



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTADO DEL ARTE DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA PARA
PRODUCCIÓN DE VAPOR DE ALTA PRESIÓN**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:
JONATHAN BLANCO HERNÁNDEZ**



MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedico esta tesis a la memoria de mi abuelito José Ángel Hernández Cortes, quien fue un padre para mí, a mi abuelita Maria Margarita Granados Ruiz, a mi Mama Isabel Hernández Granados, a mis hermanos Lennart Hans e Ivan Frantz, a quienes les debo todo lo que soy y a quienes les agradezco toda su paciencia y su apoyo.

Sin ellos nada de esto seria posible.

AGRADECIMIENTOS

A mi mama Isabel que gracias a todo su apoyo y amor incondicionales han sido parte muy importante para el logro de mis metas.

A mis hermanos Hans y Frantz que me han soportado y apoyado a lo largo de toda mi vida.

A todos mis tíos que siempre están al pendiente de mi avance en la carrera y siempre dispuestos a apoyarme.

A mi amigo Enrique y su familia quienes aprecio mucho siempre me han brindado su apoyo incondicional.

A mis amigos Arturo y Jovita que siempre han estado cuando los he necesitado.

A mi amigo Gilberto a quien aprecio mucho y siempre me brindo su apoyo desinteresado a lo largo de la carrera.

A mi querida amiga Gabriela que a lo largo de la carrera me brindo su amistad y apoyo incondicional.

A mi amiga Argelia a quien aprecio mucho y quien siempre me brindo su apoyo.

A mi novia Sandra quien en el poco tiempo que hemos convivido siempre me ha motivado y apoyado para la realización de esta tesis.

A mi amigo y compañero de trabajo Sorge el cual siempre me ha apoyado durante la carrera y elaboración de la tesis.

A mi amiga y compañera de trabajo Pamela la cual reviso y corrigió mi tesis

Al Dr. Alfonso Duran Moreno por su valiosa y desinteresada ayuda en la revisión y corrección de este trabajo.

A las muchas personas que a lo largo de la carrera siempre me han apoyado: El ancestro o escareño para los cuates, Lety, Vero jurado, Vero, la otra Vero, Brenda, Itzul.

A todos los jefes y compañeros de trabajo: Elsa, Claudia, Rosa, Estela, Ivonne, Abigail, Denis, Ken gerente, El judío, La gorda, Rulo, Alex, con los que he compartido tantas cosas a lo largo de todo este tiempo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	5
1.1 Problemática.....	6
1.2 Objetivo.....	7
2. FUNDAMENTOS.....	7
2.1 Equipos de generación de vapor a alta presión.....	7
2.2 Especificaciones del agua para alimentación de calderas.....	9
2.3 Tipos de tecnologías.....	18
2.3.1 Intercambio iónico.....	18
2.3.2 Electrodialisis.....	24
2.3.3 Osmosis inversa.....	29
2.3.4 Electrodesionización.....	38
2.3.5 Evaporación.....	41
3. ASPECTOS TECNICOS DE TECNOLOGIAS MODERNAS.....	62
3.1 Intercambio iónico.....	62
3.2 Osmosis inversa.....	64
3.3 Electrodialisis.....	66
3.4 Electrodesionización.....	68
3.5 Evaporación.....	69
4. CONCLUSIONES.....	72

TABLAS

Tabla 1.1.	Limites recomendados para los constituyentes del agua que se usan en calderas.....	15
Tabla 1.2.	Impurezas comunes en el agua y efecto posible cuando se emplean para alimentación de calderas.....	16
Tabla 1.3.	Principio de tecnologías para desmineralización de agua.....	18
Tabla 1.4.	características de las membranas naturales y sintéticas.....	38
Tabla 1.5.	Pretratamiento para el proceso de ósmosis inversa.....	57
Tabla 1.6.	Análisis del Agua de Alimentación y Producto de la Localidad de Ocean Reef, Florida, EE.UU.	59
Tabla 1.7.	Costos Aproximados de Inversión y Operación de Sistemas de Ósmosis Inversa.....	59
Tabla 1.8.	Análisis del Agua Tratada y Producida por el Sistema de Ósmosis Inversa.....	62
Tabla 1.9.	Ventajas y desventajas de la desmineralización por intercambio iónico.....	66
Tabla 1.10.	Ventajas y desventajas de la desmineralización por ósmosis inversa.....	67

Tabla 1.11.	Ventajas y desventajas de la desmineralización por electrodiálisis	69
Tabla 1.12.	Ventajas y desventajas de la desmineralización por electrodesionización	71
Tabla 1.13.	Ventajas y desventajas de la desmineralización por evaporación.	72
Tabla 1.14.	Tipos de agua.....	82

FIGURAS

Figura 1.1.	Representación gráfica de intercambio iónico.....	20
Figura 1.2.	Difusión en la resina.....	21
Figura 1.3.	Proceso de Electrodiálisis.	26
Figura 1.4.	Esquema de un equipo de Electrodiálisis.....	27
Figura 1.5.	Representación de matriz de copolímero estireno-divinilbenceno.	29
Figura 1.6.	Principios de las Ósmosis Normal e Inversa.	32
Figura 1.7.	Ósmosis inversa.....	34
Figura 1.8.	Sistema de ósmosis inversa.....	34
Figura 1.9.	Tamaño de partícula retenida para sistemas de separación.....	37
Figura 1.10.	Esquema de bio obstrucción.....	39
Figura 1.11.	Electrodesionización.....	41
Figura 1.12.	Esquematación de columna durante la carga.	47
Figura 1.13.	Esquematación de la regeneración de la columna.....	47
Figura 1.14.	Detalle de las esferas de resina de intercambio ionico.....	48
Figura 1.15.	Detalle de una resina combinada de intercambio catiónico – aniónica.	49
Figura 1.16.	Resina monoesfera.....	50
Figura 1.17.	Resina no monoesférica	50
Figura 1.18.	Tres tipos de resina.	51
Figura 1.19.	Sistema de retrolavado.....	55

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la creciente modernización y sofisticación en la maquinaria industrial, hace que el agua para proceso sea un problema de gran importancia ya que es vital manejar un agua de alta calidad en los procesos. Cuando las condiciones de utilización requieren un bajo contenido en sales disueltas, es conveniente desmineralizar el agua.

Existe una variedad de equipos para la desmineralización, ya que las calidades de agua de las que se dispone para los procesos nunca es igual, y las especificaciones de contenido de minerales igualmente es diferente. Tomando en cuenta estos aspectos, es necesario tener una base de comparación de sistemas, para así tener una base de selección.

Como se podrá constatar las tecnologías ya existentes pueden ser combinadas para poder lograr la calidad de agua deseada.

El presente trabajo está enfocado en la realización de un compendio informativo acerca de equipos y métodos para la producción de agua desmineralizada en plantas de procesos químicos, se decidió revisar las tecnologías existentes a la fecha, los requerimientos de operación, la calidad de agua especificada y los sistemas de automatización total de unidades desmineralizadoras.

Esto se pretende, realizando un análisis comparativo de tecnologías en sistemas desmineralizadores.

Las opciones de tecnológicas que se pretenden estudiar son las siguientes:

- Intercambio Iónico
- Ósmosis Inversa
- Electrodialisis
- Electrodesionización
- Vaporización

1.1 PROBLEMÁTICA

Un problema de la sociedad moderna con tan grande desarrollo tecnológico, es la cantidad y la calidad de agua que se necesita dentro de la industria, ya que ésta se ha incrementado lo cual nos genera la necesidad de crear sistemas más eficientes.

Son pocas las operaciones de ingeniería o industriales que pueden llevarse a cabo con buenos resultados si se carece de un suministro adecuado de agua convenientemente acondicionada. El agua de una calidad dada satisfactoria para una serie de condiciones, puede ser totalmente inadecuada para otros fines.

La purificación de agua que resulta satisfactoria para usos municipales es frecuentemente inadecuada para muchos procesos industriales. Claramente no es práctico acondicionar el suministro público para toda una comunidad y lograr que el agua procesada satisfaga los requisitos específicos de grupos de industrias. Todas las industrias que dependen de suministros públicos de agua deben esperar que el agua suministrada se encuentre dentro de los parámetros apropiados, el tratamiento que implica la calidad deseada corresponde a la iniciativa privada.

Esto si bien se puede lograr con nuevas tecnologías de igual manera se puede lograr combinando diversas tecnologías ya existentes.

Dentro de la información existente de desmineralización no se cuenta con una guía que unifique los diferentes medios para el tratamiento de efluentes, además de brindar información acerca de las ventajas y desventajas de los procesos ya existentes para estos fines.



1.2 OBJETIVO

Establecer una comparación de equipos, métodos y tecnologías existentes para la desmineralización de agua, para su uso en la generación de vapor de alta presión.

2. FUNDAMENTOS

2.1 EQUIPO DE GENERACION DE VAPOR DE ALTA PRESIÓN

Las Calderas o Generadores de vapor son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones en la industria.

Partes principales de las calderas:

Cámara de agua.

Recibe este nombre el espacio que ocupa el agua en el interior de la caldera.

Cámara de vapor.

Es el espacio ocupado por el vapor en el interior de la caldera, en ella debe separarse el vapor del agua que lleve una suspensión.

Quemadores.

Dispositivos de la caldera, donde se lleva a cabo la reacción química del aire con el combustible fósil, para transformarse en calor, mismo que posteriormente servirá para cambiar las propiedades del agua líquida a vapor.



Hogar de la caldera.

En el caso de las calderas tipo “tubos de agua”, el hogar está formado por paredes hechas con "bancos de tubos"; en calderas tipo “tubos de humo”, el hogar está formado por una envolvente metálica interna. En ambos casos, es en el hogar donde se inicia la transformación del agua en estado de saturación a vapor y donde se termina de realizar el proceso de combustión iniciado en el quemador, liberando el calor del combustible.

Sistema de distribución del vapor.

Serie de tubos denominados "cabezales y ramales de vapor", que permite llevar el vapor a los puntos donde el proceso lo requiere, con la calidad y en la cantidad demandada.

Sistema de retorno de condensados.

Serie de tubos denominados "cabezales y ramales de condensado", que regresan parte del agua que se ha condensado en el proceso. Esta agua, de gran valor por su pureza, se retorna al sistema de generación de vapor con un previo tratamiento. Es muy recomendable la instalación de este sistema, ya que permite recuperar la mayor cantidad posible de condensados.

La desmineralización de aguas de alimentación a calderas es importante ya que, el origen de la incrustación está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de temperatura.

Por esto, las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la pared metálica que las calderas con las paredes limpias.

Otro tema importante que debe ser considerado, es la falla de los tubos ocasionadas por sobrecalentamientos debido a la presencia de depósitos, lo que



dada su naturaleza, aíslan el metal del agua que los rodea pudiendo así sobrevenir desgarros o roturas en los tubos de la unidad con los perjuicios que ello ocasiona.

Las sustancias formadoras de incrustaciones son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice, esto se debe a la baja solubilidad que presentan estas sales y algunas de ellas como es el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover, algunas de las causas más frecuentes de este fenómeno son las siguientes:

Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.

El vapor o condensado tienen algún tipo de contaminación.

Transporte de productos de corrosión a zonas favorables para su precipitación.

Aplicación inapropiada de productos químicos (Perry. 1995).

2.2 Especificaciones del agua para la alimentación de calderas

Como ya se sabe, el agua perfecta para alimentar calderas es aquella que no deposite sustancias incrustantes, no corroa el metal de las calderas o sus accesorios y no ocasione arrastres ni espuma. Agua de estas características es difícil obtener excepto mediante purificación artificial, con la cual las impurezas capaces de originar incrustaciones, corrosión y otros efectos indeseables, se eliminan o cambian a productos menos perjudiciales; aun cuando es posible encontrar gran variedad de sales minerales o ácidos en las aguas naturales, hay pocos de estos constituyentes presentes en suficiente cantidad para que ocasionen dificultades. En la tabla 1.1 se enlistan algunos constituyentes presentes en el agua que pueden crear problemas cuando están presentes en el agua para la generación de vapor.



Antes de enlistar los tratamientos para la desmineralización de aguas, es importante conocer las propiedades de algunas impurezas encontradas con frecuencia en los suministros. Estas sustancias pueden encontrarse presentes como materia en suspensión o bien en solución. Es esta última, la forma en que ocasionan mayores dificultades en la generación de vapor.

Sólidos suspendidos en el agua

Este término se aplica a la materia heterogénea que muchas aguas contienen. Los sólidos suspendidos consisten principalmente de lodo, humus y productos provenientes de aguas negras o residuos industriales. Las aguas que contienen cantidades apreciables de sólidos en suspensión no son adecuadas para la alimentación de calderas, dado que producen depósitos de lodos dentro de las mismas y pueden ocasionar formación de espumas, arrastres así como también incrustaciones. Cuando dichas condiciones son resultado de la contaminación de aguas negras o residuos industriales es posible que simultáneamente se produzca corrosión.

Sólidos y gases disueltos

Los constituyentes más difíciles de remover son los que se encuentran en solución. Los compuestos solubles son sustancias tanto orgánicas como inorgánicas y son perjudiciales en grado variable en relación con la eficiencia de operación de las calderas.

Tipos de agua

Las aguas pueden clasificarse en duras y blandas, ácidas o alcalinas, describiendo así, su característica predominante reflejada por los compuestos que contiene.



El término agua cruda fue creado para definir su demanda de jabón, la que determina su calidad con respecto a sus características con fines de lavandería. La dureza del agua obedece principalmente a la dureza de sales de calcio y magnesio disueltas en ella. Sin embargo, existen otros componentes que también atacan al jabón y que son, por tanto indicadores de dureza; entre tales compuestos se puede citar al hierro, aluminio, ácidos orgánicos y minerales así como otros metales.

La dureza en agua representa el contenido de iones bivalentes tales como hierro, manganeso, calcio, y magnesio. Entre la dureza se conocen los iones de calcio y el magnesio como especie dominante en agua. La dureza es responsable de dos efectos dañinos y formación de depósitos (Suk, 2007).

Formalmente la dureza se define como la suma de la concentración de cationes polivalentes, con fines prácticos se asume a la dureza total como la suma de concentraciones de calcio y magnesio.

Dureza de carbonatos, representa a los carbonatos y bicarbonatos de calcio.

Dureza no carbonatada y dureza permanente son términos sinónimos que indican la dureza total, con excepción de la suministrada por los carbonatos y bicarbonatos presentes.

La alcalinidad del agua se debe a la presencia de compuestos alcalinos mediante los análisis de alcalinidad y dureza y la comparación de las determinaciones de alcalinidad, es posible definir los tipos de compuestos alcalinos que se encuentran presentes en el agua.

Sólidos en solución

En virtud a la alta solubilidad de las sales sódicas en el agua, éstas generalmente no originan depósitos o incrustaciones excepto en concentraciones muy elevadas.



Las formas en que el sodio se encuentra más frecuentemente en el agua son: NaCl , Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaOH , Na_2SO_4 ; y NaNO_3 .

El cloruro de sodio NaCl es la sal común o sal de uso doméstico; esta forma se encuentra ampliamente distribuida en el mundo, y prácticamente todas las aguas contienen algo de ella. No forma incrustaciones a las concentraciones normalmente encontradas en agua para calderas. Dicha sal no es particularmente corrosiva, pero en presencia de compuestos de magnesio, especialmente sulfato de magnesio, se forma cloruro de magnesio que es una sustancia corrosiva en potencia.

El bicarbonato de sodio Na_2CO_3 es una de las sales más importantes que pueden encontrarse en las aguas para calderas; esta sustancia, al ser calentada, pasa por carbonato de sodio, comúnmente llamado soda ash o ceniza de sosa. El bicarbonato de sodio es muy soluble y se encuentra con frecuencia en concentraciones elevadas en muchas aguas naturales. El carbonato de sodio se usa extensamente como agente de ablandamiento para transformar el sulfato de calcio en carbonato de calcio.

El hidróxido de sodio NaOH , debido a la hidrólisis que se produce a altas temperaturas y presiones, se halla siempre presente cuando el agua para alimentación contiene carbonato de sodio o bicarbonato. Dicho compuesto posee elevada solubilidad por ello no produce incrustaciones. Una concentración excesiva de sosa cáustica en el agua para calderas ocasiona muchos problemas de operación debido a que la sosa cáustica ataca al acero produciendo el efecto conocido como fragilización cáustica o cristalización del acero de calderas.

Gases

Existen varios gases que ocasionalmente pueden encontrarse disueltos en el agua con excepción del bióxido de carbono, oxígeno y amoníaco; sin embargo no es difícil encontrar corrosión causada por dichos gases, éstos representan la causa principal de corrosión encontrada en calderas, turbinas y accesorios. El bióxido de



carbono es en realidad un ácido cuando se encuentra combinado con el agua (H_3CO_3) y como tal, ataca activamente al metal de la caldera. El oxígeno seco tiene una acción directa escasa sobre el metal, pero acelera considerablemente la corrosión cuando se encuentra en solución por lo que la remoción de este gas del agua para alimentación corrige en gran parte el problema de la corrosión.

Muchas aguas contienen ácidos minerales libres, es evidente que estas aguas son sumamente dañinas para las calderas aún cuando su acidez sea baja; estas condiciones generalmente son el resultado de la contaminación del agua por drenajes de minas o residuos industriales.

Materia orgánica

Todas las aguas contienen alguna materia orgánica. La cantidad presente en aguas subterráneas es generalmente pequeña, pero las fuentes superficiales usualmente contienen cantidades relativamente grandes. Se ocasionan numerosos defectos de operación en las calderas cuando se halla presente materia orgánica en el agua de las mismas.. La mayor parte de la materia orgánica presente en el agua es producida por descarga de drenajes sanitarios y residuos industriales en los registros (Sheppard, 1966).

Tabla 1.1. Límites recomendados para los constituyentes del agua que se usan en calderas

PARTES POR MILLON (PPM)							
Presión lb/in ²	Total de sólidos disueltos	Alcalinidad	Dureza	Sílice	Turbidez	Aceite	Fosfatos residuales
0-300	3500	700	0	100-60	175	7	140
301-450	3000	600	0	60-45	150	7	120
451-600	2500	500	0	45-35	125	7	100
601-750	2000	400	0	35-25	100	7	80
751-900	1500	300	0	25-15	75	7	

(Perry. 1995)



Tabla 1.2. Impurezas comunes en el agua y efecto posible cuando se emplean para alimentación de calderas

Constituyente	Fórmula química	Fuente principal del contaminante	Efecto posible cuando se encuentra presente en agua para calderas	Tratamiento para removerlo del agua
Sólidos en suspensión	-	Drenaje superficial, residuos industriales.	Arrastres, espuma, lodos o incrustación.	Sedimentación libre, coagulación, filtración, evaporación.
Sílice	SiO ₂	Depósitos minerales.	Incrustación.	Sedimentación libre, coagulación, filtración, evaporación, intercambio iónico.
Carbonato de calcio	CaCO ₃	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporación.
Bicarbonato de calcio	Ca(HCO ₃) ₂	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento por calentamiento, con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Sulfato de calcio	CaSO ₄	Depósitos minerales.	Incrustación, corrosión.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Cloruro de calcio	CaCl ₂	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Bicarbonato de magnesio	Mg(HCO ₃) ₂	Depósitos minerales.	Incrustación.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.



Constituyente	Fórmula química	Fuente principal del contaminante	Efecto posible cuando se encuentra presente en agua para calderas	Tratamiento para removerlo del agua
Cloruro de magnesio	MgCl ₂	Depósitos minerales.	Incrustación, corrosión.	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Ácidos libres	HCl, H ₂ SO ₄	Drenaje de minas, residuos industriales.	Corrosión.	Neutralización seguida en ocasiones de ablandamiento o evaporación.
Cloruro de sodio	NaCl	Aguas negras, residuos industriales, depósitos minerales.	Inerte pero puede ser corrosivo bajo ciertas condiciones.	Evaporización y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	Depósitos minerales.	Arrastres, espuma, fragilización.	Evaporización y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	Depósitos minerales.	Arrastres, espuma, fragilización.	Evaporización y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Acido carbónico	H ₂ CO ₃	Absorción de la atmósfera, depósitos minerales, descomposición de materia orgánica.	Corrosión.	Desaereación.
Oxígeno	O ₂	Absorción de la atmósfera	Corrosión.	Desaereación.
Grasa y aceite		Residuos industriales.	Corrosión, depósitos, arrastres espuma.	Coagulación, filtración, evaporación.
Materia orgánica y aguas negras		Residuos domésticos e industriales.	Corrosión, depósitos, arrastres espuma.	Coagulación, filtración, evaporación.

Acondicionamiento de aguas para la industria, Shepard T. Powel, 1966



DESMINERALIZACIÓN

Se denomina desmineralización a la remoción de sólidos disueltos de origen mineral presentes en todas las aguas naturales, y cuya presencia es indeseable o dañina para las operaciones y procesos productivos para los cuales está destinada. Dicha eliminación de sólidos disueltos ha sido lograda confiablemente con diversas técnicas y combinación de las mismas, incluyendo procesos muy diversos.

En calderas de mediana y alta presión el agua debe contener un mínimo de sales porque pueden dañar las turbinas y las propias calderas, por lo cual se dice que el agua debe ser desionizada o desmineralizada ya que esto podría contaminar el producto final (vapor).

El intercambio iónico es un proceso eficaz para eliminar los iones del agua; utiliza perlas de resina cuyos grupos funcionales intercambian iones con los iones presentes en el agua.

Tabla 1.3. Principio de tecnologías para desmineralización de agua

Tecnología	Principio
Intercambio iónico	Se basa en la afinidad de ciertos polímeros ionizados por los iones disueltos en el agua.
Ósmosis inversa	El agua es forzada a atravesar la membrana semipermeable mientras que ésta última rechaza los sólidos disueltos.
Electrodesionización	Es un proceso de purificación activado eléctricamente e incluye una combinación de resinas de intercambio iónico y membranas selectivas de iones.
Electrodialisis	Es la migración de electrodos a través de una membrana bajo el efecto de una corriente eléctrica.
Vaporización	El agua es evaporada y condensada.



2.3 TIPOS DE TECNOLOGÍAS.

2.3.1 INTERCAMBIO IÓNICO

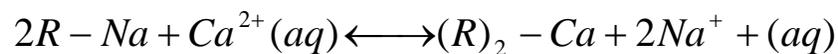
El intercambio iónico es un proceso en el que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian con una especie diferente existente en disolución. Este proceso ha llegado a ser notablemente importante en el campo del tratamiento de aguas residuales.

Ya que la desmineralización completa puede alcanzarse mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamiento de corriente partida, en los que parte del agua residual efluente se desmineraliza y combina después con parte del efluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica (por ejemplo de una determinada dureza).

Resinas de intercambio iónico. Hasta los años cuarenta las zeolitas naturales eran los únicos cambiadores de iones disponibles; la capacidad de intercambio era relativamente baja, lo que limitaba la posibilidad económica del proceso en su aplicación al tratamiento de aguas residuales. A partir de entonces, las zeolitas han sido sustituidas por resinas sintéticas tales como estireno y divinil benceno (DVB); dichas resinas son polímeros insolubles a los que se añaden mediante reacciones químicas grupos básicos o ácidos capaces de realizar un intercambio reversible con los iones presentes en una disolución. El número total de grupos funcionales por unidad de peso (o unidad de volumen) de resina determina la capacidad de intercambio, mientras que el tipo de grupo funcional determina la selectividad iónica y la posición de equilibrio de intercambio. Las partículas de resina tienen diámetros de 0.5 mm aproximadamente y se emplean en columnas rellenas utilizando caudales de aguas residuales de 200 a 500 L/(min)(m²) (Rarmalho, 1996):



Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática positiva o negativa, neutralizada por un ión de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico, que puede ilustrarse con la siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ión sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ión calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz.



Una representación simplificada de lo que está sucediendo en los sitios activos de la resina se puede ver en la figura 1.1.

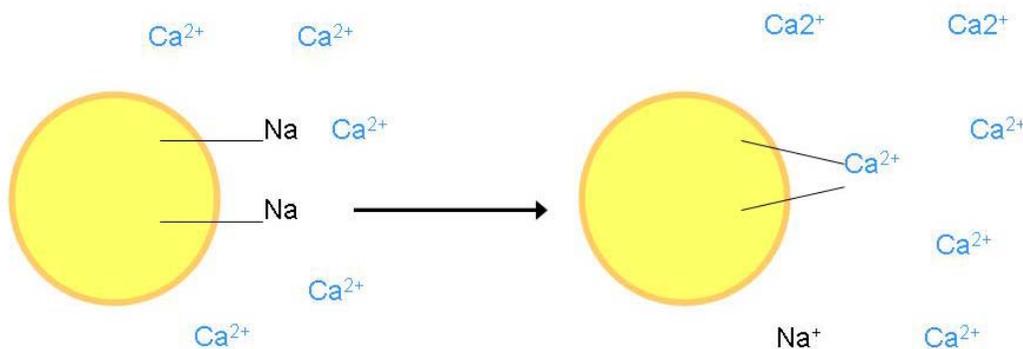


Figura 1.1. Representación gráfica de intercambio iónico.

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originalmente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ión en particular, el pH de la disolución, si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones y la temperatura.



Para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa; este movimiento se conoce como proceso de difusión. La difusión de un ión está en función de su dimensión, carga electrostática, la temperatura y también está influenciada por la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, de una mayor concentración a una menor concentración, hasta que dichas zonas alcancen la misma concentración.

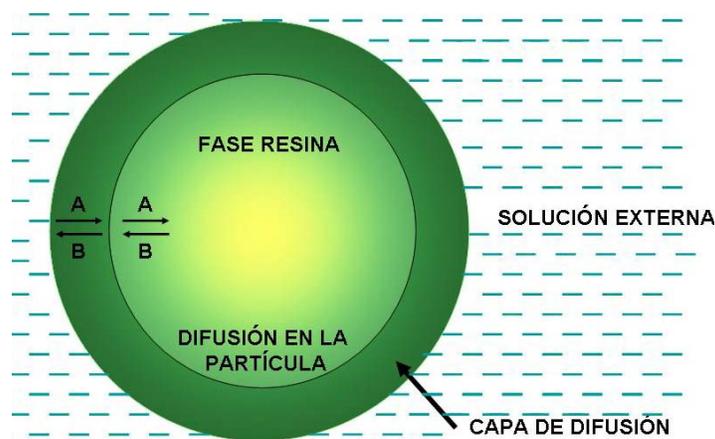


Figura 1.2. Difusión en la resina.

Parámetros característicos de los intercambiadores iónicos

Capacidad de intercambio: Es la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales, la cual depende del tipo de grupo activo, se expresan normalmente en formas de equivalentes de ion separado por unidad de volumen de lecho (por ejemplo, equivalentes/l de resina o equivalentes /m³ de resina); pueden expresarse también por unidad de de peso de lecho (por ejemplo, equivalentes /kg de resina). Las capacidades de intercambio se expresan también en función del peso equivalente de CaCO₃ por unidad de volumen o bien por unidad de peso del lecho (por ejemplo, kg CaCO₃/m³ de resina o kg CaCO₃/ kg de resina).

(Ramalho, 1996)



Capacidad específica teórica: Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.

Selectividad: La selectividad depende de las interacciones electrostáticas que se establezcan entre el ión y el intercambiador y de la formación de enlaces con el grupo ionogénico. La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme los enlaces más fuertes, de aquí la propiedad de los intercambiadores iónicos de mostrar mayor afinidad por un ión que por otro. La selectividad de una resina por un ión determinado se mide con el coeficiente de selectividad, K .

La estructura de poro y la elasticidad del intercambiador también influyen en su selectividad, como ocurre con las zeolitas, su estructura de poro rígida les permite actuar como tamices moleculares, impidiendo la entrada de ciertos iones sencillamente por su tamaño. El tratamiento de una disolución con un intercambiador iónico se puede llevar a cabo mediante dos configuraciones distintas, en discontinuo o en columna.

a. Intercambio iónico en discontinuo

En las operaciones en discontinuo, se mezcla el intercambiador y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcance el equilibrio.

Esta configuración no puede aplicarse para devolver el intercambiador a su forma iónica original, ya que el proceso de regeneración en discontinuo no es eficiente químicamente y requiere recuperarse el intercambiador por decantación y transferirlo a una columna para proceder a su regeneración; cabe destacar que este método, a pesar de ser muy eficiente, tiene pocas aplicaciones industriales.



b. Intercambio iónico en columna

Esta configuración es la que se emplea en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar.

El proceso global consta de varias etapas que a continuación se describen brevemente.

Empaquetamiento de la columna: Consiste en introducir el intercambiador en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para así obtener un lecho uniforme; esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada, que además resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de swelling. El swelling puede causar graves problemas si tiene lugar una vez que el intercambiador se encuentra confinado en la columna y no se ha dejado espacio suficiente para alojarlo cuando éste incrementa su volumen.

Acondicionamiento del intercambiador: Muchas resinas comerciales se venden en una forma iónica que puede no ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por ejemplo, una resina básica fuerte que tenga como contraión un grupo OH^- y que, por necesidades del proceso, sea deseable tener un ion Cl^- .

En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener. Una vez se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada.

Etapas de carga: En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y el intercambiador. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través del intercambiador. Las condiciones de



operación como la velocidad de flujo, pH de la disolución entre otros dependerán del tipo de intercambiador utilizado, y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento en cuanto a capacidad y selectividad.

Cuando el intercambiador comienza a estar saturado con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna; esta descarga de iones se conoce como "que fugan", e indica que el tratamiento de la disolución por el intercambiador ya no está siendo efectivo. Una vez la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la de la concentración de entrada, el intercambiador ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación.

Etapas de regeneración: consiste en devolver el intercambiador saturado a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ión originariamente asociado al intercambiador (por ejemplo, un ácido mineral para una resina ácida fuerte). Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento del intercambiador en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente.

El consumo de regenerante se expresa en unidades de peso por unidad de volumen de lecho (por ejemplo, $\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{m}^3$) el grado de capacidad teórica alcanzado (con respecto a la resina fresca) depende del peso del regenerante empleado (Ramalho, 1996).

Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como son la concentración y volumen de disolución regenerante así como la velocidad de flujo.



La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

- El gasto económico en regenerante. Puede reducirse reutilizándolo hasta que pierda su eficiencia aunque esta opción tampoco es del todo económica ya que implica establecer unas condiciones para su almacenaje.
- La generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas.

Para seleccionar entre la Ósmosis inversa o el Intercambio iónico como la tecnología más adecuada, es necesario considerar la capacidad de la planta, la salinidad del agua de alimentación y requisitos de la calidad del producto. Cuando el agua de alimentación tiene un contenido de minerales medio o alto y la capacidad de la planta de tratamiento de agua es grande, entonces es ventajoso instalar tecnología de RO (ósmosis inversa). Cuando el agua de alimentación tiene un contenido de minerales bajo, la capacidad de la planta es pequeña y el agua del producto no necesita tener conductividad baja y STD bajo, es ventajoso instalar tecnología de IE (intercambio iónico). La desmineralización del IE no es buena en todo caso debido al alto consumo de los productos químicos para la regeneración.

El futuro de la desmineralización del agua pertenece probablemente a la combinación de RO y de EDI donde el costo y el consumo de productos químicos se reducen a un mínimo. EDI, que combina las ventajas de la electrodiálisis y de las resinas de IE, puede, conjuntamente con el RO, producir el agua ultra-pura de alta calidad (Cléber, 2000).



2.3.2 ELECTRODIÁLISIS

La electrodiálisis se desarrolló para la desalación del agua del mar. Es un método prometedor de eliminación de nutrientes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) de las aguas residuales y, por ello, una posible etapa final en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

En la figura 1.3 se representa un diagrama de una celda de Electrodiálisis. Los componentes básicos de la celda son una serie de membranas constituidas de resinas de intercambio iónico; estas membranas son permeables a las especies iónicas y son relativamente selectivas de un tipo específico de iones. Existen dos tipos de membranas utilizadas en las celdas de Electrodiálisis: (1) membranas catiónicas, que poseen una carga fija negativa, permitiendo a los cationes (iones positivos) pasar a través de ellas pero repeliendo a los aniones (cargas negativas); y (2) membranas aniónicas, que poseen una carga positiva fija, permitiendo el paso de los aniones (iones negativos) a través de ellas pero repeliendo a los cationes (cargas positivas).

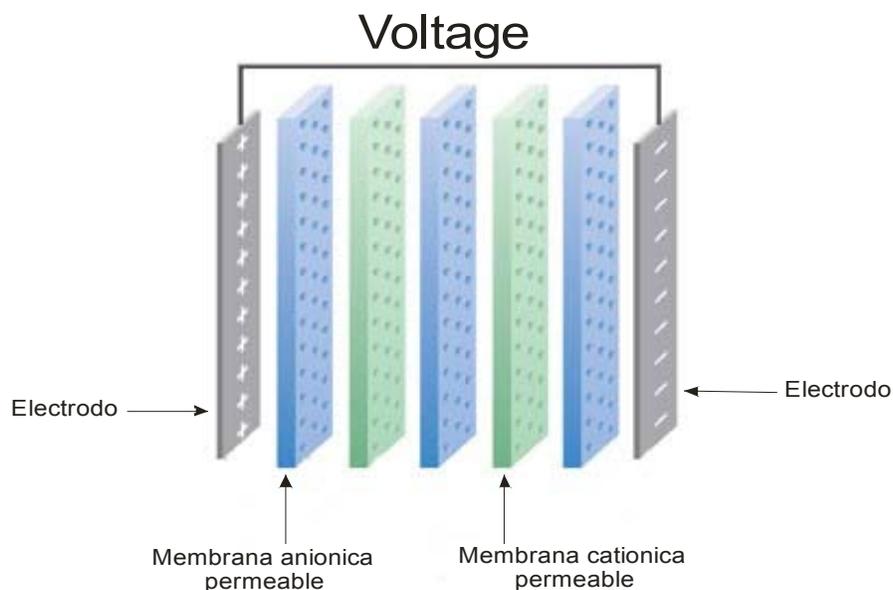


Figura 1.3. Proceso de Electrodiálisis.



El paso de los iones a través de las membranas se acelera por la aplicación de una tensión constante a lo largo de una serie de membranas permeables al catión y al anión. Tal como se indica en la figura 1.4, el cátodo y el ánodo se colocan en los dos extremos de la celda de forma tal que la membrana más próxima al cátodo sea permeable a los cationes y la más próxima al ánodo sea permeable a los aniones. El agua residual cruda se alimenta continuamente en los compartimientos de concentración y el agua residual tratada se extrae continuamente de los compartimientos de dilución.

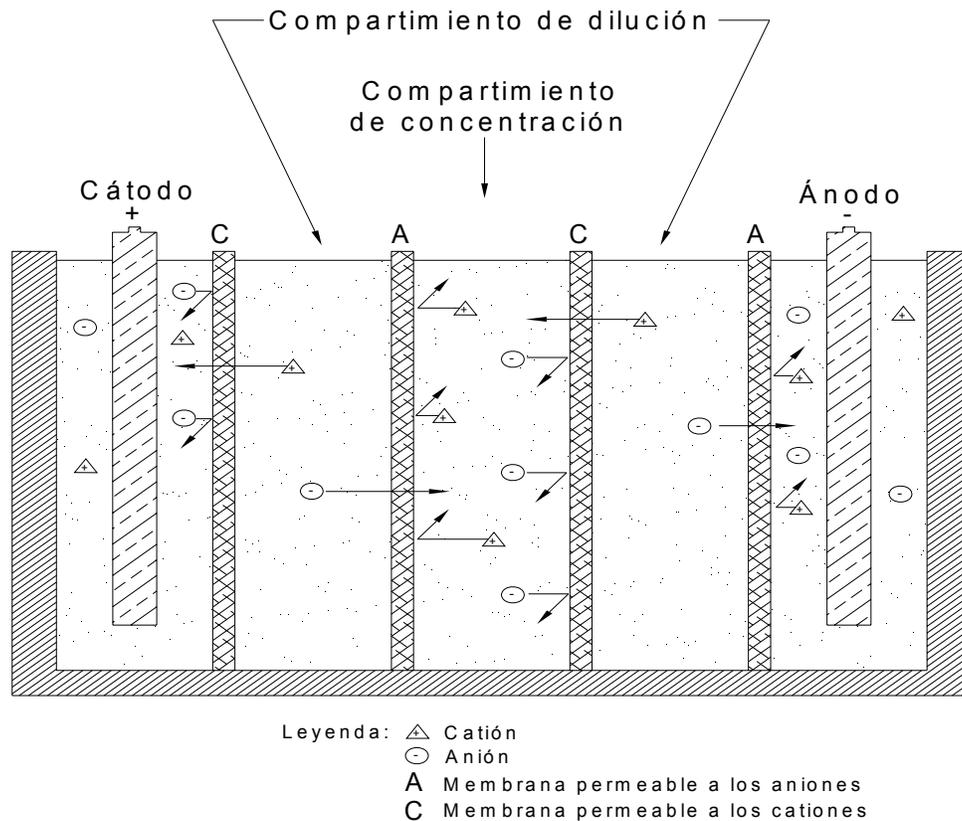


Figura 1.4. Esquema de un equipo de Electrodiálisis

Para un funcionamiento adecuado de la celda de electrodiálisis, la materia en suspensión, los iones orgánicos de gran tamaño y materia coloidal deben separarse antes del proceso. Si esto no se hace, los materiales pueden provocar



ensuciamiento de la membrana lo que conduce a un aumento de la resistencia eléctrica total. Para una tensión constante aplicada, la corriente que pasa a través de la celda disminuye; por lo tanto la capacidad desmineralizadora del equipo disminuye también ya que acorde a la ley de Faraday la migración de un equivalente-gramo de una especie iónica se da por amperio por segundo aplicado.

El mayor problema a superar en la electrodiálisis, como tratamiento de agua, es el concerniente a la reducción del ensuciamiento de las membranas, ya que éste presenta un alto costo económico. El ensuciamiento se reduce mediante:

1. El tratamiento de agua residual cruda con objeto de separar la materia en suspensión coloidal y los iones orgánicos de gran tamaño; se realiza mediante coagulantes, la filtración a través de microfiltros y/o la adsorción en columnas de carbón activo. El costo de este tratamiento puede hacer que el proceso resulte antieconómico.
2. El ensuciamiento se disminuye mediante la parada periódica de la planta para limpieza.
3. La inversión periódica de corriente tiende a minimizar los efectos del ensuciamiento (Ramalho, 1996).

La eficiencia de la electrodiálisis depende de los sólidos iónicos, partículas orgánicas en la corriente de alimentación, la temperatura del caudal y la corriente eléctrica requerida.

Los progresos recientes han mejorado la eficacia de la ED (Electrodiálisis) invirtiendo la polaridad de los electrodos periódicamente, dicha tecnología es conocida como EDR (Electrodiálisis reversa) y ha reducido los problemas de ensuciamiento comunes en la ED..

(OSMOTICS. 1997)



Con el método de electrodiálisis se logra una desmineralización del agua en un 35 % con una pérdida de un 16 % del agua alimentada en forma de salmuera de desecho.

Actualmente el uso del copolímero estireno-divinilbenceno (figura 1.5) es el funcionar como matriz para enlazar grupos con capacidad intercambiadora, de hecho, la mayoría de las resinas que se emplean actualmente utilizan como matriz a este copolímero.

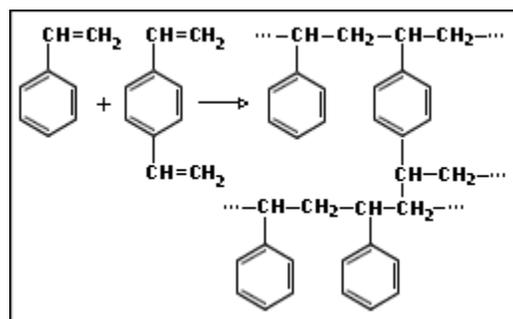


Figura 1.5. Representación de matriz de copolímero estireno-divinilbenceno.

La electrodiálisis con membrana de ultrafiltración (EDUF) es a nueva técnica de membrana que fue desarrollada para fraccionar moléculas valiosas de las materias con base complejas en base a su carga eléctrica. Se utiliza una célula convencional de electrodiálisis, en la cual se substituyen algunas membranas de intercambio iónico por ultrafiltración para poder separarse los compuestos de pesos moleculares más altos.

(Francois P,2007)

La electrodiálisis presenta buen funcionamiento para el retiro de la sal y del fluoruro del agua salobre. Sin embargo el costo de operación es factor limitante para el tratamiento de agua con un alto contenido del fluoruro.

(Menkouchi, 2007)



La utilidad de la diálisis con un pretratamiento de membranas de intercambio catiónico para el retiro de los cationes de calcio y de magnesio antes de la desalación electrodiálítica del agua, requiere hasta tres veces menos energía que en el caso de la solución cruda.

(Wioeniewski.2007)

2.3.3 ÓSMOSIS INVERSA

Aunque los fenómenos osmóticos se conocen desde hace más de 200 años los primeros experimentos relacionando la presión osmótica con la temperatura y la concentración del soluto fueron realizados por Pfeffer a final del siglo pasado.

La tecnología de RO se ha utilizado para la reducción del contenido en sal del agua desde los años 60. Los elementos de la membrana de RO están disponibles para una variedad de usos de la desalación, tratando el agua de las fuentes de agua de mar y el agua salobre para los usos que se extienden del agua industrial y de proceso al agua potable (Guido, 2005).

Principio de la Ósmosis Inversa

La Ósmosis Inversa consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semi-permeable. Su nombre proviene de "ósmosis", el fenómeno natural por el cual se proveen de agua las células vegetales y animales para mantener la vida.

En el caso de la Ósmosis, el solvente (no el soluto) pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada, a través de una membrana semi-permeable. Entre ambas soluciones existe una diferencia de energía, originada en la diferencia de concentraciones, el solvente pasará en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio; si se agrega a la solución más concentrada, energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la **presión Osmótica Aparente** entre las 2 soluciones, dicha



presión Osmótica Aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones; si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso convirtiéndose en **Ósmosis Inversa**. El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica aparente y del área de la membrana presurizada (figura 1.6).

Los componentes básicos de una instalación típica de ósmosis inversa consisten en un tubo de presión conteniendo la membrana, aunque normalmente se utilizan varios de estos tubos, ordenados en serie o paralelo. Una bomba suministra en forma continua el fluido a tratar a los tubos de presión, y, además, es la encargada en la práctica de suministrar la presión necesaria para producir el proceso. Una válvula reguladora en la corriente de concentrado, es la encargada de controlar la misma dentro de los elementos (se denominan así a las membranas convenientemente dispuestas).

Hoy en día, existen 3 configuraciones posibles de la membrana: el elemento tubular, el elemento espiral y el elemento de fibras huecas. Más del 60% de los sistemas instalados en el mundo trabajan con elementos en espiral debido a 2 ventajas apreciables:

- Buena relación **área de membrana/volumen del elemento**.
- Diseño que le permite ser usado sin dificultades de operación en la mayoría de las aplicaciones, ya que admite un fluido con una turbidez hasta 3 veces mayor que los elementos de fibra hueca.

En la actualidad estos elementos se fabrican con membranas de acetato de celulosa o poliamidas y con distintos grados de rechazo y producción.

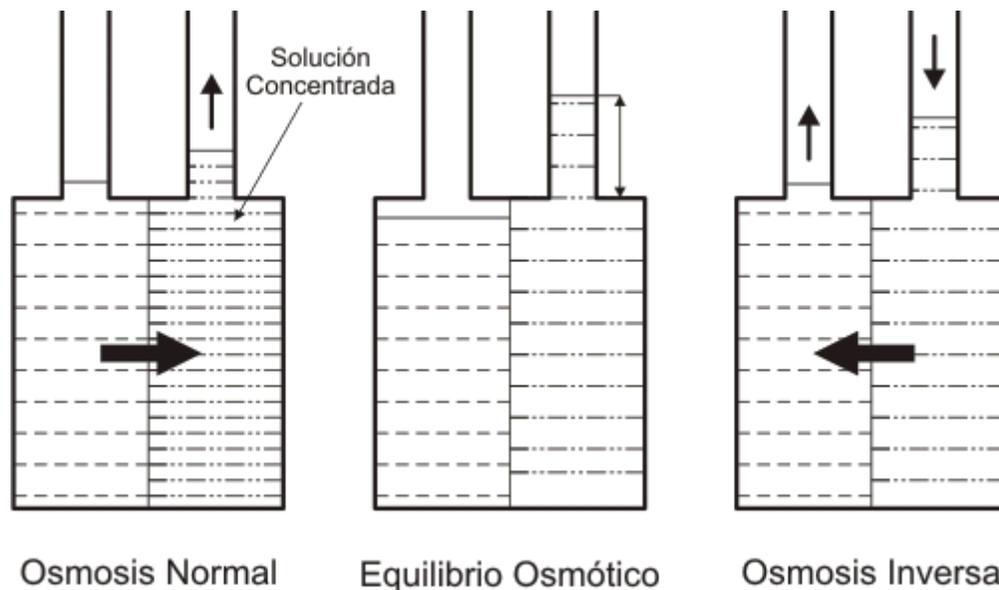


Figura 1.6. Principios de las Ósmosis Normal e Inversa.

En el proceso de ósmosis inversa se requiere de una membrana semipermeable; la cual permite el paso de pequeñas moléculas de disolvente y permite el contacto con la solución, bloqueando el paso de moléculas o iones de mayor tamaño como el soluto; es decir el agua se separa de una solución acuosa, el agua fluye hacia la solución y debido a esto la concentración de iones en solución disminuye. Este es el fenómeno de la ósmosis y el proceso inverso se le llama ósmosis inversa, que puede lograrse mediante la aplicación de presión.

El fenómeno de la ósmosis inversa es útil para la desmineralización del agua; que puede alcanzar una desmineralización del 90 % con una pérdida de aproximadamente el 25 % del agua de alimentación en forma de salmuera y es considerado uno de los métodos de tratamiento terciario más prometedor para el tratamiento del agua contaminada.

Si optamos por otros medios de tratamiento alternos y de uso doméstico debemos tener ciertas precauciones con el método elegido, ya que en ciertos casos podremos llegar a obtener un agua con unos parámetros de calidad que no sean adecuados; tal puede ser el caso de una ósmosis inversa, que si bien resulta un



sistema eficaz de tratamiento de aguas el agua obtenida es de una pureza demasiado elevada, siendo necesario el aporte de concentrados salinos.

Uno de los múltiples aspectos a la hora de valorar la calidad de un tipo determinado de agua es la dureza de la misma; esta propiedad es determinada por el contenido de calcio en el agua, llamado coloquialmente cal en el agua. Un exceso de dureza puede provocar problemas de depósitos calcáreos en tuberías e instalaciones, disminuir la eficacia de lavado de jabones y detergentes y otorgar al agua un sabor demasiado fuerte.

Agua con un contenido muy bajo en calcio es agua corrosiva que produce la oxidación de todos aquellos elementos metálicos con los que está en contacto, produciendo en calderas y tuberías problemas de corrosión graves. Por otra parte, es agua de cierto comportamiento ácido que tiende a absorber todo tipo de metales pesados que encuentra en su camino, ya sean tuberías o recipientes metálicos donde se almacena el agua. Recordamos que el consumo de agua con un alto contenido en metales pesados puede producir graves problemas de salud.

Se debe ajustar el sistema a un equilibrio donde el agua no sea incrustante ni corrosiva; existen una serie de indicadores que determinan con exactitud cuan cerca se encuentra el sistema del equilibrio.

CONCEPTOS BÁSICOS PARA LA PURIFICACIÓN DE AGUA POR MEDIO DE ÓSMOSIS INVERSA.

La tecnología del proceso de ósmosis inversa es bien conocida por su efectividad para reducir el total de sólidos disueltos y también contaminantes iónicos específicos. En recientes pruebas, la Agencia de Protección Ambiental ha demostrado que el proceso es muy efectivo.



En la Figura 1.7 se muestra el efecto de la Ósmosis inversa sobre contaminantes orgánicos como los trihalometanos, los productos químicos volátiles (VOC's) y los productos químicos sintéticos (SOC's). Las concentraciones de estos contaminantes se reducen por ósmosis inversa quedando retenidos en la membrana. Estos contaminantes están enlistados como de alto riesgo para la salud.

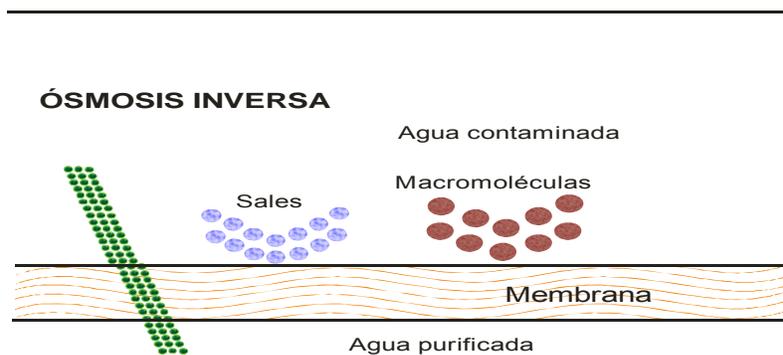


Figura 1.7. Ósmosis inversa.

La Figura 1.8 ilustra un esquema de un sistema de RO. Una bomba de alta presión provee la energía para que el agua que contiene la mayor parte de las sales pase a través de la membrana y otros contaminantes salgan del sistema como "concentrado".

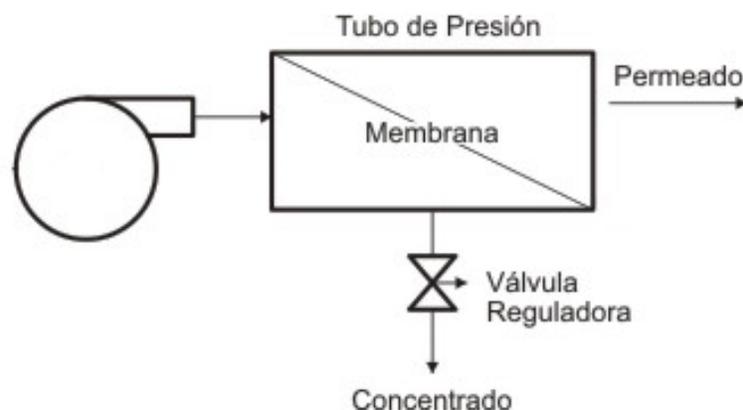


Figura 1.8. Sistema de ósmosis inversa.



Un restrictor de flujo o una válvula de concentrado puesta en la línea permite que la presión obligue al permeado a pasar a través de la membrana. Al porcentaje del agua purificada sobre el total del agua alimentada se le da el nombre de "recuperación" que matemáticamente se representa como sigue:

Porcentaje de Recuperación = $\frac{\text{Permeado}}{\text{Alimentación}} \times 100$

La recuperación es una variable de diseño de sistema y debe ser respetada. Si la recuperación es muy alta, se tendrá mayor flujo de permeado y en consecuencia mayores probabilidades de que la membrana falle por taponamiento. Si la recuperación es muy baja, se desperdiciará mucha agua.

c. Sistemas de membrana

La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de separación; la fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un consumo relativamente bajo de energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas. La tecnología de la membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación distintos y muy característicos.

Estos procesos son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana. Las membranas se utilizan cada vez más a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas complementan las técnicas convencionales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi-permeables.

El principio es bastante simple, la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el



mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

La membrana funciona como una pared de separación selectiva, ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella. La filtración de membrana se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción (filtros de arena y filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos), extracción y destilación. Existen dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. La selectividad se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación (expresado en $L/m^2 h$). La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flujo (expresado en $L/m^2 h$). La selectividad y la productividad dependen de la membrana.

La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultra filtración por una parte y en nanofiltración y ósmosis inversa (RO o hiperfiltración) por la otra.

La Ósmosis inversa retira partículas del tamaño de $5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4} \mu m$. Este intervalo incluye los iones solos, incluyendo Na^+ y Cl^- (Ghazi, 2002).

La filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes, se aplican la microfiltración y la ultrafiltración. Debido al carácter abierto de las membranas su productividad es alta mientras que las diferencias de presión son bajas. Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nanofiltración y la ósmosis inversa. La nanofiltración y las membranas de RO no actúan según el principio de porosidad; la separación ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar la nanofiltración y la ósmosis inversa es mucho más alta que la requerida para la micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja (figura 1.9).

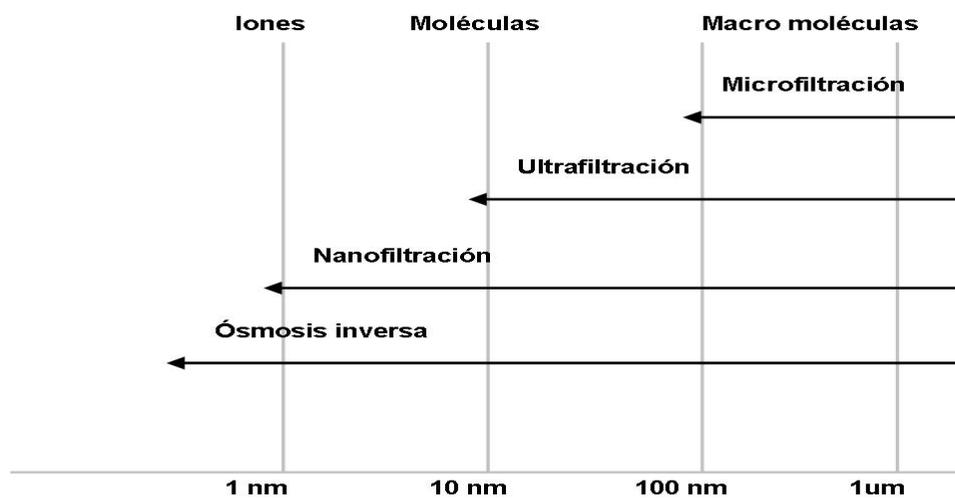


Figura 1.9. Tamaño de partícula retenida para sistemas de separación.

El tipo de agua es la piedra angular al diseñar un sistema de ósmosis inversa. Sin embargo, la caracterización química de diversas aguas naturales no debe faltar. Por lo tanto, la industria de ósmosis inversa confía en un acercamiento muy simple, todas las aguas naturales podían ser agrupadas en dos tipos: salobre (1000-15.000 mg/L) y agua de mar (> 15.000 mg/L) acorde a su salinidad. Para la ósmosis inversa solamente dos tipos de membrana se encuentran disponibles en el mercado, que se utilizan actualmente para todo tipo de agua, sin importar la variación en su naturaleza química o inclusive su salinidad (Samir, 2001)

Tipos de membranas y sus aplicaciones

La filtración de membrana tiene bastantes ventajas frente a las técnicas existentes de purificación de agua; es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura, por lo que permite el tratamiento de los materiales sensibles al calor.



Tabla 1.4. características de las membranas naturales y sintéticas

Características	Acetato de celulosa	Poliamida de polisulfona
Siglas	T.F.C.A.	T.F.C.
Origen	Natural	Sintético
Resistencia a las bacterias	Baja	Alta
Resistencia al cloro	Alta	Baja
Tolerancia al pH	Baja: 4 a 6	Alta: 3 a 10
Prefiltro obligatorio	-	Anticloro
Tasa de depuración	93%	96%
Rendimiento	30%	30%
Ventajas	Precio	Rendimiento
Inconvenientes	Frágil	Precio

Es un proceso de bajo costo energético, la mayor parte de la energía se utiliza para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación. El proceso puede ser fácilmente ampliado. Una desventaja es que provoca un mayor gasto en el mantenimiento de las membranas debido a la obstrucción y contaminación de éstas.

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (UIPAQ) por sus siglas en ingles define obstrucción como: el proceso que disminuye el rendimiento de una membrana, causado por la deposición de sólidos suspendidos o disueltos en la superficie externa de la membrana, en los poros de la membrana o entre los poros de la membrana (Koros 1996).

Al filtrar agua limpia, el material de la membrana es la única resistencia (R_m) que se presenta; el flujo es entonces llamado flujo de agua limpia, y como resultado de la acumulación de partículas en la membrana a través de la filtración de agua con una cierta cantidad de sólidos suspendidos, se formará una capa en la membrana (R_c ; partículas). Cuando las partículas obstruyen los poros de la membrana a esto se le llama bloqueo de los poros (R_{pb} ; scaling). La resistencia que aparece a consecuencia de la adsorción en o sobre la membrana se llama bio obstrucción (R_a).

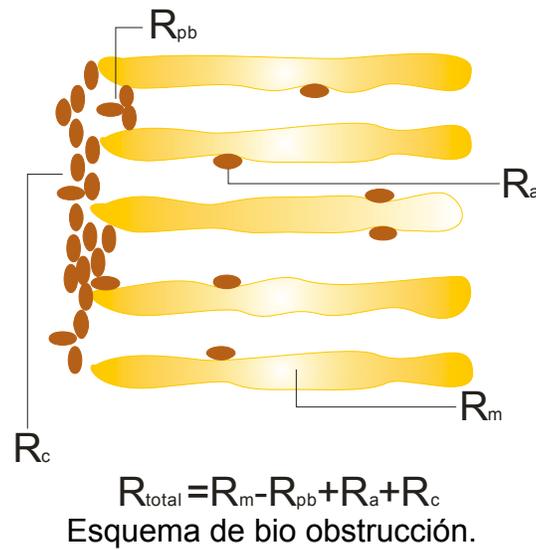


Figura 1.10. Esquema de bio obstrucción.

Resistencias:

R_m = Resistencia de membrana

R_a = Adsorción, bioobstrucción

R_{pb} = obstrucción de los poros

R_c = Capa

Partículas, bio obstrucción y scaling son los tres grupos principales de contaminantes que se pueden distinguir en la obstrucción de membrana, éstos serán las limitantes en la capacidad de filtración (figura 1.10).

Debido al fenómeno de polarización de la concentración, la superficie de la membrana se expone a una concentración, que es mayor que la concentración del bulto de la solución (Sutzkover, 2000).

Hay muchas técnicas diferentes de control de la obstrucción de membrana. Una forma de predecir la obstrucción es usando el Índice de Densidad de Sedimentación (IDS) del agua entrante. El IDS, que está basado en la experiencia, se puede definir como el tiempo necesario para filtrar una cantidad de agua con una destacada concentración de sales a través de una membrana estándar de



microfiltración de 0.45 mm, cuando el IDS es alto, se puede concluir que el agua entrante contiene una elevada cantidad de materia obstructora.

La combinación económica de ultrafiltración y ósmosis inversa para la producción de agua desionizada de aguas superficiales representa un ahorro energía en comparación con un sistema convencional, las combinaciones de proceso evitan en gran parte la formación de basura. Otra ventaja es debido a la construcción modular de la membrana, ya que no existe ninguna necesidad de cerrar las plantas totalmente para el mantenimiento o la limpieza propósitos.

(Cléber, 2000)

La ósmosis inversa (RO) se ha adoptado actualmente para la purificación y la reutilización de los efluentes secundarios (Masson, 1996).

Hasta ahora hay algunos problemas asociados a la limpieza de la membrana. Los procedimientos de limpieza necesitan un tiempo muy largo de operación, consumo de productos químicos, los cuales degradan las membranas, y puede causar corrosión en el equipo (Sayed, 2001).

2.3.4 ELECTRODESIONIZACIÓN

Esta nueva tecnología es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico.

La EDI produce agua de proceso industrial de la más alta calidad, usando 95% menos de productos químicos que la tecnología convencional de intercambio



iónico. Con el sistema de EDI, membranas y electricidad reemplazan a los millones de galones de productos químicos ácidos y cáusticos que los antiguos procesos requerían diariamente.

Un aparato de EDI tiene la estructura básica de una cámara de desionización, dicha cámara contiene una resina de intercambio iónico, empaquetada en un espacio entre una membrana de intercambio catiónico y una membrana de intercambio aniónico, donde solamente los iones pueden pasar a través de las membranas, no el agua.

El agua de entrada pasa a través de la mezcla de resinas de intercambio iónico y, al mismo tiempo, una fuente externa de corriente suministra un campo transversal de corriente continua por medio de unos electrodos colocados en los extremos.

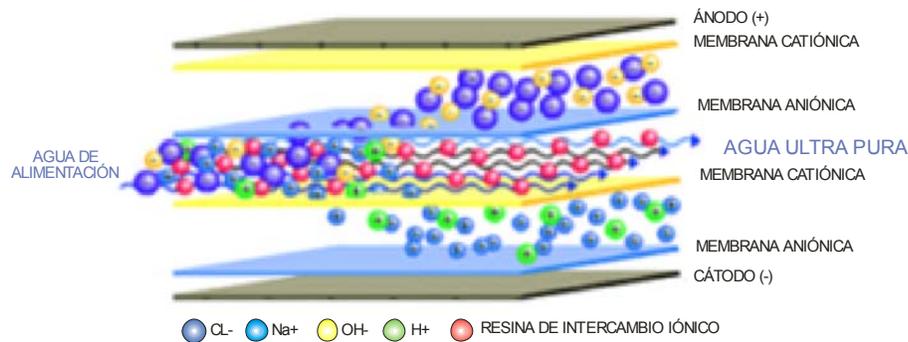


Figura 1.11. Electrodesionización.

El voltaje de corriente continua crea una corriente a través de la resina que arrastra a los cationes hacia el ánodo y a los aniones hacia el cátodo. En el camino de los iones hacia la membrana, éstos pueden pasar dentro de las cámaras del concentrado (figura 1.11) pero no se pueden acercar más al electrodo. Están bloqueados por la membrana contigua, que contiene una resina con la misma carga fija.



De esta forma las membranas de intercambio iónico eliminan eléctricamente los iones del agua de entrada y los pasan al agua concentrada que sale de ambas membranas de intercambio iónico, produciendo así agua ultra pura desionizada.

APLICACIONES

La EDI es útil para cualquier aplicación que requiera la eliminación constante y económica de las impurezas del agua sin necesidad de usar productos químicos peligrosos.

Algunos ejemplos son:

- Reutilización del agua residual en la industria de la alimentación y la bebida.
- Producción química.
- Biotecnología.
- Electrónica.
- Cosmética.
- Laboratorios.
- Industria farmacéutica.
- Agua para alimentación de calderas.
- Reducción de SiO_2 y de TOC (carbono orgánico total) ionizable.

La Electrodesionización continua (CEDI) es una electrodiálisis que consiste en un proceso de separación híbrida de (ED) y de intercambio iónico (IE). Las membranas del intercambio de cationes y de aniones se colocan entre los electrodos como un sistema de la electrodiálisis (ED) (Hoon, 2007).

Pese a que el primer uso práctico del Electrodesionización continua (CEDI) para la producción de la alta calidad de agua fue hace mas de 20 años, el proceso ha alcanzado una importancia técnica y comercial substancial hoy como paso final de la desmineralización después de un tratamiento de la desalación de la ósmosis inversa. El CEDI ahora se aplica en escala industrial como a alternativa rentable a



las técnicas de intercambio iónico previamente usadas de desionización para proporcionar agua desionizada de conductividad extremadamente baja. El agua desionizada se utiliza para la producción de componentes electrónicos y de productos farmacéuticos, para el metal de la limpieza superficies, en laboratorios analíticos y como agua de alimentación a caldera (Grabowski, 2006).

2.3.5 EVAPORACIÓN

Existen en disponibilidad, varios tipos de evaporadores para servicio de plantas de fuerza. Pueden clasificarse como:

- De tubos sumergidos.
- De película.
- Instantáneo (flash).
- De destilación por compresión.

Evaporador de tubos sumergidos.

El evaporador de tubos sumergidos, usualmente consiste de un casco de hierro colado o acero que sirve de recipiente. El agua se calienta con vapor vivo (frecuentemente a presión reducida) o por vapor de escape, que pasa a través de serpentines sumergidos. El equipo puede ser diseñado para operar ya sea como una unidad de tubos sumergidos o como una de tipo película.

Evaporador de película.

Los evaporadores de película como su nombre lo indica, son aquellos en los que el agua cruda se hace pasar en forma de película sobre una serie de serpentines calentados con vapor vivo o de escape. Los serpentines se encuentran dentro de los cascos de hierro colado o de acero. El agua se evapora rápidamente (flash) al pasar en forma de película sobre la superficie de los serpentines calentados con



vapor, y subsecuentemente se convierte a la fase líquida en un condensador adecuado.

Evaporador instantáneo.

Este tipo se opera generalmente bajo presión reducida, utilizando vapor de escape como fuente de calor. El evaporador consiste de un calentador tubular en el cual el agua de repuesto se calienta a una temperatura suficientemente alta para que éste se convierta en vapor rápidamente a su entrada a la cámara de evaporación. La que mantiene vacío parcial. El vapor procedente de la cámara se condensa en el condensador principal o en un condensador separado.

Evaporador de múltiple efecto.

Un evaporador que consiste solamente de una cámara de calentamiento, se denomina evaporador de simple efecto. Por razones de economía, puede ser deseable colocar varias unidades en serie, y cuando esto se hace, los conjuntos reciben el nombre de evaporadores de efecto múltiple. Cuando se emplea esta distribución, el vapor de un efecto se utiliza para calentar y evaporar el agua del efecto siguiente en la serie, los serpentines de vapor de cada efecto sirven como condensadores del efecto previo. Utilizando en esta forma el vapor de cada efecto subsiguiente, la eficiencia del aparato aumenta con respecto a la cantidad de vapor primario requerido para evaporar una cantidad dada de agua (NALCO, 1988).

Con los equipos (MSF) se puede obtener agua de calidad ocupando energía de corrientes residuales (Hikmet , 2004).



APLICACIONES

Debido a la operación que estos equipos ocupan para la desmineralización, pueden ser ocupados para la realización de cogeneración. Utilizando corrientes de alta temperatura para así poder producir la evaporación y con ello la desmineralización del agua.

El sistema de evaporación quita todas las impurezas debajo de la gama de 10 porciones por trillón (ppt) produciendo un agua de pureza extremadamente elevada.

El uso de la evaporación tiene una relación producto-energía alta, pero el problema se ha reducido gracias a los equipos de efecto múltiple, ya que el vapor con temperatura más alta se utiliza en varias ocasiones, perdiendo calor en cada etapa y reduciendo substancialmente el uso total de la energía (OSMOTICS, 1997).

En un sistema de evaporación de etapas múltiples se puede tener arrastre de sales en temporada de invierno debido a la baja de temperatura (Hisham, 2005).

El uso de la recuperación del calor de las corrientes industriales para la destilación del agua de mar es una de las maneras más eficaces para reducir el costo de la desalación. Existen varios casos de recuperación de corrientes relativamente “calientes” tales como el extractor de un motor térmico o del agua de enfriamiento de un proceso para la producción del vapor para alimentar al destilador (Dario, 1999).



2.4 INFORMACIÓN TÉCNICA Y ARREGLOS

INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico por medio de resinas sintéticas se basa en la afinidad de ciertos polímeros ionizados por los iones disueltos en el agua, estos polímeros sintéticos “intercambian” iones localizados en los sitios activos de la matriz polimérica, iones inocuos sin efecto en la calidad del agua, por los iones disueltos en ésta. Los iones activos en la matriz polimérica de la resina regenerada pueden ser el ión hidronio H_3O^+ , para las resinas de naturaleza catiónica, o iones oxidrilo OH^- , en las resinas de naturaleza aniónica.

Una vez que la resina ha intercambiado todos los sitios iónicos activos, no posee más capacidad de remoción o intercambio y es necesaria la restitución de los centros activos, para la restitución de los centros activos o regeneración, se emplea un producto químico que posea al ión originalmente existente en la matriz polimérica. Los reactivos usualmente empleados son el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico para las resinas catiónicas y el hidróxido de sodio para las resinas aniónicas.

El proceso funciona esencialmente por fenómenos difusionales y por reacción química, siendo ésta última con base en la cinética de reacción, la que domina la eficiencia y velocidad de proceso. Como cualquier proceso químico difusional, se ve afectado por parámetros como el tiempo de contacto, la temperatura, el nivel de regeneración de la resina o cantidad de producto químico regenerante empleado por unidad de volumen de resina y el sentido de la regeneración en relación con el sentido de flujo durante el agotamiento (Nordell, 1981).



Modos de operación en el intercambio iónico en columna

En los procesos de intercambio iónico en columna se puede trabajar de dos modos distintos:

1. Las disoluciones de carga y de regeneración se introducen siempre por la parte superior de la columna (figura 1.12).

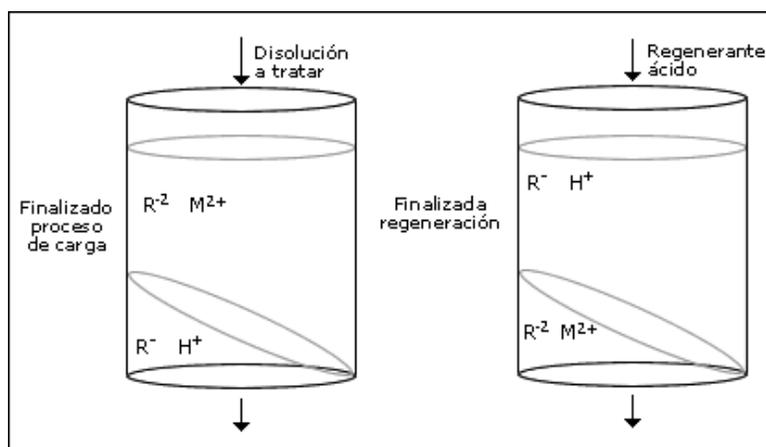


Figura 1.12. Esquematización de columna durante la carga.

2. El regenerante se introduce en dirección opuesta a la disolución de carga, es decir, por la parte inferior de la columna. Este proceso se denomina, proceso en contracorriente (figura 1.13)

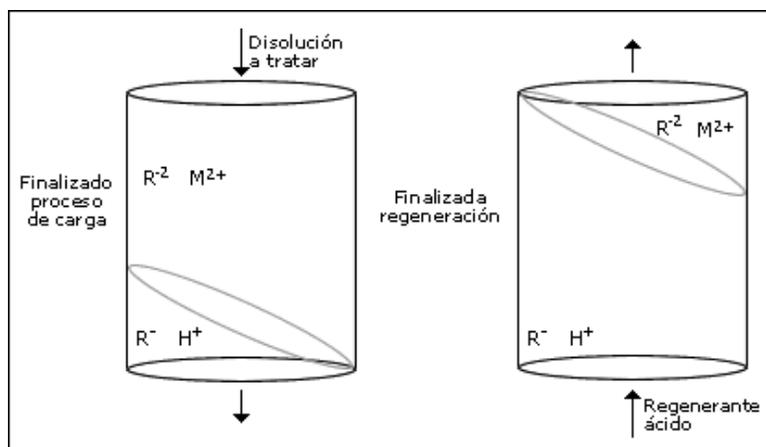


Figura 1.13. Esquematización de la regeneración de la columna.



El procedimiento habitual es el primero, ya que supone un equipamiento económico con respecto al segundo; no obstante el primer procedimiento utiliza el regenerante menos eficientemente que el proceso en contracorriente, este último hace pasar el regenerante por la parte inferior y se fluidiza el lecho del intercambiador, de manera que aumenta la superficie de contacto, haciendo que la regeneración sea más rápida y se requiera menos volumen de regenerante (Physical-Chemical, 2003).

Tipos de resinas de intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico están destinadas a varios usos, descalcificación, desnitratación, desionización. Dependiendo de la aplicación a la que se destinen existen diferentes tipos.

En la figura 1.14 se muestra detalle de las esferas de resina de intercambio iónico. El tamaño real de las esferas es superior a 0.2 mm para que no puedan pasar a través de las camas del desmineralizador, y generalmente inferior a 1 mm.

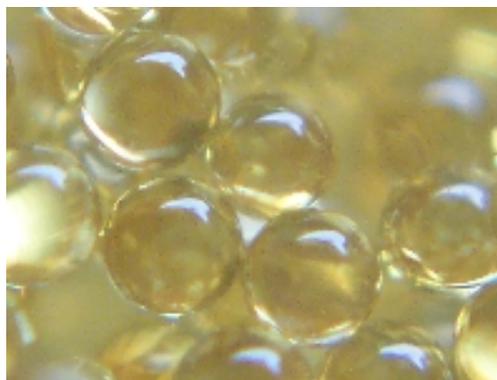


Figura 1.14. Detalle de las esferas de resina de intercambio iónico.*

Resinas catiónicas de ácido fuerte:

Es la destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como primera columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos donde elimina los



cationes del agua que necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente ácido clorhídrico (HCl).

* Imagen obtenida de <http://webs.ono.com/desmineralizadores/tipos.html>

Principales características:

- Intercambian iones positivos (cationes).
- Funcionan a cualquier pH.

Resinas catiónicas de ácido débil: Elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en las botellas cuando no cuentan con suficiente espacio en su interior. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Es habitual regenerarlas con el ácido de desecho procedente de las de ácido fuerte. En la Figura 1.15 se presenta en la parte superior una resina catiónica y en la parte inferior una resina aniónica.



Figura 1.15. Detalle de una resina combinada de intercambio catiónico – aniónica.*

Principales características:

- Tienen menor capacidad de intercambio.
- No son funcionales a pH bajos.

Resinas aniónicas de base fuerte: Intercambian iones negativos (aniones); es destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como segunda columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos, debido a que



elimina los aniones del agua y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (hidróxido sódico - NaOH). En las figuras 1.16 y 1.17 se muestran dos tipos distintos de resinas aniónicas de base fuerte.



Figura 1.16. Resina monoesfera, en donde se aprecia como el tamaño de las esferas es similar.*

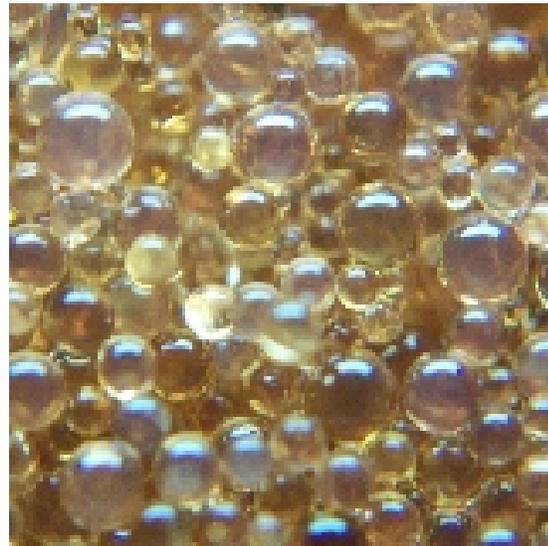


Figura 1.17. Resina no monoesférica. El tamaño de las esferas es irregular.*

Resinas aniónicas de base débil: Se trata de una resina muy eficiente, además requiere una menor cantidad de sosa para su regeneración.

Principales características:

- No se puede utilizar a pH altos.
- Pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento.

En la figura 1.18 se muestra a la izquierda resina catiónica, a la derecha resina para lecho mixto y en la parte inferior resina aniónica. Se puede observar como en la resina de lecho mixto existen diferentes tamaños y colores; mientras que las resinas aniónica y catiónica son monoesferas de color uniforme.



Figura 1.18. Tres tipos de resina.*

LECHOS EMPACADOS

La tecnología de lechos empacados está basada en el uso de resinas de intercambio iónico en lechos empacados, con este proceso se logra una alta calidad y ahorros sustanciales de agua. Esta tecnología fue iniciada hace ya más de 30 años y consiste en unidades o tanques que están empacados con lechos de resinas de intercambio iónico y los cuales por su diseño, tienen en su interior un mínimo de espacio libre.

Este tipo de sistemas consisten en una operación a contracorriente donde el flujo de servicio es en una dirección y el proceso de regeneración o reacondicionamiento de la resina es en otra dirección. El proceso en realidad no es nuevo ya que se conoce teóricamente desde la época en que se desarrollaron las resinas sintéticas de intercambio iónico y la única razón por lo que no se había usado era la dificultad en diseñar equipos de tamaño industrial que pudieran incorporar los requerimientos básicos del principio de regenerar a contracorriente.



Este tipo de proceso no requiere un retrolavado, en cada etapa en que se requiere reacondicionar, por lo que hay un gran ahorro de agua comparado con un sistema convencional.

Así mismo y durante el enjuague se tiene otro gran ahorro de agua, ya que ésta se envía a drenaje sólo por algunos minutos después de lo cual se inicia una recirculación de enjuague evitándose de esta manera un desperdicio enorme de agua.

El problema que se tenía con las resinas convencionales, entre otros, consistía en un coeficiente de uniformidad muy variable y una baja estabilidad en dichas resinas provocaban que las resinas se desgastaran generando partículas muy pequeñas, actualmente y gracias al desarrollo reciente de nuevas resinas se han superado las emisiones o fallas que se tenían en procesos convencionales logrando obtener altas eficiencias en el tratamiento por intercambio iónico. Los diferentes fabricantes de resina han diseñado y fabricado resinas de un tamaño especial con coeficientes de uniformidad mayores además de propiedades químicas y físicas especiales para poder usarse con éxito en estos tipos de proceso.

El desarrollo en los diferentes tipos de resinas obligó a que los mismos fabricantes de resinas de intercambio iónico presentaran diferentes tecnologías para el proceso de lechos empacados con regeneración a contracorriente.

Existen diversos tipos de resinas de intercambio iónico, por su funcionalidad se dividen en catiónicas y aniónicas y por su fuerza de atracción de iones en débiles y fuertes.

Las resinas fuertes se utilizan en todos los sistemas desmineralizadores que necesitan producir un agua de alta calidad (por ejemplo de baja conductividad y concentración de sílice). Las resinas débiles por otro lado se regeneran muy



fácilmente y no requieren de productos químicos de alta pureza por lo que se utilizan generalmente en combinación con las fuertes regenerándose con soluciones “gastadas” y aportando una reducción considerable en el costo de operación.

La reacción de un intercambiador de iones puede continuar hasta que los iones de los grupos funcionales de la resina se terminen, al ser reemplazados por los iones presentes en el agua que se está tratando. Cuando la unidad de intercambio ya no tiene capacidad disponible para seguir intercambiando, quiere decir que la resina se ha agotado y debe ser retornada a su estado original, por medio de una regeneración con ácido o sosa diluidos, según si la unidad de intercambio es una unidad catiónica (adsorbe los iones positivos) o aniónica (adsorbe los iones negativos).

Después de la regeneración, las sales y el exceso de sosa o ácido son arrastradas al drenaje durante una etapa de desplazamiento, donde el volumen de agua actúa como un pistón. Al final se efectúa un enjuague, lavando la resina hasta que la conductividad baja a su nivel de servicio, con lo cual se termina la secuencia de regeneración.

Una característica importante de un lecho empacado es que tiene una capa pulidora, como volumen de resina de seguridad para evitar fugas. Así, el lecho debe mantenerse estratificado y sin mezclarse para no desordenar esta capa pulidora y contaminarla con resina ya agotada, lo que provocaría fugas elevadas de iones.

Actualmente está bien establecido el concepto de sistemas de tratamiento de agua en flujo invertido para intercambio iónico con flujo ascendente de carga y regeneración de flujo descendente. Esto ha llevado al desarrollo de sistemas que



permiten la alta eficiencia del tratamiento de agua por intercambio iónico por absorción.

Existen resinas que son retrolavables haciéndolo un sistema único. Los sistemas de contraflujo tradicional usando retenedor de aire o agua se puede incluso ser retrolavada pero los diseños son malgastados en espacio o agua, a veces en ambos casos. Los sistemas de cama empaquetada son compactos sin desperdiciar espacio, pero son frecuentemente difíciles o imposibles de retrolavar apropiadamente. Se han desarrollado sistemas en los que no hay desperdicio de espacio o agua aunque la resina es usada como una cama empacada, su diseño permite el retrolavado de la resina cuando se requiera.

La Figura 1.8 consiste en un número variable de cámaras de recipientes de intercambio iónico sencillas o múltiples con colector/distribuidor superior e inferior, y una o dos columnas auxiliares para retrolavado de resina. Porque los sólidos suspendidos tienden a acumularse en la parte inferior de la cama y la resina fina en la parte superior, solamente las cantidades fraccionables de las cargas de resina necesitan ser retrolavadas ocasionalmente.

Ha sido diseñado un rango de resinas de intercambio iónico en medidas de partículas especiales para su uso en el sistema.

El sistema tiene las ventajas de las técnicas de contraflujo, con carga de flujo ascendente y regeneración de flujo descendente, usando una cama de resina compacta estacionaria. Además, permite remover las porciones de resina para la limpieza mecánica por medio del retrolavado cuando sea necesario sin interrumpir el ciclo de operación.

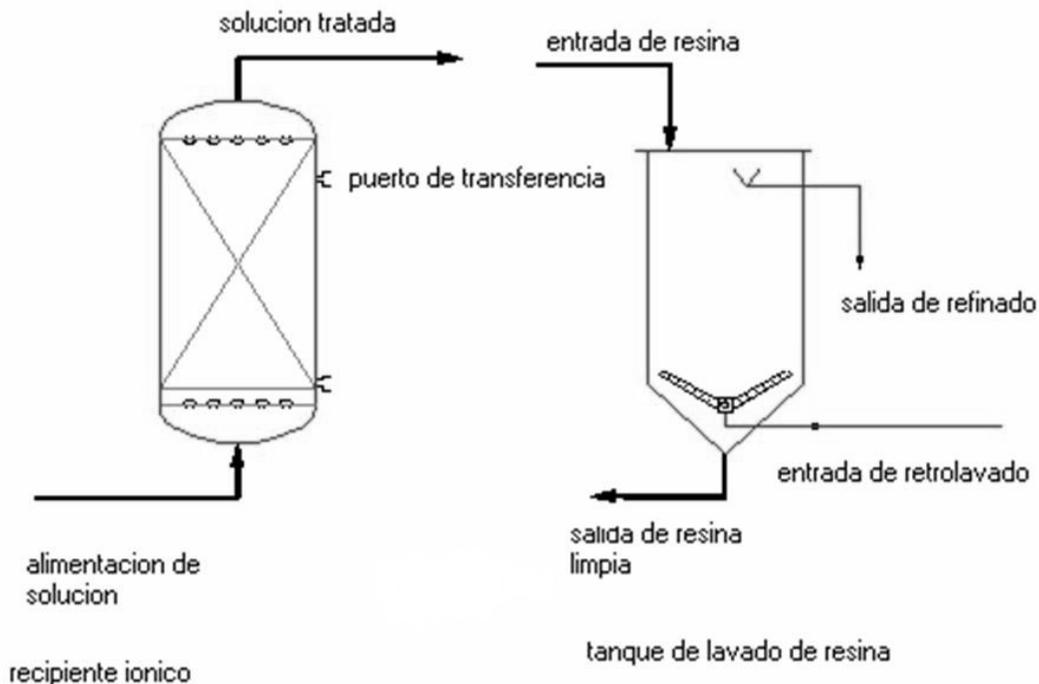


Figura 1.19. Sistema de retrolavado.

Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa es un proceso esencialmente físico para la desmineralización parcial del agua. El principio de funcionamiento reside en la resistencia de ciertas membranas semipermeables al paso de iones y partículas a nivel molecular. En este proceso, el agua es forzada a atravesar la membrana semipermeable mientras que esta última rechaza los sólidos disueltos. Esta tecnología se ha empleado con mucho éxito en el tratamiento de agua de mar para producción de agua potable y en aguas de tipo salobre. Igualmente, el desarrollo tecnológico ha permitido mayor competitividad en aplicaciones de salinidad intermedia. La ósmosis inversa puede producir agua desmineralizada en el orden de $15 \mu\text{S}/\text{cm}$ y por lo tanto siempre se le considera como una desmineralización parcial. Para aplicaciones que requieran conductividad menor, siempre se acompaña de otro proceso como el intercambio iónico o electrodiálisis.

Al ser un proceso físico, la ósmosis inversa enfrenta cuatro problemas principales



- La existencia de sólidos suspendidos.
- La presencia de materia orgánica.
- Presencia de cationes productores de sales insolubles o poco solubles.
- La presencia de sílice soluble y coloidal.

Durante las últimas cuatro décadas la tecnología de la ósmosis inversa ha resultado un importante método de separación de sólidos. El éxito de operación duradera de un sistema de RO (por sus siglas en inglés), depende en tres factores: pretratamiento adecuado; diseño adecuado del sistema: y atención a la operación y mantenimiento.

Todos estos factores son importantes, pero el pretratamiento adecuado es el cimiento básico en que se sostiene el éxito. Si éste no es adecuado ó falla, la mayoría de los sistemas de RO se verán afectados en sus resultados.

La RO es la interpretación más simple de una *filtración de flujo cruzado* capaz de eliminar hacia fuera los sólidos disueltos así como mayores compuestos como orgánicos, metales pesados y partículas coloidales. Un filtro de flujo cruzado es aquel en que el líquido que se desea filtrar pasa continuamente sobre la superficie del filtro, el filtrado pasa a través de la superficie filtrante mientras las impurezas van transversalmente a la superficie del medio filtrante, volviéndose cada vez más concentradas y saliendo finalmente en flujo de desecho muy concentrado. Idealmente las impurezas son eliminadas en ese flujo en lugar de concentrarse sobre la superficie filtrante.

Para aumentar la eficiencia y la vida de un sistema de RO un pretratamiento efectivo del agua de alimentación es absolutamente necesario y la selección del mismo requiere vigilar y minimizar los siguientes motivos que pueden afectar la eficiencia así como la vida útil de la membrana: contaminación, incrustación y



degradación de la membrana. El resultado neto de un pretratamiento adecuado es la optimización del proceso.

La complejidad de un sistema de Pretratamiento requerido, depende de la calidad del agua en la alimentación. En nuestro país y específicamente en el caso de la Refinería “Miguel Hidalgo”, las aguas de suministro contienen altas cantidades de sílice con el agravante de contener así mismo cantidades altas de calcio y magnesio, lo que significa que con un sistema de RO es necesario concentrar a una producción de 55 % del agua de alimentación, lo que motiva que grandes volúmenes de agua se tengan que enviar al drenaje; hay que tomar en cuenta que lo que se busca es disminuir los consumos de agua y aumentar la eficiencia en los procesos.

Tabla 1.5. Pretratamiento para el proceso de ósmosis inversa.

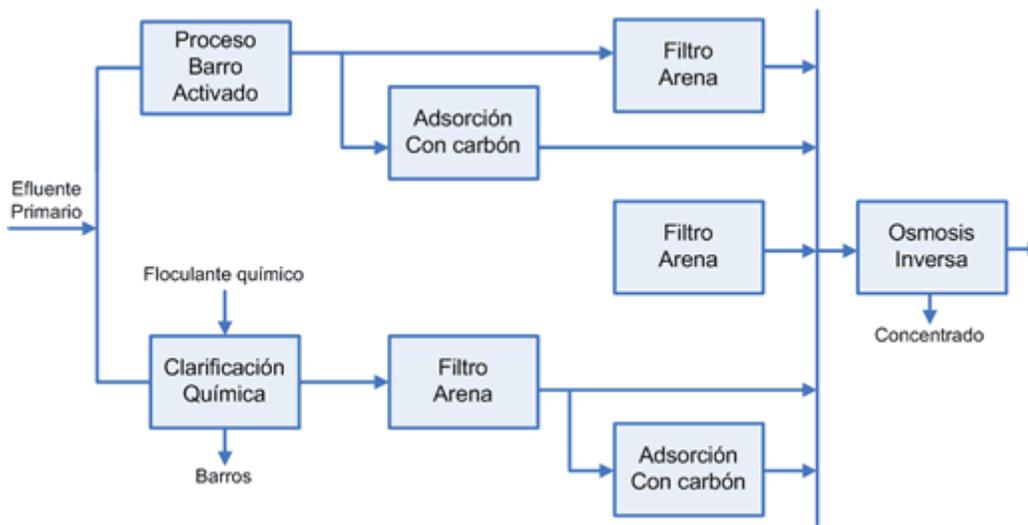
PROBLEMA	SOLUCIÓN PROPUESTA
Turbidez	Filtros de arena con Floculación en línea. Produce agua de desecho contaminada con productos químicos (los floculantes)
Dureza Total Carbonatada	Pretratada con resinas de IX en ciclo H ⁺ Esto produce CO ₂ y un pH bastante ácido.
Del paso anterior se tiene un Alto contenido de CO ₂ y pH ácido	Incluir un sistema Desgasificador con Ventiladores, Bombas, Tubería, Válvulas y Controles.
Sistemas Automáticos de control del pH , y se requiere una alta dosificación de Sosa para elevar subir y controlar el pH en un rango de: 10 a 10.5	El problema de esta dosificación y control se muestra inmediatamente al final de esta tabla.

Para finalizar esta evaluación del proceso de RO es necesario señalar que la calidad del agua producto que se obtiene al final de esta parte, NO CUMPLE con los requerimientos del agua de alimentación para las calderas, por lo tanto es necesario incluir un proceso de camas mixtas ó pulidores.



Ósmosis para Tratamiento de Efluentes

Los tratamientos primarios y secundarios de los efluentes municipales reducen la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos. Estos tratamientos, sin embargo, no eliminan algunas sustancias solubles -inorgánicas u orgánicas- tales como nitratos, fosfatos y sustancias no biodegradables. La ósmosis inversa puede, efectivamente, reemplazar los tratamientos terciarios y, algunas veces, los secundarios, ofreciendo un medio simple para recuperar el agua de efluentes a una calidad prácticamente utilizable para muchos requerimientos.



En la Tabla se pueden observar datos de un sistema de ósmosis inversa usado para tratar el efluente de una planta de barros activados. La demanda química de oxígeno (DQO) era de 42 ppm; la misma, considerada en el producto de ósmosis, fue menor que 2 ppm. Dicho efluente procesado a través de un lecho de carbón activado convencional, fue reducido solamente a 12 ppm.

Usos de membranas de Osmosis inversa

- Abastecimiento de agua potable



Tabla 1.6. Análisis del Agua de Alimentación y Producto de la Localidad de Ocean Reef, Florida, EE.UU.

Constituyente	Alimentación (ppm)	Concentrado (ppm)	Producto (ppm)
Ca ⁺⁺	200	340	2,9
Mg ⁺⁺	170	304	3,1
Na ⁺	1920	3200	145
K ⁺	85	138	11
HCO ₃ ⁻	220	92	7,4
SO ₄ ⁻	752	1448	5,4
Cl ⁻	3200	5400	242
NO ₃ ⁻	0,09	0,31	0,009
F ⁻	1,5	2,8	0,3
SiO ₃ ⁻	10	2	1
Fe ⁺⁺	1,2	1,8	0,05
STD	6604	9600	395

Tabla 1.7. Costos Aproximados de Inversión y Operación de Sistemas de Ósmosis Inversa

		Costos de Operación (\$/m ³ producidos)*			
Capacidad	Costos de inversión	Energía	Químicos	Reposición	Total
(m ³ /h)	(miles de \$)			Membranas	
2	7.4	34	10	40	84
10	38	25	10	30	65
100	300	20	7	25	52

Abastecimientos de Aguas para usos Industriales

En los últimos diez años, debido al creciente desarrollo industrial, se está produciendo un alarmante deterioro de los recursos hídricos disponibles (en su gran parte subterráneos). Este deterioro se traduce en un agotamiento del medio utilizado que obliga a recurrir a fuentes hasta el momento no consideradas como de uso posible. Como ejemplo, podemos citar zonas del Gran Bs. As., Tales como los partidos de San Fernando, La Matanza, Quilmes, Berazategui, etc., donde las industrias de la zona están planteándose la necesidad de recurrir a los acuíferos más profundos, de alto contenido salino (mayor de 2000 ppm de STD). Por las mismas razones, muchas industrias se enfrentan a una creciente y, por lo tanto,



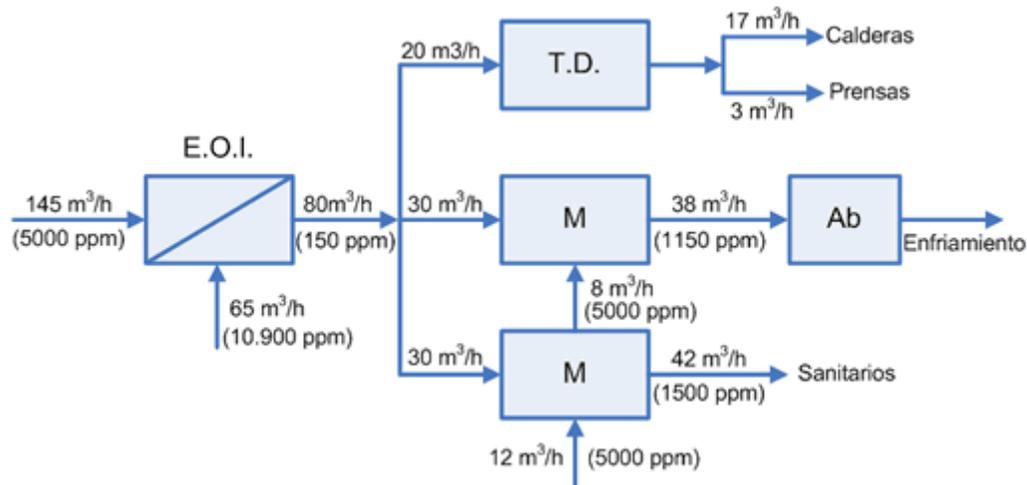
alarmante contaminación salina de las aguas utilizadas, lo que representa un aumento importante en los costos de operación.

Una exitosa solución a este problema ha sido, en otros países, el uso de las técnicas de Ósmosis Inversa como complemento o parte única en el tratamiento de aguas para calderas, circuitos de enfriamiento, procesos, sanitarios, etc.

La Ósmosis Inversa, sin ser la más acabada solución al problema, ofrece probados y satisfactorios beneficios técnico-económicos en la aplicación industrial.

Como ejemplo, se puede citar el caso de una importante industria del Gran Buenos Aires, que en los últimos años vio agravado su abastecimiento de agua por un irreversible crecimiento salino (de 600 ppm a 3000-4000 ppm STD). Esta situación, además de elevar considerablemente los costos operativos de sus sistemas tradicionales, llegó a poner en peligro la producción. Ante la gravedad del problema, las autoridades de la empresa se plantearon seriamente la necesidad de encontrar una urgente solución. Las alternativas planteadas fueron dos: construir un acueducto de un recurso superficial cercano, o instalar un sistema de ósmosis inversa. La decisión se inclinó hacia la segunda alternativa, por presentar las siguientes ventajas:

- Menor inversión inicial y posibilidad de realizar la misma en forma escalonada, debido al carácter modular de la técnica.
- Costos operativos competitivos (se debe aclarar que la paridad de los costos se daba en esta oportunidad por tratarse de un acueducto de escasa extensión).



La figura muestra una alternativa de cómo sería utilizado el sistema en el caso mencionado. La misma muestra la posibilidad del mezclado de aguas de distinta calidad y el uso de los equipos preexistentes. (T.D., Torre Descarbonatadora - M, Mezclador - Ab, Ablandador).

La técnica más comúnmente utilizada en el tratamiento de aguas para uso industrial, es el intercambio iónico. En muchos casos, la capacidad de los equipos intercambiadores ha disminuido a casi la mitad, debido a un aumento de los sólidos totales disueltos en el agua a tratar, a la degradación o ensuciamiento de las resinas o a la combinación de ambos factores. Conjuntamente con la disminución de la capacidad, se da el aumento de los costos de los regenerantes químicos (especialmente, los ácidos y la sosa cáustica) y el aumento de la dosificación de los mismos para aumentar la calidad del agua.

El uso de equipos de Ósmosis Inversa como pretratamiento de los sistemas de intercambio o, en algunos casos, como único tratamiento, se ha generalizado en todo el mundo debido a una serie de ventajas como las que se describen a continuación:

- Disminución apreciable de los costos operativos, fundamentalmente por la disminución de regenerantes químicos (hasta el 80%) y mano de obra.



- Mejoramiento de la calidad del agua producto, cabe señalar que combinado con desmineralizadores, se utiliza en la producción de agua ultrapura.
- Prolongación de la vida útil de las resinas de intercambio por la eliminación de los sólidos orgánicos disueltos y en suspensión.
- Disminución del tamaño de los equipos convencionales.
- Reducción del contenido de sílice.

Tabla 1.8. Análisis del Agua Tratada y Producida por el Sistema de Ósmosis Inversa

	Alimentación	Producto
pH	5	6
Conductividad (m-omhs)	1900	120
Cloruros ppm	485	38
Sulfatos ppm	798	28
Dureza ppm	430	16
Sílice ppm	0,93	0,12
Sólidos totales disueltos ppm	1279	70

Costos Comparativos de Operación

1.- Sin Ósmosis Inversa	
Pretratamiento	1,47 U\$/m ³ Producido
Desmineralizador catiónico-aniónico (150 m ³ entre regeneraciones)	
Desmineralizador lecho mixto	
2.- Con Ósmosis Inversa (Membranas Iniciales)	
Pretratamiento	0,44 U\$/m ³ Producido
Ósmosis Inversa (energía, químicos y reemplazo de membranas)	
Desmineralizador catiónico-aniónico (750 m ³ entre regeneraciones)	
Desmineralizador Lecho Mixto	
3.- Con Ósmosis Inversa (Nuevas Membranas)	
Pretratamiento	0,21 U\$/m ³ Producido
Ósmosis Inversa	
Desmineralizador catiónico-aniónico (3700 m ³ entre regeneraciones)	
Desmineralizador Lecho Mixto	



En la actualidad, la unidad industrial más grande (13.000 m³/día) se encuentra instalada en Sumitomo Metal Industries, en Kashima, Japón. Esta unidad procesa agua de reposición de calderas y funciona con elementos Roga de 4 pulgadas de diámetro. Actualmente, se fabrican elementos de 8 y 12 pulgadas que permiten unidades más compactas y, por lo tanto, menores costos de inversión y operación. Asimismo, el uso de la Ósmosis Inversa en aquellas industrias que requieren agua ultrapura (electrónica, farmacéutica, etc.), tiene una amplia aceptación debido al mejoramiento de la calidad del agua y a la disminución de los costos.

Electrodesionización

Esta nueva tecnología es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico. En el Anexo 3 se da una explicación más amplia de este proceso.

El proceso de electrodesionización se descarta en este estudio, debido a los siguientes puntos:

1.-No se puede usar para aguas de dureza superior a 1 ppm, ya que el carbonato de calcio crearía una costra en la cámara del concentrado, limitando la operación.

2.-La concentración de la sílice es de 66 ppm indicando que es alta para este proceso, durante la operación se aumentan los ciclos de concentración de la sílice provocando la precipitación de la misma, lo anterior provoca incrustación en el equipo.



3.- Requiere de la combinación con la ósmosis inversa como pretratamiento, elimina más del 99.9% de los iones del agua.



3. ASPECTOS TECNICOS DE TECNOLOGIAS MODERNAS DE DESMINERALIZACION DE AGUA

3.1. INTERCAMBIO IÓNICO.

El intercambio iónico por medio de resinas sintéticas es el más antiguo y probado de los métodos actualmente en uso. El principio de funcionamiento se basa en la afinidad de ciertos polímeros ionizados por los iones disueltos en el agua; los polímeros sintéticos “intercambian” iones localizados en los sitios activos de la matriz polimérica, iones inocuos sin efecto en la calidad del agua, por los iones disueltos en ésta. Los iones activos en la matriz polimérica de la resina regenerada pueden ser el ión hidronio H_3O^+ , para las resinas de naturaleza catiónica, o iones oxidrilo OH^- , en las resinas de naturaleza aniónica.

Una vez que la resina ha intercambiado todos los sitios iónicos activos, no posee más capacidad de remoción o intercambio y es necesaria la restitución de los centros activos. Para la restitución de los centros activos o regeneración, se emplea un producto químico que posea al ión originalmente existente en la matriz polimérica. Los reactivos usualmente empleados son el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico para las resinas catiónicas y el hidróxido de sodio para las resinas aniónicas.

El proceso funciona esencialmente por fenómenos difusionales y por reacción química, siendo esta última y, la cinética de reacción, las que dominan la eficiencia y velocidad de proceso.

Como cualquier proceso químico difusional, se ve afectado por parámetros como el tiempo de contacto, la temperatura, el nivel de regeneración de la resina o cantidad de producto químico regenerante empleado por unidad de volumen de resina y el sentido de la regeneración en relación con el sentido de flujo durante el



agotamiento. Las ventajas y desventajas de esta tecnología se muestran en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9. Ventajas y desventajas de la desmineralización por intercambio iónico

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none">• Aplicación a varios usos, como: descalcificación, desionización, desnitratación.• El tamaño de partícula de 0.1 – 0.2	<ul style="list-style-type: none">• Se requiere una resina específica• Se requieren químicos para regeneración de resinas.• Capacidad de intercambio variable• Costo de mantenimiento

3.2. ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es un proceso de desmineralización parcial del agua ya que no elimina todas las sales contenidas en el agua, pero sí es capaz de reducir considerablemente los iones que contiene, las bacterias, los virus y compuestos orgánicos. El principio de funcionamiento reside en la resistencia de ciertas membranas semipermeables al paso de iones y partículas a nivel molecular. En este proceso, el agua es forzada a atravesar la membrana semipermeable mientras que esta última rechaza los sólidos disueltos.

Esta tecnología se ha empleado con mucho éxito en el tratamiento de agua de mar para producción de agua potable y en aguas de tipo salobre. Igualmente, el desarrollo tecnológico ha permitido mayor competitividad en aplicaciones de salinidad intermedia.

La ósmosis inversa es capaz de eliminar aproximadamente:

- Más del 95% de compuestos orgánicos y pesticidas.



- Más de 90% sales disueltas como el sodio, calcio, carbonatos, arsénico, bicarbonatos, magnesio, aluminio, fosfatos, flúor, cianuro, sulfato, cobre, níquel, zinc, plata, bario, radio y cloro.
- Entre el 70% y 80% de los nitratos.
- Entre el 55% y 65% del boro.

La ósmosis inversa puede producir agua desmineralizada en el orden de 15 $\mu\text{mhs}/\text{cm}^2$ y por lo tanto siempre se le considera como una desmineralización parcial. Para aplicaciones que requieran conductividad menor, siempre se acompaña de otro proceso como el intercambio iónico, o la electrodesionización.

La ósmosis inversa enfrenta tres problemas principales

- La existencia de sólidos suspendidos.
- La presencia de materia orgánica.
- Presencia de cationes productores de sales insolubles o poco solubles.
- La presencia de sílice soluble y coloidal.

En alimentación para caldera de alta presión el vapor necesita agua de alta calidad. Para producir agua con requisitos específicos, un sistema de RO adicional a otro proceso es necesario.

(Praptowldodo, 2000)

En la Tabla 1.10 se muestran las ventajas y desventajas de esta tecnología:

Tabla 1.10. Ventajas y desventajas de la desmineralización por ósmosis inversa

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Ósmosis Inversa	<ul style="list-style-type: none"> • Puede remover sólidos disueltos. • Puede desinfectar agua tratada. • Puede remover algunos compuestos nitrogenados y 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología costosa en comparación con tratamientos convencionales. • Requiere generalmente de un pretratamiento o de un agua con bajo contenido de sólidos. • Falta de métodos fiables de bajo



Tecnología	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • orgánicos. • Puede remover materia orgánica e inorgánica. • No requiere adición de químicos. • Rango de flujo tratado de 1,500 – 110, 000 GPD. • Operación y mantenimientos sencillos. • Separa sustancias de bajo peso molecular. 	<ul style="list-style-type: none"> • costo para monitoreo. • Puede requerir de un manejo de residuos y disposición de concentrados. • Pérdida del 25 % del agua de alimentación en forma de salmuera. • Requiere de una calidad de agua aceptable, (baja dureza). • Recuperación < 80 % • Costo de mantenimiento.

Usar los dispositivos de membrana y electrodiálisis en los sistemas de acondicionamiento del agua para ablandamiento y desalación, permite no solamente la reducción de los gastos de explotación actuales para el tratamiento de aguas, también permite lograr un nivel más alto de automatización (Slesarenko, 2003). Después de las operaciones de un solo RO o de NF+RO, el agua se podía reutilizar en el reemplazo para la limpieza, la calefacción o para equipos de enfriamiento y para agua de alimentación a caldera (Mickael, 2005).

La RO de dos etapas tiene las características más favorables para la economía desde el punto de vista de reducir costos, el capital específico y la fracción de la recuperación, además de tener un buen funcionamiento. La hibridación de los procesos de RO y de MSF daría lugar a mayores ventajas económicas sobre las plantas convencionales de MSF (Helal, 2004).

3.3 ELECTRODIÁLISIS

El principio de la electrodiálisis es la purificación del agua en una cubeta que contiene dos tipos de membranas selectivas de iones (permeables a cationes y aniones) y situadas entre un par de electrodos. Cuando se aplica un potencial eléctrico directo a través de la cubeta, los cationes del agua se envían hacia el cátodo cargado positivamente. Los cationes pueden pasar por la membrana permeable a los cationes, pero no por la permeable a los aniones. De igual forma, los aniones pueden pasar por la membrana permeable a los aniones, pero no por



la permeable a los cationes. El resultado neto es el movimiento de iones entre las cámaras, y el agua en una sección puede desionizarse mientras que en la otra sección el agua está más concentrada.

En la práctica, la electrodiálisis sólo se puede utilizar de forma rentable para producir agua de una conductividad relativamente alta (200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o más) debido a los voltajes eléctricos prohibitivamente altos que son necesarios para impulsar los iones a través de un agua cada vez de mayor pureza.

El proceso de electrodiálisis está en etapa de evaluación por el volumen que se pretende manejar. Aunque se puede descartar por los valores de dureza (situación a evaluar); en el Anexo I se da una explicación más amplia de estos procesos. Las ventajas y desventajas de esta tecnología se muestran en la Tabla 1.11.

Tabla 1.11. Ventajas y desventajas de la desmineralización por electrodiálisis

Tecnología	Ventajas	Desventajas
ELECTRODIÁLISIS	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de químicos de regeneración es eliminado. • Operación simple y continua. • Operación y mantenimiento económicos. • Poco espacio requerido. • Produce calidad constante de agua sin fluctuaciones de flujo. • No contamina, seguro y fiable. • Elimina las partículas inorgánicas disueltas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El voltaje requerido puede ser muy alto a mayor calidad requerida. • No usa agua de dureza superior a 1 ppm, el carbonato de calcio crearía una costra en la cámara del concentrado. • Necesita Purificación previa.

La electrodiálisis convencional (ED) es un método de la separación que se utiliza el intercambio catiónico (CEM) y el intercambio aniónico (AEM) con membranas que son permeables a las especies catiónica y a aniónica respectivamente.



Recientemente el ED ha ganado la atención debido a sus usos potenciales atractivos como modificación, separación y técnica purificación (Ayala.2007).

La electrodiálisis es limitada por un umbral de la conductividad en la solución diluida, debajo de la cual el procedimiento es más ineficiente (Goffin,2000).

3.4. ELECTRODESIONIZACIÓN

La electrodesionización es un proceso de purificación activado eléctricamente e incluye una combinación de resinas de intercambio iónico y membranas selectivas de iones. La electrodesionización, que normalmente se combina con la ósmosis inversa, ofrece una alternativa útil a otros métodos de desmineralización de agua.

Esta nueva tecnología es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico.

La tecnología de electrodesionización “rellena” los espacios entre las membranas con resinas de intercambio iónico. Las resinas proporcionan un flujo conductivo para el transporte de iones, lo que permite que la desionización sea prácticamente completa, produciendo agua de alta pureza. Una ventaja adicional de la electrodesionización es que la electrólisis continua del agua que ocurre en la cubeta produce iones hidrógeno e hidróxilo. Estos iones mantienen las resinas en un estado muy regenerado, evitando la realización de una reactivación química. Las resinas utilizadas en sistemas de electrodesionización pueden ser cámaras separadas de perlas de aniones o cationes, capas de cada tipo en una sola



cámara o una mezcla de perlas de aniones y cationes. En la siguiente Tabla se muestran las ventajas y desventajas de esta tecnología:

Tabla 1.12. Ventajas y desventajas de la desmineralización por electrodesionización

Tecnología	Ventajas	Desventajas
ELECTRODESIONIZACION	<ul style="list-style-type: none"> • En combinación con la ósmosis inversa como pretratamiento, puede eliminar más del 99.9% de los sólidos disueltos. • Se evita constante regeneración de resinas. • Operación y mantenimiento sencillos. • Ocupa poco espacio. • Produce calidad constante de agua sin fluctuaciones de flujo. • No contamina. • Elimina las partículas inorgánicas disueltas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología no ampliamente probada a nivel industrial. • Costosa en comparación con tecnologías más convencionales. • Requiere de un pretratamiento previo.

EDI tiene una capacidad excelente de quitar el silicio y el boro del agua ultrapura. Cuando la concentración de SiO₂ en agua de alimentación es 1.00mg/L, la concentración del silicio en el agua del producto puede ser 2.66µg/L; cuando la concentración del boro en el agua de alimentación es 0.05mg/L, la concentración del boro en el agua del producto es de solamente 0.88 µg /L (Wen, 2005).

3.5 EVAPORACIÓN

Debido al rápido desarrollo del arte de acondicionar aguas, es ahora posible remover prácticamente todos los sólidos disueltos contenidos en el agua por materiales de intercambio iónico, produciendo en esta forma agua igual o mejor que la obtenible de los evaporadores más eficientes. Un buen número de estaciones de vapor de alta presión ha adoptado este medio para la evaporación de agua para repuesto y algunas han eliminado los evaporadores, substituyéndolos por un proceso de desmineralización



Tabla 1.13. Ventajas y desventajas de la desmineralización por evaporación.

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
EVAPORACIÓN	<ul style="list-style-type: none">• No existen reacciones químicas.• No requiere de operación y supervisión meticulosa.• Gastos de explotación bajos cuando el calor inútil se utiliza para el proceso destilador.• La calidad del agua de alimentación no es tan importante como para un sistema de ósmosis inversa.• El sistema flash de efectos múltiples puede utilizar el agua caliente en vez del vapor para proceso destilador.• La temperatura del agua caliente es menos afectada por los cambios en la carga del generador de la planta.	<ul style="list-style-type: none">• Costosa en comparación con tecnologías convencionales.• Requiere de un pretratamiento previo.• Altos costos de explotación cuando el calor inútil no está disponible para el proceso destilador.• El sistema flash de efectos múltiples funciona con temperaturas altas que aumentan la corrosión.

Es un hecho bien conocido que la producción de ácido sulfúrico es un proceso altamente exotérmico. En ese sentido, combinado con el costo energético creciente, asombrosamente poco calor se recupera del proceso. Un uso muy interesante de este calor es para la producción del agua dulce por la desalación del mar o del agua salobre (Lovato, 2001).

Con los recursos de agua limitados, la recuperación de las aguas residuales para el agua industrial. El costo de producción del agua ultrapura para el agua de alimentación para calderas de alta presión es una alternativa viable (Chin, 1996).

Una nueva generación de esquemas MSF y RO de desalación se están convirtiendo en una alternativa atractiva a los sistemas convencionales, la incorporación de estos esquemas de cogeneración pueden proporcionar una mejora operacional, económica y ambiental (Sergei, 2003).



4. CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo por objetivo presentar los avances más recientes en lo que se refiere a tecnologías de desmineralización de agua para producción de vapor de alta presión. De la revisión de diversos documentos técnicos impresos y en formato electrónico se obtuvo información sobre los fundamentos y aplicaciones de las tecnologías más importantes de desmineralización de agua. Han quedado atrás las tecnologías basadas en procesos de precipitación química, las tendencias mundiales se refieren al uso de materiales de intercambio iónico, membranas semipermeables y combinaciones de ellos; además de que ahora son cada vez más competitivos, desde el punto de vista económico, los sistemas de evaporación de agua.

La tecnología de lechos empacados de resinas de intercambio iónico logra una alta calidad y ahorros sustanciales de agua. Esta tecnología consiste en unidades o tanques que están empacados con lechos de resinas de intercambio iónico y los cuales por su diseño, tienen en su interior un mínimo de espacio libre.

Este tipo de sistemas consisten en una operación a contracorriente donde el flujo de servicio es en una dirección y el proceso de regeneración o reacondicionamiento de la resina es en otra dirección. Evitando así el apelmazamiento de las resinas, ya que este hace que el flujo sea menor y por lo tanto el intercambio sea deficiente.

El uso de la evaporación tiene una relación producto-energía alta, pero el problema se ha reducido gracias a los equipos de efecto múltiple, la recuperación del calor de las corrientes industriales para la destilación del agua de mar es una de las maneras más eficaces para reducir el costo de la desalación. Existen varios casos de recuperación de corrientes relativamente “calientes” tales como el



extractor de un motor térmico o del agua de enfriamiento de un proceso para la producción del vapor para alimentar al destilador.

En un sistema de evaporación de etapas múltiples se puede tener arrastre de sales en temporada de invierno debido a la baja de temperatura.

La electrodiálisis con membrana de ultrafiltración (EDUF) es una nueva técnica de membrana que fue desarrollada para fraccionar moléculas valiosas de las materias con base complejas en base a su carga eléctrica. Se utiliza una célula convencional de electrodiálisis, en la cual se substituyen algunas membranas de intercambio iónico por ultrafiltración para poder separarse los compuestos de pesos moleculares más altos.

Presenta buen funcionamiento para el retiro de la sal y del fluoruro del agua salobre. Sin embargo el costo de operación es factor limitante para el tratamiento de agua con un alto contenido del fluoruro.

La filtración de membrana por osmosis inversa tiene bastantes ventajas frente a las técnicas existentes de purificación de agua; es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura, por lo que permite el tratamiento de los materiales sensibles al calor.

Es un proceso de bajo costo energético, la mayor parte de la energía se utiliza para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación. El proceso puede ser fácilmente ampliado. Una desventaja es que provoca un mayor gasto en el mantenimiento de las membranas debido a la obstrucción y contaminación de éstas.

La electrodesionización es un proceso de purificación activado eléctricamente e incluye una combinación de resinas de intercambio iónico, resultando en un



proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua, a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico, resultando esto muy útil para la remoción de metales pesados.

Para seleccionar el mejor método de desmineralización, es necesario considerar la capacidad de la planta, la salinidad del agua de alimentación y requisitos de la calidad del producto. Cuando el agua de alimentación tiene un contenido de minerales medio o alto y la capacidad de la planta de tratamiento de agua es grande, entonces es ventajoso instalar tecnología de RO (ósmosis inversa). Cuando el agua de alimentación tiene un contenido de minerales bajo, la capacidad de la planta es pequeña y el agua del producto no necesita tener conductividad baja y STD bajo, es ventajoso instalar tecnología de IE (intercambio iónico). La desmineralización del IE no es buena en todo caso debido al alto consumo de los productos químicos para la regeneración.

El futuro de la desmineralización del agua pertenece probablemente a la combinación de RO y de EDI donde el costo y el consumo de productos químicos se reducen a un mínimo. EDI, que combina las ventajas de la electrodiálisis y de las resinas de IE, puede, conjuntamente con el RO, producir el agua ultra-pura de alta calidad.



ANEXO 1
PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA



PARAMETROS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Hay una serie de parámetros en el agua que intervienen no sólo en la calidad de la misma sino en el mantenimiento de la instalación:

pH

El pH está relacionado con la concentración de protones en el agua. Se define el pH como:

$$pH = -\log[H^+]$$

El agua se encuentra disociada en iones hidroxilo (OH^-) y protones (H^+). El producto de la concentración de estas especies está relacionado por una constante de equilibrio K_w :

$$[H^+][OH^-] = K_w = 10^{-14}$$

En una situación de neutralidad la concentración de H^+ será igual que la concentración de OH^- por lo que podremos expresar la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$[H^+]^2 = 10^{-14}$$

$$[H^+] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}$$

Si multiplicamos por -1 a cada lado de la ecuación y tomamos logaritmos tendremos:

$$-\log[H^+] = -\log(10^{-7}) = 7$$

Y por la definición de pH tendremos que en condiciones neutras el pH es 7, de la misma forma cuando el agua esté totalmente disociada en protones el pH tendrá un valor máximo igual a 14 y será 0 cuando esté totalmente disociada en OH^- . El agua con un pH menor de 7 se dice que es un agua ácida y en cambio se dice que es básica si tiene un pH mayor que 7.



DUREZA

La dureza representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos en el agua, fundamentalmente Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) provenientes de la disolución de rocas y minerales que será tanto mayor cuanto más elevada sea la acidez del agua y se puede considerar una medida del estado de mineralización del agua.

Se expresa como mg/L de CaCO_3 o como grados franceses, teniendo en cuenta que 10 mg/L equivale a un grado francés.

En función de este estado de mineralización, podemos distinguir distintos tipos de aguas:

Tabla 1.14. Tipos de agua

Clasificación	Dureza (mg CaCO_3)
Blandas	0 - 100
Moderadamente duras	101 - 200
Duras	200 - 300
Muy duras	> 300

ALCALINIDAD

La alcalinidad del agua es la suma de las concentraciones de los iones carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-) siendo estos últimos despreciables frente al resto.

$$TAC = [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-]$$

Estas especies producen en el agua un efecto tampón ya que absorben protones manteniendo el pH en un valor muy estable. Esta propiedad es muy importante para los seres vivos en determinados medios como el flujo sanguíneo ya que



mantienen el valor de pH a un valor muy constante y estable frente a posibles variaciones en el medio.

ÍNDICE DE LANGELIER

Se establece para una temperatura determinada y mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo. Se define teóricamente como:

$$LSI = pH - pH_s$$

En base a los valores de LSI, si se tiene un valor negativo se tratará de un agua con tendencia corrosiva, tendencia tanto mayor cuanto menos sea el LSI; en cambio para valores de LSI positivos el agua tendrá una tendencia incrustante provocando la deposición de carbonato de calcio. Es por ello importante en instalaciones industriales y piscinas trabajar a un LSI próximo a 0 para unas óptimas condiciones de mantenimiento.

El valor de LSI se calcula experimentalmente en el laboratorio, sin embargo puede hacerse una aproximación bastante buena aplicando la siguiente fórmula:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D)$$
$$A = \frac{1}{10} \cdot (\log[TDS] - 1)$$
$$B = -13,12 \cdot \log(T(^{\circ}C) + 273) + 34,55$$
$$C = \log[TH] - 0,4$$
$$D = \log[TAC]$$

Siendo TDS los mg/L de sólidos disueltos; T, la temperatura en ° C; TH la dureza expresada en mg/ L de CaCO₃; y finalmente TAC, la alcalinidad también en mg/ L de CaCO₃.



CONDUCTIVIDAD

La conductividad es una medida de la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica y está relacionada por un parámetro llamado fuerza iónica que viene determinado por la concentración y la carga de cada ión presente en el agua.

$$\mu = 1/2 \sum C_i \times Z_i^2$$

Los valores de conductividad vienen expresados normalmente en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

NITRATOS

Es la especie derivada del nitrógeno más importante y es una fuente de nutrientes importante para ciertos organismos autótrofos. Una alta concentración de nitratos puede originar el llamado fenómeno de eutrofización, con un aumento en la población de estos organismos autótrofos que compiten por el oxígeno con otros organismos aerobios de mayor tamaño.

La concentración de nitratos, al igual que la de nitritos está relacionada con la posterior aparición de algas y su consumo puede provocar metahemoglobinemia o la llamada enfermedad del bebé azul.

SÓLIDOS

Podemos distinguirlos en sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, siendo los sólidos totales la suma de todos ellos, éstos además de suponer la presencia de cuerpos o sustancias extrañas que pudieran en algún caso no ser recomendables, aumentan la turbidez del agua y disminuyen la calidad de la misma.

Los sólidos sedimentables son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a fuerzas de arrastre o turbulencias; cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, precipitan en el fondo. Suelen eliminarse fácilmente por cualquier método de filtración.



Los sólidos en suspensión se mantienen en el agua debido a su naturaleza coloidal que viene dada por las pequeñas cargas eléctricas que poseen estas partículas que las hacen tener una cierta afinidad por las moléculas de agua.

Este tipo de sólidos como tales son difíciles de eliminar siendo necesaria la adición al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la carga eléctrica de estas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración. Ciertos sistemas de tratamiento de agua como la ozonación ya suponen de por sí un buen método floculante ya que se produce la oxidación del hierro, manganeso y aluminio, óxidos que son los que verdaderamente ejercen un fuerte poder floculante en el agua aumentando la eficacia del filtro y mejorando la transparencia del agua.

Los sólidos disueltos están relacionados con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso, se asocian con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones permite un crecimiento en la capacidad conductiva. Un tratamiento prolongado con compuestos del cloro en una piscina por ejemplo aumenta la cantidad de sólidos disueltos y la conductividad en el tiempo.

TURBIDEZ

La turbidez es un parámetro relacionado con el grado de transparencia y limpieza del agua que a su vez depende de la cantidad de sólidos en suspensión del agua que pueden ser resultado de una posible actividad biológica o simplemente una presencia de componentes no deseables.

Se mide mediante la absorción que sufre un haz de luz al atravesar un determinado volumen de agua. Para eliminar esta turbidez y así mejorar la calidad



del agua se usan los distintos tipos de filtros que hay en el mercado, mejorando el rendimiento con el uso de floculantes.

COLORO

El cloro es un elemento químico del grupo de los halógenos, al igual que el flúor, el bromo, el yodo y el astato. En la naturaleza se encuentra normalmente en forma de gas formando moléculas bivalentes de cloro (Cl_2), también lo podemos encontrar en gran cantidad formando parte de la sal común o cloruro sódico (NaCl), que en estado acuoso se encuentra disociado en sus iones Cl^- y Na^+ .

Es un compuesto que a -35°C se licua, resulta ser un desinfectante bastante eficaz y económico para el tratamiento y potabilización de aguas, ya sea aportado en forma gaseosa disolviéndolo en el agua o bien aportándolo como hipoclorito sódico, hipoclorito cálcico o como derivados del cloroisocianurato. Sin embargo, el aporte de cloro reacciona con la materia orgánica del agua formando una serie de compuestos derivados del cloro que pueden resultar muy molestos y malolientes.

De estos compuestos, los más perjudiciales son los llamados trihalometanos, de carácter cancerígeno para la salud humana, el más importante es el triclorometano o cloroformo (CHCl_3), que tradicionalmente era usado como analgésico pero dejó de utilizarse debido a su toxicidad. Estos compuestos tóxicos traen asociados riesgos de cáncer de colon y vejiga y daños en el riñón y en el hígado. También pueden formarse otros subproductos perjudiciales como compuestos orgánicos volátiles, cloritos, ácidos cloroacéticos o cloruro de cianógeno.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

Los sólidos suspendidos y el material coloidal existente en el agua presentan el primer problema de cualquier sistema de ósmosis inversa. Al tratarse de una operación física, la existencia de material coloidal produce el bloqueo físico de la membrana, reduciendo la superficie de filtración útil y la capacidad de paso de



agua; además produce fenómenos de ensuciamiento tanto de la membrana, como de los canales de paso provocando un deterioro en los parámetros de productividad y presión de operación del sistema.

Normalmente, el ensuciamiento por material suspendido se soluciona por medio de operaciones alternadas de limpieza química. No obstante, la limpieza química, debido a la eficiencia inherente, no restituye totalmente la capacidad y presión del sistema. Este fenómeno implica cuidados especiales en el diseño del sistema, particularmente sobre el mantenimiento de un flujo mínimo de rechazo, de manera que la velocidad tangencial mantenga esfuerzos cortantes que inhiban el ensuciamiento y bloqueo de la superficie.

Debido a esto, la ósmosis inversa requiere siempre de un diseño cuidadoso de los sistemas de tratamiento previo para garantizar que el agua de alimentación contenga la menor concentración posible de sólidos y material coloidal. Las operaciones de pretratamiento incluyen, según el caso, sistemas de clarifloculación, filtración en lechos de arena y filtración con carbón activado. Recientemente se ha empleado la tecnología de microfiltración y ultrafiltración como pretratamiento para sistemas de ósmosis inversa en aplicaciones con agua de características ensuciantes importantes.

MATERIA ORGÁNICA.

Similarmente al caso del material coloidal, la materia orgánica y los microorganismos asociados generan el ensuciamiento de la superficie de la membrana, la reducción de la capacidad del sistema, incremento en la presión de operación y deterioro en la calidad del producto.



Los fenómenos de bioensuciamiento han sido estudiados a fondo, y aunque se conoce más sobre los mecanismos involucrados, no se ha determinado totalmente la forma de evitar sus efectos negativos en sistemas de ósmosis inversa.

A diferencia del ensuciamiento por material coloidal, el bioensuciamiento se define como la formación de una capa microbiológica sobre la superficie de la membrana, y que redundará en la pérdida inaceptable del rendimiento del sistema.

El transporte de los microorganismos (Bacterias, hongos, micro-algas) sucede por mecanismos de difusión, convección, sedimentación y por procesos químico-tácticos. La biocapa puede o no cubrir toda la superficie pero normalmente estará constituida por una serie de capas sobrepuestas de microorganismos vivos y muertos.

La acumulación sobre la superficie se debe a dos mecanismos:

- 1) adhesión y
- 2) crecimiento (ej. División celular).

La adhesión sobre el sustrato sintético sucede por mecanismos debidos a la forma del microorganismo (flagelos, fimbrias) o gracias a productos extra-celulares adheridos a la pared celular (proteínas periféricas, heteropolisacáridos, lipopolisacáridos, etc.).

La adhesión primaria implica la deposición sobre una superficie virgen mientras que la adhesión secundaria implica la deposición sobre estratos microbianos preexistentes.

La adhesión secundaria es un fenómeno dinámico en el que los organismos depositados desarrollan polímeros extracelulares adherentes, que forman un gel hidratado o glicocáliz. Dicha sustancia polimérica exterior está constituida normalmente por heteropolisacáridos de alta densidad y carga superficial negativa.



Ésta, a su vez, sirve como una capa protectora que reduce la efectividad de los mecanismos difusionales de transferencia de agentes oxidantes o biocidas como el cloro.

Las bacterias de la biocapa sobreviven gracias a la fuente de carbono existente en la materia orgánica disuelta en la corriente o gracias a la materia orgánica depositada en la parte más interna de la película; lo que permite que las bacterias sobrevivan aún en condiciones de escasez de nutrientes o COT en el agua.

Las bacterias y hongos han evolucionado precisamente gracias a su capacidad para desarrollar mecanismos de adhesión y por lo tanto todos los materiales, tanto naturales como sintéticos son susceptibles a ésta.

La adhesión se reconoce como un mecanismo de supervivencia en condiciones de falta de alimento y nutrientes y se encuentra con concentraciones de COT tan bajas como 5 microgramos por litro en sistemas de agua ultra pura. Uno de los resultados del estudio extensivo de los fenómenos involucrados en la formación de ensuciamiento orgánico ha sido la creación de una nueva generación de membranas, más hidrofílicas que las membranas tradicionales de acetato de celulosa o poliamida aromática. Debido a la naturaleza y carga electrostática de la superficie de la membrana, se ha encontrado que éstas presentan una menor afinidad por materiales coloidales y ensuciamiento orgánico, permitiendo un mayor grado de reversibilidad por métodos de limpieza alcalina y la combinación con sistemas de inyección de biocidas en línea y sistemas de sanitización periódica.

CATIONES PRECURSORES DE SALES POCO SOLUBLES.

El ejemplo clásico de estos son el calcio, el magnesio, el bario y el estroncio. Las sales de estos cationes, como carbonatos, sulfatos e hidróxidos son muy poco solubles y fomentan fenómenos de incrustación en el interior de los canales de paso de las membranas.



En aplicaciones de pH neutro es práctica común, dependiendo de la concentración de dureza y de otros iones de este tipo, eliminar la alcalinidad del agua, por medio de la adición de un ácido fuerte (ácido sulfúrico o clorhídrico). Las consideraciones de diseño consisten esencialmente en mantener un índice de Langelier y un índice de Stephen-Davis negativo.

En aplicaciones a pH alto, el problema es mucho más severo y se hace necesaria la eliminación total de la dureza antes de la ósmosis inversa.

SILICE

La sílice es probablemente uno de los mayores enemigos de la operación adecuada de los sistemas de ósmosis inversa, como consecuencia de la baja solubilidad de la sílice a condiciones de pH neutro. El ensuciamiento por precipitados de dióxido de silicio es altamente irreversible y representa el mayor riesgo operativo para este tipo de operaciones.

En consecuencia, la concentración de sílice restringe el nivel de recuperación de las operaciones de ósmosis inversa de manera que la concentración máxima en el rechazo sea de 100 a 120 mg/l, que es la solubilidad a 25 ° C y un pH de 7.

Sin embargo, la operación a condiciones de tan alto pH implica la remoción total de la dureza existente en el agua cruda, así como la eliminación de otros cationes que producen sales poco solubles, como el bario, el estroncio y los metales como el hierro.

Por esa razón, los sistemas de alto pH van acompañados siempre de una etapa de suavización previa, ya sea por medio de resinas de intercambio iónico en ciclo sodio, regeneradas con cloruro de sodio; o por resinas catiónicas débilmente ácidas en equipos de de-alcalización.



ANEXO 2
PRINCIPALES PARÁMETROS QUE SE DEBEN DE CONSIDERAR PARA EL
DISEÑO DE UN SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA.



SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

Los sólidos suspendidos y el material coloidal existente en el agua presentan en primer problema de cualquier sistema de ósmosis inversa. Al tratarse de una operación física, la existencia de material coloidal produce el problema de bloque físico de la membrana, reduciendo la superficie de filtración útil y la capacidad de paso de agua; produce fenómenos de ensuciamiento tanto de la membrana y canales de paso y redundan en un deterioro de los parámetros de productividad y presión de operación del sistema. Normalmente, el ensuciamiento por material suspendido se remedia por medio de operaciones alternadas de limpieza química.

No obstante, la limpieza química, debido a la eficiencia inherente, no restituye totalmente la capacidad y presión del sistema. Este fenómeno implica cuidados especiales en el diseño del sistema, particularmente sobre el mantenimiento de un flujo mínimo de rechazo, de manera que la velocidad tangencial mantenga esfuerzos cortantes que inhiban el ensuciamiento y bloqueo de la superficie.

Debido a esto, la ósmosis inversa requiere siempre de un diseño cuidadoso de los sistemas de tratamiento previo para garantizar que el agua de alimentación contenga la menor concentración posible de sólidos y material coloidal. Las operaciones de pre-tratamiento incluyen, según el caso, sistemas de clarifloculación, filtración en lechos de arena y filtración con carbón activado. Recientemente se ha empleado la tecnología de micro filtración y ultra filtración como pre-tratamiento para sistemas de ósmosis inversa en aplicaciones con agua de características ensuciantes importantes.



MATERIA ORGÁNICA.

Similarmente al caso del material coloidal, la materia orgánica y los microorganismos asociados generan el ensuciamiento de la superficie de la membrana, la reducción de la capacidad del sistema, incremento en la presión de operación y deterioro en la calidad del producto.

Los fenómenos de bio ensuciamiento han sido estudiados a fondo, y aunque se conoce más sobre los mecanismos involucrados, no se ha determinado totalmente la forma de evitar sus efectos negativos en sistemas de ósmosis inversa.

A diferencia del ensuciamiento por material coloidal, el bio ensuciamiento se define como la formación de una capa microbiológica sobre la superficie de la membrana, y que redundará en la pérdida inaceptable del rendimiento del sistema.

El transporte de los microorganismos (Bacterias, hongos, micro-algas) sucede por mecanismos de difusión, convección, sedimentación y por procesos químicotácticos. La biocapa puede o no cubrir toda la superficie pero normalmente estará constituida por una serie de capas sobrepuestas de microorganismos vivos y muertos.

La acumulación sobre la superficie se debe a dos mecanismos:

- 1) adhesión y
- 2) crecimiento (ej. División celular).

La adhesión sobre el sustrato sintético sucede por mecanismos debidos a la forma del microorganismo (flagelos, fimbrias) o gracias a productos extra-celulares adheridos a la pared celular (proteínas periféricas, heteropolisacáridos, lipopolisacáridos, etc.). La adhesión primaria implica la deposición sobre una



superficie virgen mientras que la adhesión secundaria implica la deposición sobre estratos microbianos preexistentes.

La adhesión secundaria es un fenómeno dinámico en el que los organismos depositados desarrollan polímeros extracelulares adherentes, que forman un gel hidratado o glicocáliz. Dicha sustancia polimérica exterior está constituida normalmente por heteropolisacáridos de alta densidad y carga superficial negativa. Esta, a su vez, sirve como una capa protectora que reduce la efectividad de los mecanismos difusionales de transferencia de agentes oxidantes o biocida como el cloro.

Las bacterias de la biocapa sobreviven gracias a la fuente de carbono existente en la materia orgánica disuelta en la corriente o gracias a la materia orgánica depositada en la parte más interna de la película; lo que permite que las bacterias sobrevivan aún en condiciones de escasez de nutrientes o COT en el agua.

Las bacterias y hongos han evolucionado precisamente gracias a su capacidad para desarrollar mecanismos de adhesión y por lo tanto todos los materiales, tanto naturales como sintéticos son susceptibles a ésta.

La adhesión se reconoce como un mecanismo de supervivencia en condiciones de falta de alimento y nutrientes y se encuentra con concentraciones de COT tan bajas como 5 microgramos por litro en sistemas de agua ultra-pura.

Uno de los resultados del estudio extensivo de los fenómenos involucrados en la formación de ensuciamiento orgánico ha sido la creación de una nueva generación de membranas, hidrófilas que las membranas tradicionales de acetato de celulosa o poliamida aromática. Debido a la naturaleza y carga electrostática de la superficie de la membrana, se ha encontrado que estas presentan una menor afinidad por materiales coloidales y ensuciamiento orgánico, permitiendo un mayor



grado de reversibilidad por métodos de limpieza alcalina y la combinación con sistemas de inyección de biocidas en línea y sistemas de sanitización periódica.

CATIONES PRECURSORES DE SALES POCO SOLUBLES.

El ejemplo clásico de estos son el calcio, el magnesio, el bario y el estroncio. Las sales de estos cationes, como carbonatos, sulfatos e hidróxidos son muy poco solubles y fomentan fenómenos de incrustación en el interior de los canales de paso de las membranas. En aplicaciones de pH neutro es práctica común, dependiendo de la concentración de dureza y de otros iones de este tipo, eliminar la alcalinidad del agua, por medio de la adición de un ácido fuerte (ácido sulfúrico o clorhídrico). Las consideraciones de diseño consisten esencialmente en mantener un índice de Langelier y un índice de Stephen-Davis negativo.

En aplicaciones a pH alto, el problema es mucho más severo y se hace necesaria la eliminación total de la dureza antes de la ósmosis inversa.

SILICE

La sílice es probablemente uno de los mayores enemigos de la operación adecuada de los sistemas de ósmosis inversa, como consecuencia de la baja solubilidad de la sílice a condiciones de pH neutro. El ensuciamiento por precipitados de dióxido de silicio es altamente irreversible y representa el mayor riesgo operativo para este tipo de operaciones.

En consecuencia, la concentración de sílice restringe el nivel de recuperación de las operaciones de ósmosis inversa de manera que la concentración máxima en el rechazo sea de 100 a 120 mg/l, que es la solubilidad a 25 °C y un pH de 7.



Sin embargo, la operación a condiciones de tan alto pH implica la remoción total de la dureza existente en el agua cruda, así como la eliminación de otros cationes que producen sales poco solubles, como el bario, el estroncio y los metales como el hierro.

Por esa razón, los sistemas de alto pH van acompañados siempre de una etapa de suavización previa, ya sea por medio de resinas de intercambio iónico en ciclo sodio, regeneradas con cloruro de sodio; o por resinas catiónicas débilmente ácidas en equipos de de-alcalización.



BIBLIOGRAFÍA

1. Agashichev S. 2003. Analysis of integrated co-generative schemes including MSF, RO and power generating systems (present value of expenses and "levelised" cost of water). *DESALINATION*. 164 (2004) 281-302
2. Al-Enezi G. 2002. Design consideration of RO units: case studies. *DESALINATION*. 153 (2002) 281–286
3. Ármalo R. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona. Editorial Reverte, S.A. 1996. ISBN-84-291-7975-5.
4. Aybar H. 2004. Desalination system using waste heat of power plant. *DESALINATION*. 166 (2004) 167-170
5. Blanco J. 2006. Advanced Multi-Effect Solar Desalination Technology: The PSA Experience. CIEMAT - PSA, Tabernas (Almería), Spain
6. Breschi D. 1999. Seawater distillation from low-temperature streams: a case history. *DESALINATION*. 122 (1999) 247-254
7. Bribiesca E. 2007. Nature identification and morphology characterization of anion-exchange membrane fouling during conventional Electrodiálisis. *JOURNAL OF COLLOID AND INTERFASE SCIENCE*. 308 (2007) 182–190
8. Clever M, 2000. Process water production from river water by ultrafiltration and reverse ósmosis. *DESALINATION*. 131 (2000) 325-336
9. Darwish M. 2007. Desalting fuel energy cost in Kuwait in view of \$75/barrel oil price. *DESALINATION*. 208 (2007) 306–320
10. Dey A. 2005. A more forgiving electrodeionization technology with higher feed water hardness tolerante. *Water Conditioning & Purification* 32 -40
11. El-Manharawy S. 2001. Water type and guidelines for RO system design. *DESALINATION*. 139 (2001) 97-113
12. Ettouney H. 2005. Brine entrainment in multistage flash desalination. *DESALINATION*. 182 (2005) 87–97



13. FI'LA V. 2003. A mathematical model of multiple ion transport across an ion-selective membrana under current load conditions. 675-684
14. Goffin C .2000. Use of continuous electrodeionization to reduce ammonia concentration in steam generators blow-down of PWR nuclear power plants. DESALINATION. 132 (2000) 249-253
15. Grabowski A. 2006. The production of high purity water by continuous electrodeionization with bipolar membranes: Influence of the anion-exchange membrane permselectivity. Journal of membrane science. 281 (2006) 297-306
16. Helal A.M. 2004. DESALINATION. Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants Part III: Sensitivity analysis. 169 (2004) 43-60
17. Hernandez. Microfiltracion, ultrafiltracion y ósmosis inversa. Murcia: Universidad de Murcia, Secretariado de Publicaciones, 1990
18. Kemmer F. The NALCO Water Handbook. *Second Edition*. United States of America. McGraw-Hill, Inc. 1988. ISBN 0-07-045872-3
19. LatifAhmad A. 2003. Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. DESALINATION. 157 (2003) 87-95
20. Lovato A. 2001. Heat recovery from sulphuric acid plants for seawater desalination. DESALINATION. 136 (2001) 159-168
21. Mansour K M. 2001. Chemical cleaning of reverse ósmosis membranas. DESALINATION. 134 (2001) 77-82
22. Manual de analisis de agua. HACH Company. Segunda edición en español. EE.UU, Loveland, Colorado.2000
23. Maragliano G. 2005. The development of a high flow seawater membrane. A case history of one of the first applications using high flow seawater elements in a plant producing process and boiler feed water for ENEL (now EDIPOWER) at San Filippo del Mela power plant in Italy. DESALINATION. 184 (2005) 247-252
24. Masson M. 1996. Membrane filtration and reverse ósmosis purification of sewage: Secondary effluent for re-use at Eraring Power Station. DESALINATION. 106 (1996) 11-15
25. Mavrov V. 2001. Spent process water desalination and organic removal by membranes for water reuse in the food industry. DESALINATION. 138 (2001) 65-74



26. MUNI A. EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN/NANOFILTRACIÓN TANGENCIAL EN SERIE PARA EL FRACCIONAMIENTO Y CONCENTRACIÓN DEL LACTOSUERO. *RC*, ago. 2005, vol.15, no.4, p.361-367. ISSN 0798-2259.
27. Nordell E. Tratamiento de agua para la industria y otros usos. Séptima impresión. México. Compañía editorial continental, S.A. 1981
28. Osmonics. Pure Water Handbook. 2nd Edition. 1997, 1991 Osmonics, Inc.
29. Park J, 2007. Removal of hardness ions from tap water using electromembrane processes. *DESALINATION*. 202 (2007) 1–8
30. Perry R. Perry manual del ingeniero químico. Sexta edición. Mexico. McGraw-Hill. ISBN 0-07-049479-7.
31. Praptowldodo V. 2000. Studies on seawater desalination by reverse ósmosis at the Badak natural gas liquefaction plant, Bontang, East Kalimantan. *DESALINATION*. 132 (2000) 323-328
32. Rognoni M. 2004. Optimization of seawater evaporation plants. *DESALINATION*. 166 (2004) 63-68
33. Sahlia M. 2007. Fluoride removal for underground brackish water by adsorption on the natural chitosan and by Electrodialysis. *DESALINATION*. 212 (2007) 37–45
34. Sayed Y. 2001. Designing desalination systems for higher productivity. *DESALINATION*. 134 (2001) 129-158
35. Sheppard T. Acondicionamiento de aguas para la industria. Primera edición. México. Limusa-Wiley. 1966
36. Shih H. 2005. Evaluating the technologies of thermal desalination using low-grade heat. *DESALINATION*. 182 (2005) 461–469
37. Sisnero A. Physical-Chemical Treatment of water and wastewater. Morgan state university. Baltimore, Meriland. 2003
38. Slesarenko V. 2003. Electrodialysis and reverse ósmosis membrane plants at power stations *DESALINATION*. 158 (2003) 303-311
39. Song J. 2007. Effect of current density on ionic transport and water dissociation phenomena in a continuous electrodeionization (CEDI). *Journal of membrana science*. 291 (2007) 165–171



40. Sutzkover I, 2000. Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse ósmosis system. DESALINATION. 131 (2000) 117-127
41. Vourch M. 2005. Nanofiltration and reverse ósmosis of model process waters from the dairy industry to produce water for reuse. DESALINATION. 172 (2005) 245-256
42. Wagner J. Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints. Osmonics, Second Edition, Revision 2. November 2001
43. Wen R, 2005. The removal of silicon and boron from ultra-pure water by Electrodeionization. DESALINATION. 181 (2005) 153-159
44. Wioeniewski J. 2007. Donnan dialysis for hardness removal from water before electro-dialytic desalination. DESALINATION. (2007) 251–260
45. Lenntech empresa dedicada producir sistemas de tratamiento de Agua residual y sistemas de purificación del aire. <http://www.lenntech.com/espanol/ósmosis-inversa.htm>
46. productos y servicios para la industria del agua latinoamericana http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/ósmosis-inversa.asp
47. Lenntech empresa dedicada producir sistemas de tratamiento de Agua residual y sistemas de purificación del aire. <http://www.lenntech.com/espanol/Nanofiltracion-y-ósmosis-inversa.htm>
48. Desalacion solar de efectos múltiples, en la plataforma solar Almería (PSA). [http://www.psa.es/webeng/aquasol/files/Congresos/Paper%20Zurich%2002%20Final%20Version%20\(Rév%20Final\).pdf](http://www.psa.es/webeng/aquasol/files/Congresos/Paper%20Zurich%2002%20Final%20Version%20(Rév%20Final).pdf)