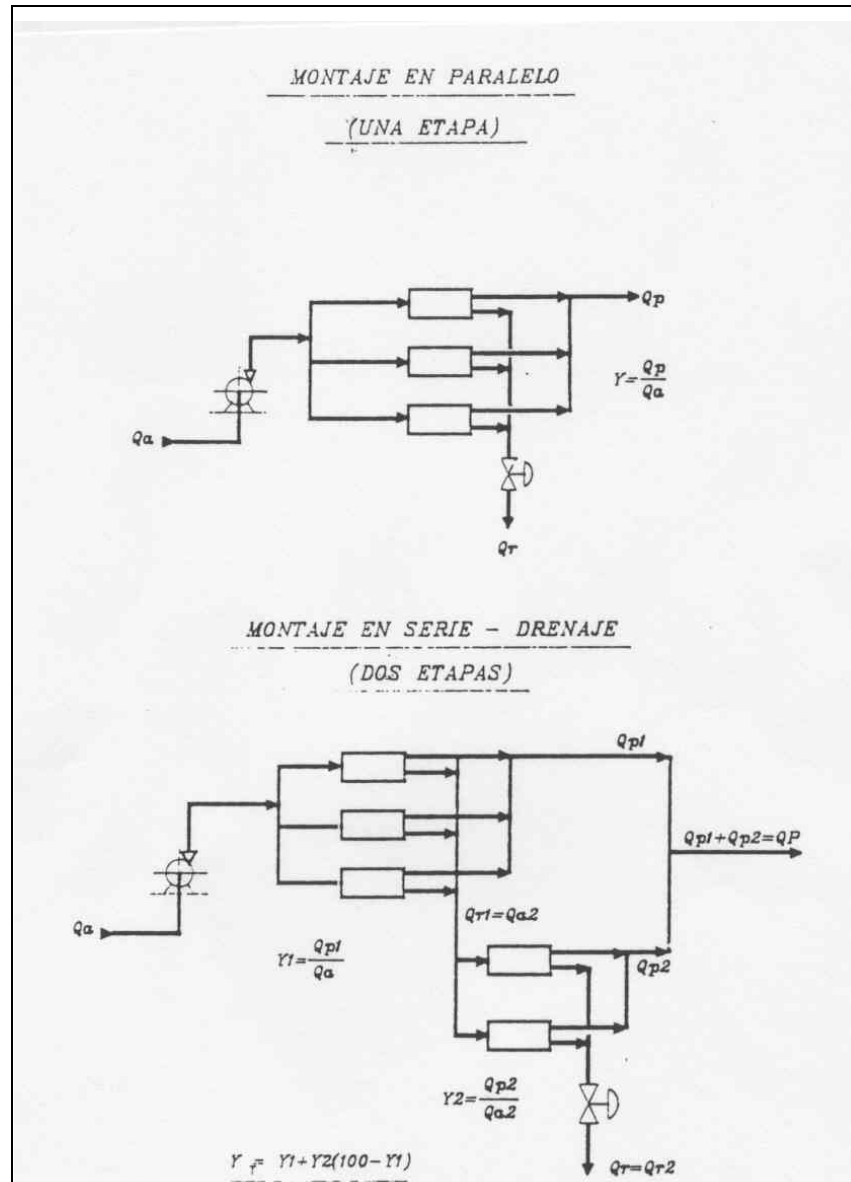


Gráfico 3 – 8 Tipos de disposición



Gráfico 3 – 8 bis Foto bastidores de una desaladora de doble etapa



Gráfico 3 – 8 - 1 Foto bastidores de una desaladora de una etapa



Foto 3 – 8 - 2 Lado de permeado de una desaladora de una etapa.



Foto 3 – 8 - 3 Foto carga de membranas.

2.3 CRITERIOS DE OPERACIÓN

Los principales parámetros de operación desde el punto de vista químico, de una planta de ósmosis inversa, son los siguientes:

- Índice de Fouling (SDI) o turbidez del agua a ser procesada
- Concentración de sales en el agua a ser tratada y su tendencia a precipitar.
- Presión diferencial.

2.3.1. INDICE DE FOULING

El SDI o índice de fouling es un parámetro que mide la capacidad de atascamiento de un agua a la entrada de una planta de ósmosis inversa. Su valor se calcula con la siguiente fórmula experimental $100/15 (1 - T0/T15)$. Siendo T0 y T15 unos valores de tiempo para llenar una probeta de 500 ml.

El SDI debe estar siempre dentro del rango recomendado por el suministrador de las membranas (< 5).

Existen sustancias, como la materia orgánica de alto peso molecular, los coloides, el fango y los óxidos metálicos, los cuales pueden ensuciar las membranas, estas sustancias son las que ocasionan un índice de SDI alto.

2.3.2. CONCENTRACION DE SALES EN EL AGUA DE ALIMENTACIÓN CON TENDENCIA A PRECIPITAR

En la corriente de rechazo, las concentraciones de las sales deben ser mantenidas por debajo de sus límites de solubilidad (carbonato cálcico, fluoruro cálcico, sílice y sulfatos de calcio, bario, estroncio y zinc), para lo cual se ajustará el caudal de rechazo, se ajustará el caudal de alimentación o ajustando el pH.

Los cambios del agua bruta a ser procesada pueden afectar a la operación de la ósmosis inversa, así es necesario llevar un control continuo del pretratamiento.

2.3.3 PRESIÓN DIFERENCIAL

La presión diferencial entre la alimentación y el rechazo de las membranas se debe mantener por debajo del máximo rango de diseño.

Un incremento de la presión diferencial del sistema indica un ensuciamiento físico de las membranas. Habitualmente es debido a los depósitos formados en los canales de flujo de las membranas por sustancias con esa tendencia. Un incremento de la presión diferencial puede o no ser acompañado de una reducción del caudal de permeado producido o una pérdida en el rechazo de sales, es decir, una reducción de la calidad del agua producida.

2.3.4 OTROS PARÁMETROS DE CONTROL

En una planta desaladora por ósmosis inversa, los siguientes parámetros básicos y todos los recomendados por el suministrador de la planta deben ser controlados.

- Análisis químicos rutinarios
- Composición del agua bruta a ser tratada
- Eficiencia del pretratamiento
- Parámetros básicos calculados
- Evolución de los sólidos disueltos
- Caudal normalizado de permeado

a) Análisis químico rutinario

El análisis y las medidas indicadas en la siguiente Tabla deben ser tomados con la frecuencia recomendada.

Parámetro	Agua de alimentación	Permeado	Concentrado	Frecuencia
pH	X			d
Sólidos disueltos y conductividad	X	X		d
Temperatura	X			d
Presión	X		X	d
Caudal		X	X	d
SDI (Índice de fouling)	X			d
Bacterias	X			s
Carbono orgánico total (TOC)	X		X	m (1)
Residuo seco	X	X	X	t
Silice	X		X	t
Sulfatos	X		X	t
Partículas en suspensión	X			t

d : diariamente, s : semanalmente, t : trimestralmente

(1) : Analizar semanalmente hasta que se vea la tendencia

TABLA - ANÁLISIS QUÍMICO EN ÓSMOSIS INVERSA

Corrientes Paso (mg/l como ión)							
Nombre	Alimentación	Alimentación ajustada	Concentrado		Permeado		Total
			Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	418.38	418.38	700.97	992.41	1.97	4.13	2.62
Na	12194.90	12195.16	20437.85	28942.33	49.58	103.04	65.78
Mg	1388.27	1388.27	2329.59	3302.82	1.23	2.53	1.62
Ca	449.41	449.41	754.14	1069.20	0.39	0.81	0.52
Sr	3.00	3.00	5.04	7.14	0.00	0.01	0.00
Ba	0.10	0.10	0.17	0.24	0.00	0.00	0.00
CO3	16.62	16.62	29.84	42.28	0.00	0.00	0.00
HCO3	158.58	158.58	262.24	369.62	0.95	1.84	1.22
NO3	1.00	1.00	1.66	2.33	0.03	0.06	0.04
Cl	21552.73	21552.73	36124.61	51162.23	81.13	168.60	107.63
F	1.00	1.00	1.68	2.37	0.01	0.01	0.01
SO4	3199.66	3199.66	5370.33	7615.32	1.18	2.42	1.56
SiO2	5.00	5.00	8.37	11.84	0.03	0.07	0.04
Boro	5.01	5.01	7.93	10.72	0.70	1.28	0.87
CO2	0.91	0.91	1.77	2.81	1.08	1.98	1.35
STD	39417.27	39417.52	66071.82	93581.33	140.49	290.84	186.03
pH	8.00	8.00	7.99	8.16	6.15	6.15	6.15

La mayoría de sistemas de ósmosis inversa tienden a ensuciarse y perder eficiencia. El rango de ensuciamiento depende de la composición del agua bruta, de la efectividad de su pretratamiento y de los parámetros de diseño del sistema. Esto, habitualmente no es un problema si las membranas se limpian de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Si esas instrucciones no son seguidas, puede ocurrir un deterioro de las membranas irreversible.

Una vigilancia eficiente puede detectar, aislar y corregir cualquier fallo mecánico, químico o ataque biológico en las membranas antes de que ocurra, simplificando los problemas y reduciendo los tiempos de parada.

b) Composición del agua bruta

Los componentes que pueden afectar a la efectividad de la osmosis inversa serán periódicamente analizados en el agua bruta.

Al menos, todos los meses, esos elementos con baja solubilidad o los cuales tienden a formar depósitos sobre las membranas serán analizados.

c) Vigilancia del pretratamiento.

Cada etapa o proceso del pretratamiento será controlada para asegurar una operación adecuada.

La ósmosis inversa debe ser operada coordinadamente con el pretratamiento. La mayoría de los problemas en las plantas de ósmosis inversa son causado por una operación incorrecta de la planta.

Se debe medir el SDI (índice de fouling) a la salida de los filtros de arena y filtros de cartuchos. El pH del agua de alimentación a la ósmosis inversa también debe ser controlado de una manera continua.

El cloro residual cuando se realicen cloraciones y la concentración del antiincrustante dosificado deberá ser controlada.

d) Parámetros básicos calculados

La medida de tres parámetros básicos: % de rechazo, presión diferencial y caudal de permeado normalizado, permite conocer el estatus de la ósmosis inversa en cualquier momento.

1. El % de rechazo indica el porcentaje total de sólidos disueltos rechazados por la ósmosis inversa. El % de rechazo puede ser medido en continuo a través de la conductividad o puede ser calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ rechazo} = \frac{TDS \text{ Agua bruta} - TDS \text{ permeado}}{TDS \text{ Agua bruta}} \cdot 100$$

TDS = Sólidos disueltos totales

Una reducción del % de rechazo puede ser una indicación de fuga de agua a través de las juntas, ensuciamiento, formación de depósitos o incrustación, hidrólisis de las membranas, pH incorrecto, rango de conversión demasiado alto, presión del agua de entrada muy baja o cambio en la composición del agua a ser procesada.

2. La presión diferencial es la diferencia entre la presión del agua de alimentación y la del concentrado. Es una medida de la pérdida de carga hidráulica a través de los elementos de las membranas y de los colectores. Cuando los canales de flujo dentro de las membranas comienzan a ensuciarse, el diferencial de presión se incrementa. El diferencial de presión también depende del caudal de agua de alimentación y del porcentaje de conversión.

Caudal de alimentación = Caudal de permeado + Caudal de rechazo

$$\% \text{ rechazo} = \frac{\text{Caudal permeado}}{\text{Caudal entrada}} \cdot 100$$

Para comparar las diferentes lecturas de presión tomadas a lo largo del tiempo con precisión, éstas deben ser referidas al mismo % de conversión y flujo de alimentación.

3. Uno de los indicadores de problemas más gráficos que hay en una planta de ósmosis inversa, es el caudal de agua permeada o agua purificada. El caudal de permeado puede reducirse por ensuciamiento o puede incrementarse por la degradación de las membranas. Se ha de añadir que sólo la medida del caudal de permeado no es suficiente, porque varía con la temperatura, presión de agua de alimentación, presión de permeado y sólidos disueltos del agua de alimentación. Con objeto de evaluar la influencia de estos parámetros en el caudal de permeado se emplea un parámetro llamado caudal normalizado de permeado. El cálculo del **caudal normalizado de permeado** corrige las lecturas diarias las cuales deberían ser, si el sistema está operando a la presión neta de operación en el arranque inicial y 25 °C. Esto permite al operador comparar la operación diaria de la planta de ósmosis inversa.

Para el cálculo del **caudal normalizado de permeado**, se requieren los siguientes datos:

- La presión neta de operación en el arranque inicial: Ésta es la presión a la descarga de las bombas de alta presión cuando las membranas operan en su primer arranque. Se calcula deduciendo la presión del permeado a la presión del agua de alimentación en el arranque (medido o valor de diseño).
- Factor de corrección de temperatura: Es un factor de conversión para una temperatura del agua dada. Ajusta el caudal producido a la temperatura de servicio al correspondiente a una temperatura de 25°C.
- Caudal de permeado: Es el medido directamente en el caudalímetro de permeado.

El caudal normalizado se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Caudal Normal de permeado} = \frac{\text{Presión neta operación en arranque inicial}}{\text{Presión neta operación diaria}} \cdot$$

Factor relativo de corrección de temperatura • Caudal de permeado

Ejemplo:	Lecturas del primer arranque	:	
	Presión de agua alimentación	:	21 bar
	Presión de permeado	:	1,3 bar
	Lecturas en un día específico	:	
	Presión agua alimentación	:	19 bar
	Presión permeado	:	1 bar
	Temperatura agua alimentación	:	18 °C
	Caudal permeado	;	44 m ³ /h
	Factor de corrección de temperatura	:	1,28
	Caudal normalizado de permeado	:	$\frac{21 - 1.3}{19 - 1} \cdot 1,28 \cdot 44 \text{ m}^3/\text{h} = 61,6 \text{ m}^3/\text{h}$

e) Evolución de los sólidos disueltos.

Se debe mantener un gráfico de los valores de TDS del permeado en cada módulo.

La vigilancia individualizada de estos valores da al operador suficientes datos para aislar la fuente de pérdidas en el rechazo de sales.

f) Caudal normalizado de permeado.

Como regla general (excepto por indicación del suministrador), será necesario lavar las membranas cuando el caudal de permeado disminuya un 10% (caudal normalizado). Con una adecuada limpieza, este valor se recuperará completamente.

Habitualmente, el agua a ser tratada no cambia repentinamente: un control diario da la tendencia y las acciones correctivas deberán ser tomadas antes de alcanzar la reducción de flujo indicada.

Las formulaciones de las soluciones de limpieza serán las indicadas por el suministrador.

g) Sistema de presión diferencial.

La causa de un incremento de presión diferencial desde el 10% al 20% sera diagnosticada y corregida tan pronto como sea posible.

Una de las condiciones garantizadas, habitualmente fijada por los fabricantes de las membranes, es que sean limpiadas antes de que la presión diferencial se incremente en un % determinado (20%). Si ese valor se excede, el fouling o ensuciamiento será parcialmente acumulativo. Ver gráfico 3 – 9.

Se deberán medir las presiones diferenciales de los módulos de ósmosis y aquellos con problemas de presión diferencial, deberán ser aislados, abiertos e inspeccionados visualmente. En algunos casos, será necesario analizar más en profundidad las causas de ensuciamiento y proceder, por el Fabricante, a otro tipo de inspección.

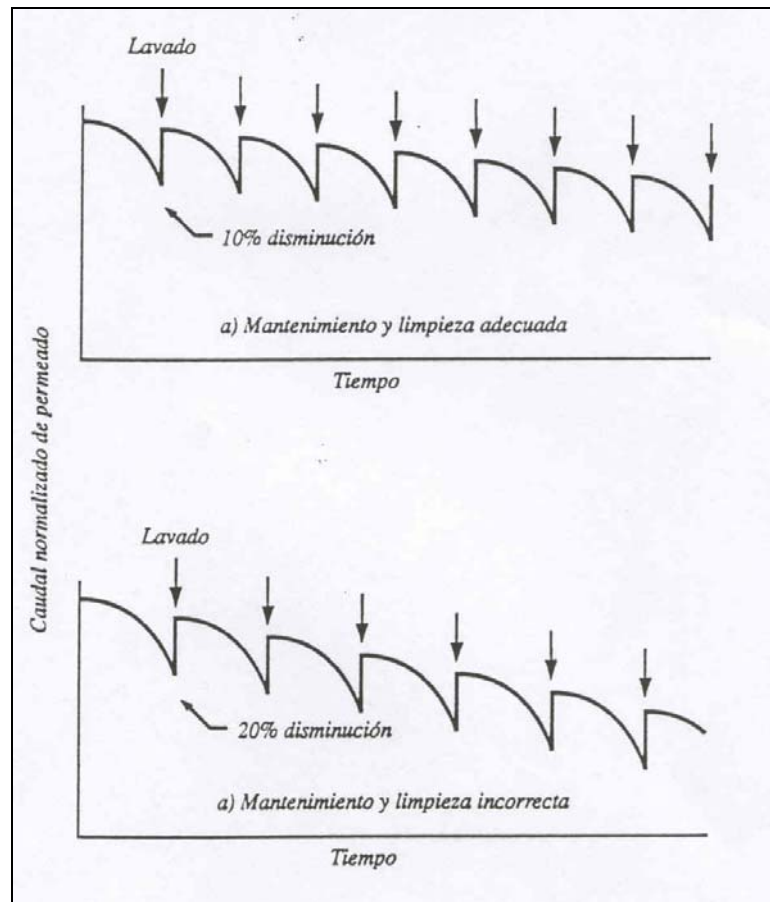


Gráfico 3 – 9 Resultados típicos de Mantenimiento

h) Acondicionamiento de las membranas en las paradas.

Durante los períodos de paradas, las membranas deberán ser mantenidas en una conservación siguiendo las recomendaciones del suministrador, para prevenir ataques biológicos o formación de depósitos. En cada parada se debe realizar un desplazamiento del agua de mar/salmuera mediante agua permeada y si la parada es prolongada se preparará una solución con bisulfito sódico al 1,5%, la cual será introducida en el bastidor. Con esta solución se podrá conservar el bastidor de membranas hasta 1 mes. Al mes se debería cambiar la solución de conservación.

i) Criterio para el reemplazo de las membranas.

Las membranas deberán ser sustituidas al final de su vida útil garantizada, o cuando su ensuciamiento sea irreversible o no sean capaces de producir agua permeada en la cantidad suficiente y/o calidad. Se deberá realizar un seguimiento conjunto con el fabricante de las mismas.

MEMBRANAS DE ARROLLAMIENTO EN ESPIRAL. PRINCIPALES PROBLEMAS Y SU SOLUCIÓN

Q_p	CP	dP	VERIFICACIONES	SOLUCIONES
INCREMENTO	INCREMENTO IMPORTANTE	CONSTANTE		
A. Oxidación de la membrana			A.1 Agua pretratada libre de cloro A.2 Agua pretratada con ozono A.3 Agua pretratada con KM _N O ₄ A.4 Autopsia de la membrana	1. Sustituir el elemento 2. Corrección del pretratamiento
B. Rotura de la membrana			B.1 Contrapresión de permeado B.2 Abrasion	1. Sustituir elementos 2. Control de la carga de membranas 3. Revisión de los filtros de cartuchos.
C. Rotura de juntas			C.1 Modo de instalación C.2 Movimiento del paquete de membranas	1. Sustituir juntas 2. Comprobar la tolerancia de montaje en las cajas de presión.
Q_p	CP	dP	VERIFICACIONES	SOLUCIONES
FALLO IMPORTANTE	INCREMENTO	INCREMENTO		
A. Precipitación de sales			A.1 Verificar el control del índice de Langelier	1. Lavado de membranas 2. Ajustar el pretratamiento
B. Ensuciamiento coloidal			B.2 Verificar el pretratamiento	1. Lavado de membranas 2. Ajuste del pretratamiento

Q_p	CP	dP	VERIFICACIONES	SOLUCIONES
FALLO	CONSTANTE	INCREMENTO IMPORTANTE		
A. Biofouling			A.1 Comprobar la contaminación del agua bruta A.2 Verificar la operación del pretratamiento	1. Desinfección de las membranas 2. Lavado de las membranas 3. Desinfección del pretratamiento
Q_p	CP	dP	VERIFICACIONES	SOLUCIONES
FALLO IMPORTANTE	CONSTANTE	CONSTANTE		
A. Ensuciamiento orgánico			A.1 Comprobar la presencia de aceites A.2 Comprobar dosificación de reactivos (polielectrolito) A.3 Comprobar el pretratamiento	1. Lavado 2. Ajuste del pretratamiento
Q_p	CP	dP	VERIFICACIONES	SOLUCIONES
FALLO IMPORTANTE	FALLO	CONSTANT		
A. Alta temperatura B. Golpe de ariete			A.1 Comprobar las condiciones de operación y lavado A.2 Comprobar la presencia de aire en las tuberías	1. Reemplazo de las membranes 2. Verificar maniobras de arranque y la instalación de las tuberías.

2.4 ELEMENTOS DE ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA Y SU ELIMINACIÓN DE LAS MEMBRANAS DE POLIAMIDA AROMÁTICA

Este apartado suministra información general en cuanto a los elementos que ensucian las membranas y que afectan al rendimiento de las membranas de poliamida aromática y su eliminación.

Nota: *Las membranas de osmosis inversa fabricadas con material composites de poliamida aromática no deben ser expuestas nunca a agua clorada bajo ninguna circunstancia.* Cualquier exposición puede causar un daño irreparable a la membrana. Se debe llevar un absoluto cuidado cuando se realice una desinfección de las tuberías o equipos de preparación de limpieza química o soluciones de almacenamiento para asegurar que no hay trazas de cloro presentes en el agua de alimentación a las membranas de RO. Si hay alguna duda de la presencia de cloro, realizar un muestreo químico para estar seguros. Neutralizar cualquier cloro residual con una disolución de bisulfito sódico y asegurar el tiempo de contacto adecuado para completar una decloración.

Nota: Se recomienda que todas las operaciones de limpieza química de las membranas de RO deben ser coordinadas con el fabricante de las membranas durante el período de garantía de los elementos de RO.

2.4.1 ELEMENTOS QUE ORIGINAN FOULING A LAS MEMBRANAS DE RO

Durante la operación normal de una planta de OI, los elementos de OI sufren el ensuciamiento por materias en suspensión o en disolución que pueden estar presentes en el agua de alimentación. Ejemplos comunes de elementos que originan fouling en las membranas son los siguientes: incrustaciones por carbonato cálcico, incrustación por sulfato cálcico, incrustación por óxidos metálicos, sílice, depósitos orgánicos o biológicos.

La naturaleza y rapidez del ensuciamiento depende de las características del agua bruta de aporte a la planta. El fouling es progresivo, y si no se controla pronto, reducirá el rendimiento de las membranas de ósmosis inversa en un período de tiempo relativamente corto.

El seguimiento y monitorización del rendimiento y funcionamiento de una manera regular es esencial para reconocer el ensuciamiento de las membranas. El rendimiento se afecta de una manera progresiva y en grado variable, dependiendo de la naturaleza de los elementos que originan el ensuciamiento. La Tabla 1 indica un resumen de los efectos esperados que los elementos ensuciadore más comunes tienen en el rendimiento de la planta.

2.4.2 ELIMINACIÓN DEL FOULING

La eliminación del ensuciamiento se controla mediante la limpieza química y el desplazamiento o con un cambio de las condiciones de operación. Como una guía general, la eliminación del fouling se requiere cuando las siguientes condiciones concurren:

1. El caudal de permeado ha caído a un 10 – 15 por ciento por debajo del caudal a la presión normal de operación.
2. La presión del agua de alimentación corregida por la temperatura se ha incrementado un 10 – 15% para mantener el caudal de agua producida.
3. La calidad del agua permeada ha caído un 10 – 15%; el paso de sales se ha incrementado en la misma cantidad.
4. La presión aplicada se ha incrementado en un 10 – 15%.
5. La presión diferencial en una etapa de RO se ha incrementado notablemente (10%).

Los siguientes párrafos indican los elementos que originan ensuciamiento más comunes y su eliminación.

Incrustación por Carbonato Cálcico

El Carbonato Cálcico puede originar depósitos en la mayoría de las aguas de alimentación, si hay un fallo en el sistema de dosificación de antiincrustante o en la inyección de ácido o sistema de control de pH que originen un agua de alimentación con un pH alto. Una pronta detección de la incrustación por carbonato cálcico es absolutamente esencial para prevenir el daño que los cristales de carbonato cálcico puede causar a las capas activas de las membranas. La incrustación por carbonato cálcico que ha sido detectada de una manera temprana puede ser eliminada disminuyendo el pH del agua de alimentación a un valor entre 3 y 5 por una o dos horas. Acumulaciones más largas de carbonato cálcico pueden ser eliminadas recirculando una solución de ácido cítrico al 2 por ciento y a un pH de no menos de 4 a lo largo de las membranas.

Nota: Asegurar que el pH en cualquier solución de limpieza no cae por debajo de 4. De otra manera, se pueden dañar las membranas, particularmente a temperaturas elevadas. El máximo pH nunca debería superar 10. Emplear hidróxido amónico para elevar el pH y ácido sulfúrico o ácido clorhídrico para reducirlo.

Incrustación de sulfato cálcico

La solución 2 (ver tabla pg. 46) es el mejor método conocido para eliminar la incrustación de sulfato cálcico de las membranas de RO.

Incrustación de óxidos metálicos

Los hidróxidos precipitados (por ejemplo hidróxido férrico) pueden habitualmente ser eliminados empleando técnicas descritas para la incrustación de carbonato cálcico arriba descritas.

Sílice

Un recubrimiento por sílice no asociado con otros hidróxidos metálicos o materia orgánica responderá únicamente a métodos de limpieza química muy especializados.

Depósitos orgánicos

Los depósitos orgánicos se eliminan empleando la Solución 3. Para inhibir el crecimiento de depósitos orgánicos, recircular y lavar las membranas con soluciones biocidas aprobadas por los fabricantes de las membranas. Estas requieren exposiciones largas para ser efectivas.

2.4.3 SOLUCIONES DE LIMPIEZA QUÍMICA

Las siguientes soluciones para limpieza química son las recomendadas para la limpieza de las membranas de ósmosis. La solución apropiada puede ser determinada por análisis químico del material que origina el fouling. Un examen detallado de los resultados del análisis dará las pistas necesarias para decidir el mejor método de limpieza. Realizando registros de los métodos empleados anteriormente y los resultados obtenidos se tendrán datos útiles en el desarrollo de métodos y soluciones que funcionen bien bajo las condiciones de agua de alimentación de la planta.

La solución 1 se recomienda para ensuciamiento inorgánico. La solución 2 se recomienda específicamente para las incrustaciones por sulfato cálcico y orgánicos. La Solución 3 se recomienda para ensuciamiento orgánico. Todas las soluciones se usarán a la más alta temperatura disponible es decir hasta 40 °C (30 °C para LFC1) hasta 60 minutos de limpieza. Las cantidades indicadas son para 100 galones U.S. , es decir para 379 litros de agua. Preparar las soluciones proporcionales a esa cantidad de agua. Emplear agua permeada libre de cloro para la preparación de la disolución y realizar una mezcla cuidadosa.

2.4.4 LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS Y DESPLAZAMIENTO

Las membranas de OI dentro de las cajas de presión se limpian haciendo una recirculación de la solución de limpieza por el lado de alta presión de la membrana a baja presión y un flujo relativamente alto. Para ello se necesita un sistema de limpieza química.

Un procedimiento general para la limpieza de los elementos es el siguiente:

1. Barrer los tubos de presión bombeando agua permeada limpia y libre de cloro, desde el tanque de limpieza química (o fuente equivalente), drenándolo después.
2. Mezclar la solución de limpieza a ser empleada, en el tanque de limpieza, con agua permeada.
3. Circular la solución de limpieza por las cajas de presión una hora aproximadamente o el período de tiempo deseado, a un rango de caudal de 35 a 40 gpm (133 a 151 l/min.) por cada caja de presión de 8.0 y para 4 pulgadas, 15 a 20 gpm (57 a 76 l/min.).
4. Después de completar la limpieza, drenar y desplazar el tanque de limpieza química; entonces llenarlo con agua limpia para aclarar.
5. Mojar las cajas de presión con agua permeada libre de cloro durante el tiempo suficiente.
6. Después de que el sistema de RO esté aclarado, operar con las válvulas de permeado a desvío hasta que el agua producto fluya limpia y libre de cualquier espuma o residuos de los agentes de limpieza química (habitualmente de 15 a 30 minutos).

Table 1. Síntomas de ensuciamiento de las membranas de RO

ELEMENTO GENERADOR DE FOULING	SÍNTOMAS GENERALES	RESPUESTA
1. Precipitados de calcio (carbonatos y fosfatos, generalmente encontrados en el lado de rechazo del sistema)	Una reducción importante en el rechazo de sales y un incremento moderado en el diferencial de presión de las cajas de presión. También una ligera reducción en la producción del sistema.	Limpieza química con solución 1.
2. Oxidos hidratados (hierro, níquel, cobre, etc.)	Una rápida reducción del rechazo de sales y un rápido incremento en el diferencial de presión entre la alimentación y concentrado. También una ligera reducción en la producción del sistema.	Limpieza química con solución 1.
3. Coloides varios (hierro, orgánicos y silicatos)	Una ligera reducción en el rechazo de sales y un incremento gradual en el diferencial de presión entre alimentación y rechazo. También, una gradual reducción a lo largo de las semanas en la producción del sistema.	Limpieza química con solución 2.
4. Sulfato cálcico (generalmente encontrado en el lado de rechazo del sistema)	Una reducción significativa en el rechazo de sales y un incremento de ligero a moderado en el diferencial de presión entre alimentación y rechazo. También, una ligera reducción en la producción del sistema.	Limpieza química con solución 2.
5. Depósitos orgánicos	Posible reducción en el rechazo de sales y un aumento gradual en el diferencial de presión entre alimentación y rechazo. También, una reducción gradual en la producción del sistema.	Limpieza química con solución 2. Para un ensuciamiento grande, emplear la solución 3.
6. Fouling bacteriológico	Posible reducción en el rechazo de sales y un incremento acusado del diferencial de presión entre alimentación y rechazo. También, una marcada reducción en la producción del sistema.	Limpieza química con cualquiera de las soluciones, dependiendo de los componentes del ensuciamiento.

Nota: Todos los problemas requieren una determinación de la causa concreta del fouling o ensuciamiento y una corrección de la misma. Se deberá contactar con el fabricante para asistencia técnica.

Tabla 2. Resumen de las soluciones de limpieza recomendadas.

Solución	Ingrediente	Cantidad por 100 galones (379 Litros)	Ajuste de pH
1	Acido Cítrico	17.0 libras (7.7 kg)	Ajuste a pH 4 con hidróxido amónico (NH ₄ OH)
	Permeado RO (Libre de cloro)	100 galones (379 litros)	
2	Tripolifostato sódico	17 libras (7.7 kg)	Ajuste a pH 10.0 con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
	EDTA	7 libras (3.18 kg)	
	Permeado de RO (Libre de cloro)	100 galones (379 litros)	
3	Tripolifosfato sódico	17 libras (7.7 kg)	Ajuste a pH 10.0 con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
	Sulfonato de dodecibenceno sódico	2.13 libras (0.97 kg)	
	Permeado de RO (Libre de cloro)	100 galones (379 litros)	

3. DISEÑO DE PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA

Programa de cálculo R.O.S.A. (DOW CHEMICAL).

Referencias:

DOW, ver página web www.filmtec.com

HYDRANAUTICS, ver página web www.hydranautics.com

TORAY, ver página web www.toray.com

Hay tres datos fundamentales a considerar para diseñar una planta desaladora por OI:

- Análisis del agua
- Cantidad de agua producto
- Calidad del agua producto

El análisis del agua: Es de suma importancia disponer de un análisis completo del agua de alimentación a la OI, ya que de este dependerá:

- Del pre-tratamiento
- La elección del tipo de membrana
- La configuración de la planta
- El postratamiento

Como se dijo anteriormente, la composición del agua del mar es más predecible que las aguas salobres. No obstante, dependiendo del lugar de la toma de agua el tratamiento puede variar.

3.1. Formas de captación

La captación de agua de mar, en un mismo lugar, puede hacerse de las siguientes maneras:

Toma abierta dentro del mar, construyendo una torre de toma anclada en el fondo marino o a través de difusores, a una distancia de la costa variable en función de las condiciones del fondo, oleaje, corrientes, etc, y conduciendo el agua por medio de una tubería anclada al fondo marino, que conduce el agua hasta un depósito próximo a la planta, desde donde por medio de bombas se impulsa el agua hasta la misma.

La distancia de la torre de toma a la costa puede oscilar entre 300 a 1000 m, aunque siempre dependerá de las condiciones antes enunciadas.

Si las condiciones del terreno lo permiten, de podría realizar una cántara de captación en la playa, con o sin pozos perforados en su fondo. El agua llega a la cántara debido a la permeabilidad del terreno, que hace la función de filtro. Desde la cántara, el agua se bombea hacia la planta. El fondo de la planta deberá quedar por debajo del nivel del mar y su disposición habitualmente es paralela a la línea de costa. La profundidad dependerá de la permeabilidad del terreno, el número de bombas que aspiren, etc.

Otra opción es realizar la cántara y comunicarla directamente con el mar. Esto, como siempre dependerá, de la calidad del agua que llega a la cántara.

Pozos playeros: Se perforan varios pozos en terrenos próximos a la costa, tantos como se requiera para asegurar el caudal de alimentación a la planta, si el terreno tiene la suficiente permeabilidad, y se instalan en su interior bombas sumergibles adaptadas al caudal de los pozos. El agua impulsada por los pozos se conduce a un depósito de regulación o directamente a la planta.

La profundidad de los pozos estará determinada, entre otras circunstancias, por la permeabilidad del terreno y la forma del perfil geológico de la intrusión marina.

Cada una de las formas de captación requiere un tratamiento diferente antes de alimentar con esta agua al bastidor de membranas, ya que aunque la composición química no varíe apreciablemente, aunque nunca se puede asegurar hasta tener una serie de análisis, es prácticamente seguro que las sustancias insolubles influirán en gran medida en el pretratamiento.

La capacidad de la planta desaladora es por tanto un factor importante a la hora de realizar la captación, ya que no todas las formas de captación garantizan el caudal necesario. Se han de realizar detenidos estudios previos para fijar el emplazamiento de una planta, de forma que se establezca un equilibrio entre la forma y lugar de la captación y el lugar de utilización, puesto que el coste energético es el que más pesa en el coste final del agua.

Caudal de producción: Hasta hace muy poco tiempo la máxima tasa de conversión con membranas de arrollamiento en espiral era del 45%, aunque con membranas de fibra hueca se conseguían tasas superiores al 50% (a una presión más elevada), lo que influye en el caudal de captación. De cada 100 m³ de alimentación solo se aprovechan 45 m³, sin considerar el agua necesaria para el lavado de filtros, en el caso que se prevea utilizar agua bruta para este fin. En la actualidad se pueden conseguir tasas próximas al 60% mediante la recuperación del rechazo.

Calidad de la producción: La calidad exigida habitualmente en este tipo de plantas es que la salinidad total del agua producida sea inferior a 400 ppm. Con las membranas existentes en el mercado esta cifra no representa una dificultad. Cualquiera de los fabricantes ofrecen configuraciones de membranas que cumplen esta exigencia sin mayores problemas. La verdadera competencia entre ellos está en conseguirlo con el menor número de membranas, dando mayor superficie de “filtración” y, lo que es más importante, fabricar membranas que tengan la misma producción específica, pero que requieran menor consumo de energía.

3.2. **Pretratamientos.-**

Como se dijo anteriormente, es necesario realizar una serie de pretratamientos al agua de alimentación antes de impulsarla hacia el bastidor de membranas, ya que suele haber en suspensión algunas o todas de las partículas insolubles, tales como:

- Algas
- Arena
- Limos
- Arcilla
- Polen
- Coloides
- Materia orgánica
- Restos de vegetales
- Pequeños crustáceos
- Peces
- Sales escasamente solubles que pueden afectar al sistema de OI.

Tratamientos físicos:

La mayor o menor cantidad y calidad de partículas insolubles se mide por la turbidez del agua y mejor aún por el SDI (Silt Density Index).

Los tipos de ensuciamiento de las membranas son:

- Biológico
- Orgánico
- Coloidal
- Sedimentos
- Oxidos metálicos

Describimos sucintamente cada uno de estos tipos:

Biológico: Provocado por microorganismos que se adhieren a la superficie de la membrana y forman un biofilm

Orgánico: Provocado por sustancias húmicas en concentraciones entre 0,5 y 20 mg/l o por compuestos orgánicos de alto peso molecular hidrofóbicos.

Coloidal: provocado por coloides, generalmente de sílice (SiO₂) y por óxidos de hierro, aluminio y manganeso.

Sedimentos: No requiere explicación

Tratamientos físicos:

Cada tipo de ensuciamiento tiene su correspondiente pretratamiento:

Biológico: El tratamiento más común empleado es la cloración mediante la inyección de hipoclorito sódico, en cantidad entre 0,5 y 1 ppm por encima del break point, en caso que se hayan podido realizar ensayos previos.

Orgánico: Lo más habituales dosificar un coagulante y retener en los filtros, aunque a veces es preciso realizar una ultrafiltración previa.

Coloides: En general, con coagulante y ultrafiltración en casos especiales.

Sedimentos: Con filtros de arena o multimedia.

Filtros:

Después de realizar la dosificación de cloro y coagulante, se hace pasar al agua por filtros de arena de sílex de granulometría media de 0,5 mm. Estos filtros son capaces de retener partículas de hasta 0,1 mm. La forma de filtrado es a equicorriente, es decir de arriba hacia abajo del lecho, con lo que las partículas quedan en la parte superior. La velocidad de lavado suele ser pequeña para que la retención sea eficiente, entre 7 y 15 m/s. Cuando los filtros se colmatan, lo que se detecta por la pérdida de carga a su través, deben lavarse para eliminar la suciedad acumulada y devolverlos a su estado de máxima eficacia. Un diseño correcto debe permitir que, cuando un filtro se esté lavando, la velocidad en el resto no sobrepase los 16 m/s.

Microfiltros:

El grado de filtración que se obtiene de los filtros de arena no es suficiente para que el agua llegue a las membranas, por lo que se le somete a un segundo proceso de filtrado a través de una segunda batería de filtros. Estos están constituidos por una carcasa o depósito en cuyo interior se alojan cartuchos filtrantes con una selectividad de 2 a 5 micras.

El tamaño del cartucho está entre 25 y 215 mm de longitud y en cada carcasa puede haber hasta 215 de ellos. Cuando los cartuchos se colmatan deben cambiarse por unos nuevos.

De igual forma que con los filtros de arena, el diseño debe tener en cuenta que cuando en un microfiltro se está realizando la operación de sustitución de cartuchos, el resto deberá soportar el caudal total de la planta sin que esta sufra disminución en sus prestaciones.

Tratamientos Químicos:

Se entiende por tratamientos químicos la inyección de ciertos productos que protegen o favorecen el sistema de OI. Como característica general se dosifican en por medio de bombas “dosificadoras” y las cantidades que se utilizan son ppm del caudal sobre el que se inyectan

Desinfección. - Para evitar la proliferación o crecimiento bacteriano se suele dosificar cloro (ozono u otros oxidantes). El producto más empleado es el hipoclorito sódico, que se almacena en un depósito que tenga una autonomía de 3 a 4 semanas y la inyección se realiza mediante una bomba dosificadora. Lo habitual en plantas grandes es que se instale una segunda dosificadora en reserva de la primera.

La desinfección se puede realizar en continuo en dosis de mantenimiento, o bien en dosis de choque más elevadas, que se realizan cada dos o tres días, siendo los periodos entre dosis más o menos largos en cada caso. A veces es preciso la mezcla de ambos procedimientos, dado que las bacterias pueden acomodarse a dosis continuadas.

El lugar de la inyección suele ser en el mismo sitio de la captación o en un lugar muy próximo, de forma que la mayor parte de la instalación quede protegida por la acción del hipoclorito.

Regulación de pH. - El agua de mar tiene un pH por encima de 7,6. Determinados aditivos, como el hipoclorito y el coagulante, reaccionan mejor en medio neutro o ligeramente ácido. Por esta razón se

suele dosificar ácido sulfúrico, que es un producto relativamente barato. Además, al reaccionar con los carbonatos reduce el riesgo de incrustaciones.

El equipo dosificador de ácido sulfúrico es similar al de hipoclorito, salvando las diferencias en cuanto a tipo de materiales empleados en el depósito, bombas y conducciones, que son de acero, ya que el ácido que se emplea es del 98% y la diferencia de caudal a inyectar.

Coagulante.- Se instalará un equipo de dosificación similar a los mencionados anteriormente. La dosificación de un aditivo coagulante se hace precisa cuando la cantidad de sólidos en suspensión del agua de la captación es elevada, lo que se da cuando se realiza una toma abierta. El coagulante más empleado es cloruro férrico y la acción que ejerce es la de agrupar las partículas sólidas para facilitar su retención en los filtros. Por este motivo, la inyección de coagulante se realiza antes de los filtros de arena.

Reductor.- El producto generalmente empleado es el bisulfito sódico o metabisulfito sódico, que al ser un producto sólido es necesario diluirlo previamente en agua para poder dosificarlo con una bomba.

La acción del bisulfito es doble por su acción bacteriostática, constituyendo una segunda barrera a las bacterias. Por su acción reductora frente a la acción oxidante del cloro. Si una alta concentración de cloro llega a las membranas podría destruirlas en un corto periodo de tiempo. Igual ocurrirá si la concentración de cloro es pequeña pero continuada. De igual forma la acción oxidante del cloro destruirá la membrana. Por eso es muy importante controlar en todo momento que la dosificación de bisulfito sea algo mayor que la estequiométrica para neutralizar al cloro.

El punto de inyección debe ser después de los filtros de cartucho, aunque para mayor seguridad se suele instalar un segundo punto de inyección antes de estos filtros.

Antiincrustantes.- Son productos que se utilizan para evitar el riesgo de incrustaciones en las membranas y en las conducciones del rechazo. Al concentrarse las sales en la corriente de rechazo, algunas de estas pueden sobrepasar su producto de solubilidad, llegando a precipitar. Para evitar las precipitaciones es preciso reducir la tasa de conversión o se añaden estos aditivos.

3.3. Programas de cálculo. Proyecciones.

Llamamos proyecciones a los cálculos que se realizan con los programas que facilitan los diferentes fabricantes de membranas para determinar la configuración de los bastidores de OI, el número de membranas necesarias, el tipo de membrana a utilizar, los parámetros de funcionamiento del bastidor (presiones, caudales, paso de sales, etc.) y la composición esperada del agua de salida.

Para llegar a la configuración o configuraciones aceptables, se realizan varios ensayos, siguiendo el siguiente procedimiento:

Datos a introducir en el programa:

Análisis del agua.

Caudal requerido de perneado.

Tasa de conversión.

Temperatura del agua.

Origen del agua (SDI).

El programa permite elegir:

Tipo de membrana, en este caso SW.
GFD (litros/h.m²).
Fouling factor.
Número de pasos y/o etapas.

Con estos datos el programa calcula:

Presión de entrada al bastidor.
Caudal de permeado en cada membrana del tubo contenedor.
Caudal y composición del permeado.
Caudal y composición del rechazo.
Índices LSI y S& DSI.
Otros parámetros.

Hay que realizar varios ensayos antes de llegar a la configuración definitiva, ya que:

Las membranas funcionan de una manera diferente a temperaturas diferentes
Las condiciones varían a lo largo del tiempo
En todos los casos hay que tener en cuenta el consumo de energía.

Para ello se realizan proyecciones realizando las combinaciones posibles entre:

Temperaturas desde la mínima a la máxima esperadas con los Fouling factor desde el primer al tercero (a veces al quinto) año, para tener todas las gamas de funcionamiento del sistema, es decir verificar que la configuración elegida funciona correctamente tanto en las condiciones más favorables como en las más adversas.

Lo habitual es realizar todos estos pasos con diferentes programas, es decir, con membranas de diferentes fabricantes, y elegir la más adecuada en cada caso. Es preciso puntualizar que las diferencias entre ellos son poco significativas en la mayoría de los casos.

Se han mencionado varios términos, que creemos necesario definir:

GFD: Caudal específico de la membrana. En unidades anglosajonas se expresa en Galones por pie cuadrado y día. En unidades métricas en litros/hora.m². Es un dato del fabricante de la membrana.

Hay un límite mínimo por debajo del cual no se debe funcionar, ya que la velocidad del agua en la capa límite es muy pequeña con lo que no se podría arrastrar la suciedad temporal de la superficie de la membrana.

Si se sobrepasa el límite máximo, además de aumentar la pérdida de carga (aumento del consumo energético) estaríamos forzando la membrana.

En todo caso, la mayoría de los programas avisan de estas circunstancias mediante “Warning”.

Fouling Factor: Es una medida del grado de deterioro de la membrana a lo largo del tiempo. Se estima que una membrana pierde por año un 5% de efectividad. Por tanto el Fouling del primer año es 1 mientras que el del tercero es 0,85.

SDI (Silt Density Index): Es una medida del grado de atascamiento del agua de alimentación sobre la membrana. Mientras más bajo sea, menos se ensuciará la membrana y se podrán espaciar los periodos entre lavados. Valores menores de 3 son los deseables.

Indices de Langelier (LSI) y de Stiff and Davis (S &DSI) : Son indicadores del poder incrustante del agua, dando una información del tipo de pretratamiento químico necesario.

Para agua salobre se utiliza el LSI (TDS < 10.000 mg/l) /Incrustación del CO₃Ca)

Para agua muy salobre y de mar se utiliza el índice de Stiff & Davis (TDS > 10.000 mg/l).

Configuración.- Las membranas se colocan dentro de tubos de presión.

Un tubo de presión tiene un diámetro interior igual al exterior de la membrana.

Su longitud depende del número de membranas obtenido por el diseño.

Este número va desde una membrana hasta siete, siendo este el máximo que suelen contener.

Las presiones de diseño de los tubos son 300 , 400, 600, 900 y 1.200 psi, y mayores para aplicaciones especiales. Para desaladoras de agua de mar el tubo utilizado es el de 1.000 psi.

Los tubos se colocan en bastidores ordenados en filas y columnas. Se entenderá mejor con un ejemplo:

Supongamos una planta desaladora para una producción de 30.000 m³/día.

Habitualmente esta producción se distribuye en módulos de capacidad menor por necesidades constructivas, de mantenimiento, operación, etc.

En este caso, serían aceptables varias modulaciones, de las que se exponen algunas de las posibles.

6 bastidores de 5.000 m³/día

4 “ “ 7.500 “

3 “ “ 10.000 “

Elijamos una de las modulaciones, por ejemplo, la de 7.500 m³/día

Cada bastidor estaría compuesto por 96 tubos de 7 membranas cada uno distribuidos en 8 columnas por 12 filas. Esta distribución permite una distribución equilibrada del flujo en el bastidor, la colocación de las membranas (que ha de hacerse a mano, tubo a tubo y membrana tras membrana) y un layout razonable, teniendo en cuenta el conjunto de los equipos y las tuberías generales de la planta.



Foto 5. Bastidor de una planta de ósmosis inversa doble etapa (Rambla de Morales).

El programa permite decidir si el proceso permite la configuración en dos etapas o en dos o varios pasos.

¿Cuál es la diferencia entre etapa y paso?

Se dice que una configuración es de doble etapa cuando el rechazo de un bastidor se aprovecha para alimentar un segundo bastidor, con o sin bomba "booster".

Una configuración tiene doble paso cuando el permeado de un bastidor se utiliza como alimentación de un segundo.

Se utiliza la doble etapa cuando se trata de conseguir una mayor cantidad de agua producto

Se utiliza el doble paso cuando se trata de conseguir una mayor calidad, en el sentido de menor número de sales, en el agua producida.

La presión de alimentación al segundo bastidor, en caso de doble etapa es mayor que la presión de alimentación del bastidor principal, como consecuencia de la gran concentración de sales del rechazo, lo que aumenta la presión osmótica.

En el segundo paso, al contrario, la presión para “osmotizar” el agua ya permeada en el primero, (su contenido de sales es bajo) es muy pequeña en comparación con la de alimentación. Es más, el rechazo del segundo paso se suele recircular y mezclar con el agua de alimentación, con la ayuda de una bomba, ya que es un agua con poca salinidad.

En las plantas desaladoras hasta ahora, debido a la alta salinidad del agua del mar, solo se utilizaba una configuración de una sola etapa.

El rechazo tiene una elevada presión residual, entre 1 y 2 bares menos que la presión de alimentación, y siendo esta bastante alta, entre 60 y 70 bares, es posible aprovechar la energía del rechazo en un recuperador, que habitualmente es una turbina Pelton instalada coaxialmente con el motor y la bomba. Las turbinas que se fabrican en la actualidad tienen rendimientos del 88,55 lo que permite un ahorro de energía alrededor de un 35%.

Actualmente se fabrican membranas especiales que permiten una segunda etapa de recuperación del rechazo en plantas desaladoras, ya que admiten una presión de trabajo hasta 84 bares y algunas hasta incluso 90 bares.

En este caso, la energía que se recupera es la del rechazo de la segunda etapa.

También se están desarrollando en la actualidad sistemas de recuperación de la energía del rechazo con mayor rendimiento que las turbinas, ya que se alcanzan rendimientos del 92%. Ya hay algunas plantas empleando este sistema, llamado de cámaras isobáricas, aunque es necesario instalar varias en paralelo por cada bastidor.

----oooOooo----

BIBLIOGRAFÍA:

- MANUAL DEL AGUA (Degremont).
- DESALACIÓN DE AGUAS SALOBRES Y DE MAR. OSMOSIS INVERSA (Juan Antonio Medina).
- MANUAL PRÁCTICO DE OSMOSIS INVERSA (UOP Fluid Systems).
- DOW FILMTEC TECHNICAL BULLETINS.
- HYDRANAUTICS TECHNICAL BULLETINS.
- TORAY TECHNICAL BULLETINS.