



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

"APLICACION Y DESARROLLO DE LOS TRATAMIENTOS TERCIARIOS
DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MEXICANA"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
LETICIA CHACON RODRIGUEZ

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1994

19
BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

PRESIDENTE: PROF. EMIKO MIYASAKO KOBASHI
VOCAL: PROF. JESUS GONZÁLEZ PÉREZ
SECRETARIO: PROF. RODOLFO TORRES BARRERA
1er. SUPLENTE: PROF. MARÍA DE LOS ÁNGELES GONZÁLEZ ARREDONDO
2o. SUPLENTE: PROF. VICTOR MANUEL LUNA PABELLO

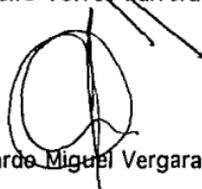
LUGAR DONDE SE DERARROLLÓ EL TEMA:

Servicios Profesionales en Control de Contaminantes, S.A. de C.V.
Gabriel Mancera 1742, Col. Del Valle.
C.P. 03100 México, D.F.
Teléfonos: 687-3149 687-5589

ASESOR:


Ing. Rodolfo Torres Barrera

ASESOR TÉCNICO:


Ing. Gerardo Miguel Vergara Morán

SUSTENTANTE:


Leticia Chacón Rodríguez

ÍNDICE

CONTENIDO PÁGINA

INTRODUCCIÓN 10

CAPÍTULO I EL AGUA Y LA IMPORTANCIA DE SUS TRATAMIENTOS

1. Introducción	11
2. Condiciones generales del agua	12
2.1 Agua potable	12
2.2 Agua para cervecera y destilerías	14
2.3 Agua de industria azucarera	14
2.4 Agua para la industria de papel y celulosa	14
2.5 Agua para tintorerías, lavanderías y talleres de blanqueo	14
2.6 Agua para caldera	15
2.7 Agua en la industria en general	15
3. Tratamientos del agua	16
4. Parámetros que caracterizan al agua	16
4.1 Parámetros físicos	17
4.2 Parámetros bioquímicos	18
4.3 Parámetros químicos	19
5. Tratamientos primarios	21
6. Tratamientos secundarios	21
7. Tratamientos terciarios	22
8. Selección de un proceso de tratamiento de agua	22

CAPÍTULO II INTERCAMBIO IÓNICO

1. Aspecto histórico	27
2. Proceso de intercambio iónico	28
3. Nomenclatura	30

CAPÍTULO II. Continuación...

4.	Intercambiadores catiónicos	31
4.1	Resinas catiónicas fuertemente ácidas	31
4.2	Resinas catiónicas débilmente ácidas	35
5.	Intercambiadores aniónicos	36
5.1	Resinas de intercambio de aniones débilmente básicas	36
5.2	Resinas de intercambio de aniones fuertemente básicas	38
6.	Bases de diseño	41
7.	Arreglos de unidades de intercambio iónico	43
8.	Equipo y aplicaciones	46
9.	Variaciones en el proceso	48
9.1	Regeneración a contracorriente	48
9.2	Proceso a contrapresión hidráulica	52
9.3	Proceso de lecho fluidizado	52
10.	Desionización continua	53
10.1	El proceso	53
10.2	Diseño de los compartimientos	56
11.	Aplicaciones especiales del intercambio iónico	57
11.1	Industria Nuclear	57
11.2	Industria de los microprocesadores	59
11.3	Concentración de sustancias químicas	59
11.3.1	Extracción de uranio	
11.3.2	Extracción de vitaminas y antibióticos	
11.4	Purificación	60

CAPÍTULO III TÉCNICAS DE FILTRACIÓN

1.	Introducción	62
2.	Filtración Directa	62
3.	Filtración Tangencial	64
4.	Ultrafiltración	68
4.1	Proceso de ultrafiltración	68
4.2	Membranas de ultrafiltración	70
4.3	Aplicaciones	71
4.4	Eficiencia de retención	74
4.5	Polarización de la concentración	75
4.5.1	Formación de la capa limitante	
4.5.2	Flujo gel-limitante	

CAPÍTULO III. Continuación...

4.5.3 Flujo membrana-controlado	
4.6 Parámetros para incrementar el flujo	78
4.6.1 Membranas	
4.6.2 Presión	
4.6.3 Agitación	
4.6.4 Concentración del soluto	
4.6.5 Temperatura	
4.6.6 Medio iónico	

CAPÍTULO IV ÓSMOSIS INVERSA

1. Aspecto histórico	82
2. Nomenclatura	83
3. Proceso de ósmosis inversa	85
4. Presión osmótica	87
5. Efecto de la presión	88
6. Membranas de ósmosis inversa	90
6.1 Descripción de las membranas	92
6.1.1 Membrana celulósica	
6.1.2 Membrana de poliamida	
6.1.3 Membrana compuesta	
6.2 Módulos de arrollamiento de las membranas	98
6.2.1 Módulos en espiral	
6.2.2 Módulos en forma tubular	
6.2.3 Módulos de fibras huecas	
6.3 Limpieza y mantenimiento de las membranas	101
6.3.1 Métodos de limpieza de las membranas	
6.3.2 Efecto de la presión, temperatura y edad	
6.3.3 Efecto del pH en las membranas	
6.3.4 Efecto de los compuestos y sustancias orgánicos	
6.3.5 Incrustaciones por dureza	
6.3.5 Obstrucciones con fierro y silicatos	
7. Instalaciones de ósmosis inversa	106
8. Pretratamientos necesarios para la ósmosis inversa	107
9. Aplicaciones	110

CAPÍTULO V TRATAMIENTOS PARA LA DESINFECCIÓN DEL AGUA

1.	Introducción	114
2.	Tratamientos físicos	115
2.1	Desinfección por calor	115
2.2	Luz ultravioleta	116
2.2.1	Naturaleza de la luz ultravioleta	
2.2.2	Desinfección con luz ultravioleta	
3.	Tratamientos químicos	119
3.1	Clorinación	119
3.1.1	Prácticas de clorinación	
3.1.2	La clorinación y las bacterias	
3.1.3	El cloro con el hierro y manganoso	
3.1.4	Ácidos orgánicos	
3.1.5	Clorinación a punto de ruptura	
3.1.6	Puntos de aplicación	
3.1.7	Consideraciones de ingeniería	
3.2	Dióxido de cloro	133
3.3	Ozonización	134
3.3.1	Consideraciones de ingeniería	
3.3.2	Técnicas de difusión del ozono	
3.3.3	Prácticas de Ozonización	
3.3.4	Selección de sistemas de difusión contacto de acuerdo a su aplicación	
3.4	Iones metálicos	138
3.5	Halógenos y otros compuestos	139

CAPÍTULO VI APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS AVANZADOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA

1.	Introducción	141
2.	La industria mexicana y los tratamientos avanzados	141
2.1	Industria automotriz	141
2.2	Industria de lácteos	142
2.3	Industria refresquera	142
2.4	Industria petroquímica	143
2.5	Industria alimenticia	144
2.6	Industria electrónica	144
2.7	Imprenta	145

CAPÍTULO VI. Continuación...	
2.8 Industria vidriera	145
2.9 Industria textil	145
2.10 Industria farmacéutica	145
2.11 Industria vitivinícola	146
3. Estudio económico para introducir el tratamiento de agua de proceso en una planta vitivinícola mexicana	147
4. Comentarios	154
APÉNDICE I	156
APÉNDICE II	166
BIBLIOGRAFÍA	176

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁGINA
Regulaciones para agua potable (E.E.U.U.)	13
Tratamientos terciarios comunes	26
Intercambiador de cationes fuértemente ácido	34
Intercambio catiónico	37
Ciclo de una resina de intercambio iónico	40
Sistemas de intercambio iónico	49
Cuadro comparativo de regeneraciones	51
Representación de la desionización continua	58
Características de resinas de intercambio iónico	61
Tipos de filtración	65
Características típicas de diversos tipos de carbón activado	67
Espectro de las técnicas de filtración	69
Representación de la ultrafiltración	72
Factores que influyen en la ultrafiltración	81
Representación gráfica de la ósmosis inversa	86
Explicación gráfica de la ósmosis inversa	89
Presiones osmóticas típicas	91
Valores de rechazo de solutos para membranas de acetato de celulosa	93

Membranas para ósmosis inversa	97
Configuraciones de membranas para ósmosis inversa	100
Agentes limpiadores para membranas para ósmosis inversa	104
Opciones de diseño para ósmosis inversa	109
Características de los desinfectantes químicos	121
Fases de la clorinación del agua	126
Distribución de la clorinación respecto al pH	129
Efectos de cloro gaseoso a diferentes concentraciones	131
Estudio económico para el tratamiento de agua en una planta vitivinícola	148
Comparativo de costos del agua	149
Gráfica de costo-beneficio para el tratamiento de agua en una industria vitivinícola	151
Cuadro comparativo de gastos de operación para el tratamiento de agua en una planta vitivinícola	152
Producción anual de agua por dos diferentes tratamientos de agua para una planta vitivinícola	153

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es dar a conocer los tratamientos terciarios o avanzados del agua y sus aplicaciones en la industria mexicana. Se presentan los conceptos básicos de cada uno de los tratamientos así como los criterios necesarios para la elección y desarrollo de proyectos en México. El giro que toma esta tesis está hacia el agua pura y ultrapura para el proceso en diferentes industrias. En el primer capítulo se mencionan las propiedades de agua y sus tratamientos en general, de acuerdo a las características y usos. Los siguientes capítulos tratan sobre los diferentes tratamientos avanzados del agua y aplicaciones en la industria. El último capítulo menciona en especial algunas de las aplicaciones de estos tratamientos en nuestro país de acuerdo a la participación en la industria que se menciona. Es muy importante tomar en cuenta que actualmente se van a necesitar más de estos tratamientos; mucho se ha hablado de los tratamientos primarios y secundarios, pero para tener agua con características más específicas no se ha tenido la suficiente información por lo que con este trabajo se pretende dar apoyo con criterios ingenieriles para la toma de decisiones en un proyecto de una planta de tratamiento de agua así como también un apoyo didáctico.

CAPÍTULO I

EL AGUA Y LA IMPORTANCIA DE SUS TRATAMIENTOS

1. INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso natural esencial para la vida de cualquier ser vivo porque participa directamente en los procesos biológicos. Es muy difícil de encontrarla pura en la naturaleza, ya que por ser un solvente casi universal, prácticamente todas las sustancias son solubles en ella en mayor o menor grado y se contamina fácilmente con las que entra en contacto.

La principal fuente de agua son los océanos y regresa a estos para completar su ciclo hidrológico.

Dentro de este ciclo natural se va contaminando, desde el momento en que el agua en estado líquido alcanza el estado de vapor, hasta que se descarga nuevamente al océano. La naturaleza de la contaminación depende de las características del territorio sobre el cual se forman las nubes, así como las del lugar en que se precipita, ya sea en forma de lluvia o nieve. De esta manera, el agua va presentando diferentes composiciones y calidades: aquí se debe tomar en cuenta, que mientras una calidad determinada puede ser satisfactoria para una serie de condiciones, puede ser totalmente inadecuada para otros fines. Las operaciones de ingeniería o industriales necesitan un suministro de agua adecuado para llevarse a cabo con buenos resultados. Por

ejemplo, la purificación de agua que resulta satisfactoria para usos municipales es frecuentemente inadecuada para muchos procesos industriales, tampoco es práctico acondicionar el suministro público de toda una comunidad y satisfacer los requisitos específicos de grupos de industrias. Algunos de los tratamientos avanzados de purificación, para destinarla a usos específicos, son los que se van a tratar en los próximos capítulos.

Por otra parte, el aumento acelerado de la población, la industrialización y el desarrollo tecnológico, demandan cada vez, mayor cantidad de agua potable y de la calidad requerida para cada una de las finalidades a que se destinará.

La falta de control en las descargas industriales, el desperdicio irracional del agua, hacen que ésta no sea reutilizable y que cada día sea más escasa.

Más grave aún es la contaminación de las fuentes naturales y los mantos acuíferos, por el alto grado de contaminación ambiental, por los desechos industriales y la causada por la población misma.

2. CONDICIONES GENERALES DEL AGUA

2.1 Agua Potable

El agua potable debe tener oxígeno disuelto, dióxido de carbono, así como iones de bicarbonato los cuales le suministran un sabor de frescura. Nitritos

**Regulaciones Nacionales de Estados Unidos
de Norteamérica para agua potable**

Contaminantes	Límites máximos permisibles no federales (ver referencia)	Límites máximos propuestos *1
Aluminio	-	0.05 mg/l
Cloruros	250 mg/l	250 mg/l
Color	15 unidades de color	15 unidades de color
Cobre	1 mg/l	1 mg/l
Corrosividad	no-corrosivo	no-corrosivo
Fluoruros	2 mg/l	2 mg/l
Agentes espumantes	0.5 mg/l	0.5 mg/l
Fierro	0.3 mg/l	0.3 mg/l
Manganeso	0.05 mg/l	0.05 mg/l
Olor	3 número de umbral de color	3 número de umbral de color
pH	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5
Plata	-	0.09 mg/l
Sulfatos	250 mg/l	250 mg/l
Sólidos disueltos totales	500 mg/l	500 mg/l
Zinc	5 mg/l	5 mg/l
Contaminantes	Límites máximos permisibles no aplicados federalmente	Límites máximos permisibles aplicados federalmente
Coliformes totales	0	1/100 col/mi
Virus	0	TT *2
Turbidez	-	1 - 5 NTU
Trihalometanos totales	-	0.10 mg/l
Radio 226 y 228 total	-	5 pCi/l

Referencia Decreto para agua para beber (potable) de mayo de 1990 (E.E. U.U.)
Los estados pueden establecer límites mayores o menores de acuerdo a sus condiciones locales para los límites establecidos no federales.

* 1 Niveles que representan límites razonables para la calidad de agua potable.

* 2 Requerimientos de las técnicas de tratamiento establecidas para ser efectivas a partir de dic.1990

y amoníaco solamente son permisibles en el orden de trazas. El contenido de sales varía si va a ser agua mineral o agua desmineralizada. Las sustancias orgánicas se pueden determinar debido a su grado de oxidabilidad.

2.2 Agua para cervecería y destilerías

Son suficientes las condiciones básicas necesarias para el agua potable. En algunas destilerías se prefiere agua desmineralizada porque no debe contener sales que influyan sobre el sabor del producto elaborado o en la estabilidad fisicoquímica del mismo, por ejemplo, para la elaboración de destilados de cereales malteados, se requiere agua desmineralizada especialmente libre de sílice.

2.3 Agua de industria azucarera

Debe estar libre de nitrato y cloruro de magnesio, ya que estos productos influyen en la formación de la melaza.

2.4 Agua para la industria de papel y celulosa

Debe ser blanda y no contener ningún compuesto de hierro ni de manganeso, ya que descomponen los residuos jabonosos formadores de dureza y son causantes de las llamadas manchas de metales pesados, por ejemplo en la coloración amarillenta del papel.

2.5 Agua para tintorerías, lavanderías y talleres de blanqueo

Son muy grandes las ventajas del agua blanda en estos campos ya que los formadores de dureza disueltos en el agua reaccionan con el jabón formando

jabones cálcicos, inutilizables para el proceso de lavado y que cuando se depositan en los tejidos dan lugar a velos grisáceos y manchas. Cuando se hierven telas en agua con dureza carbónica alta, se pueden originar precipitados de carbonato de calcio que se depositan sobre la fibra textil y la dañan.

2.6 Aqua de caldera

El agua perfecta para alimentar calderas es aquella que no deposite sustancias incrustantes, no corroa el metal, no ocasione arrastres ni espumas, no contamine el vapor y en general que no afecte las propiedades mecánicas de la caldera. Para lograr este efecto lo que se recomienda es desmineralizar el agua o por lo menos suavizarla.

2.7 Aqua en la industria en general

La calidad del agua para las diferentes industrias debe adaptarse a las condiciones y necesidades según el campo de aplicación. Por ejemplo en fábricas donde utilizan la energía generada por vapor, se requiere de agua libre de dureza, en instalaciones de alta presión deben utilizar agua libre de oxígeno, en fábricas textiles, tintorerías, lavanderías, requieren de agua pobre en dureza y libre de contenidos de hierro, manganeso o trazas de los mismos.

3. TRATAMIENTOS DEL AGUA

Los tratamientos de agua se pueden clasificar en función de los mecanismos involucrados en la separación de contaminantes. El tipo de acción ejercida puede ser de naturaleza física, química o biológica.

Las operaciones y procesos unitarios empleados en un sistema de tratamiento de agua pueden ser agrupados de la siguiente forma:

- * Tratamientos primarios o preliminares
- * Tratamientos secundarios
- * Tratamientos de desinfección
- * Tratamientos terciarios

Los primarios se refieren en gran parte a operaciones físicas unitarias. El término secundario se relaciona con el empleo de procesos químicos y biológicos, en tanto que, en el tratamiento avanzado o terciario, se emplean combinaciones de los tres tipos de mecanismos.

Los tratamientos del agua tienen el propósito de eliminar del agua aquellas sustancias indeseables para cada uso particular, así como para conservarla; pero otro punto muy importante es que los tratamientos del agua deben aplicarse responsablemente para evitar regresar el agua que utilizamos con todos sus contaminantes, a los cuerpos patrimoniales como son lagos, ríos, mares y océanos.

4. PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN AL AGUA

Los parámetros que proporcionan características al agua se clasifican en físicos, bioquímicos y químicos.

4.1 Parámetros físicos

pH .- Es un término que indica el grado de acidez o alcalinidad tiene el agua. Equivale al valor negativo del logaritmo de la concentración del ión hidrógeno. Su escala es del 0 al 14 y no tiene unidades.

Conductividad eléctrica .- Indica la cantidad de iones presentes en el agua. Es la medida de la facilidad del agua para transportar una corriente eléctrica que depende del contenido de sustancias ionizadas como sales inorgánicas o sólidos disueltos. Se expresa normalmente en microsiemens por centímetro.

Color.- Indica la cantidad total de sustancias disueltas en el agua que imparten coloración a la misma, comparando con un patrón ausente de color.

Turbiedad .- Mide la cantidad de materia tanto orgánica como inorgánica, que se encuentra suspendida, cuantificando la cantidad de luz que es reflejada, absorbida y dispersada por el agua al hacer incidir un trayo de luz. La turbiedad no es una medida directa de las impurezas suspendidas. Las unidades más empleadas son las Unidades Nefelométricas de Turbiedad, cuando la turbiedad es alta, se emplean las unidades Jackson o las de Formazina.

Sólidos.- Son la materia que permanece como residuo después de evaporar una muestra de agua y secarla a una temperatura definida. Dependiendo de la temperatura de secado y de su capacidad de ser filtrados se tiene la siguiente clasificación:

S.T.T. Sólidos totales totales.- Son todos los sólidos presentes en una muestra sin importar si son fijos, volátiles, disueltos o suspendidos.

S.T.F. Sólidos Totales Fijos.- Indican el total de sólidos inorgánicos sin importar si son disueltos o suspendidos.

S.T.V. Sólidos Totales Volátiles.- Representan el total de sólidos orgánicos volatilizables tanto disueltos como suspendidos.

S.D.T. Sólidos Disueltos Totales.- Son los sólidos que pasan a través de un filtro, tanto fijos como volátiles.

S.D.F. Sólidos Disueltos Fijos.- Son los sólidos inorgánicos disueltos.

S.D.V. Sólidos Disueltos Volátiles.- Son los sólidos orgánicos disueltos..

S.S.T. Sólidos Suspendidos Totales.- Son aquellos sólidos que quedan retenidos por filtros, tanto orgánicos como inorgánicos.

S.S.F. Sólidos Suspendidos Fijos.- Son los sólidos inorgánicos suspendidos, tales como arenas.

S.S.V. Sólidos Suspendidos Volátiles.- Son los sólidos orgánicos suspendidos.

S.S. Sólidos Sedimentables.- Son los sólidos que pueden llegar a sedimentarse en una hora.

4.2 Parámetros bioquímicos

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).- Es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua por medio de una población microbiana heterogénea. De esta forma se conoce la

materia orgánica biodegradable presente. Su determinación se basa en que los microorganismos utilizan como alimento a la materia orgánica bajo condiciones aerobias adecuadas para su respiración y cantidades adecuadas de nutrientes (fosforo y nitrógeno). Esto se representa en la siguiente ecuación:



donde se puede observar que la cantidad de oxígeno utilizado puede tomarse como una medida relativa de la concentración de materia orgánica. La velocidad de reacción depende principalmente de la población de microorganismos y la temperatura. Por experiencia se ha encontrado que esta determinación debe efectuarse a 20°C, con la adición de un inóculo de microorganismos conocido y en 5 días se logra obtener un porcentaje del 70 u 80 % de la DBO total.

4.3 Parámetros químicos

Demanda Química de Oxígeno (DQO).- Es una medida indirecta de la materia orgánica, en la cual se determina la cantidad de un reactivo oxidante que se necesita para oxidar la materia orgánica, tanto la biodegradable como la refractaria, así como las sustancias en estado reducido.

Carbón Orgánico Total (COT).- Mide todo el carbón presente susceptible de ser convertido en CO₂ a determinada temperatura.

Nitrógeno.- Es un elemento que presenta en sus diferentes estados de

oxidación, componentes que forman el ciclo del nitrógeno y pueden actuar como nutrientes. Los compuestos más importantes son : nitratos, nitritos, amoníaco y nitrógeno orgánico.

Fósforo.- Es un nutriente requerido para los procesos biológicos de tratamiento y puede determinarse como fósforo total o fosfatos.

Alcalinidad y Acidez.- La alcalinidad del agua es su capacidad para neutralizar un ácido y se debe a la presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. La acidez es la capacidad para neutralizar una base y se debe a la presencia de ácidos minerales fuertes, ácidos débiles y sales hidrolizables.

Dureza total .- Es el contenido de iones de calcio y magnesio que en altas concentraciones provocan incrustaciones en tuberías y evitan la formación de espuma del jabón. La dureza carbonatada o temporal es la parte de la dureza total representado por los iones de calcio y magnesio asociados a bicarbonatos, la otra parte es la dureza no carbonatada.

Metales pesados.- La mayoría de los metales pesados son tóxicos y por tanto, interfieren en el proceso de los tratamientos biológicos.

Detergentes.- Las sustancias tensoactivas interfieren en la transferencia de oxígeno al agua residual, por lo que provocan problemas al proceso biológico aerobio.

Grasas y aceites.- Son interferentes del proceso biológico ya que no permiten la transferencia de oxígeno del aire al agua.

5. TRATAMIENTOS PRIMARIOS

Los tratamientos primarios, cubren una amplia gama de aplicaciones en el manejo principalmente de agua de desecho

En México son los más empleados por su antigüedad y economía, aunque actualmente existen procesos más desarrollados.

Algunos tratamientos primarios son:

- | | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 1. Separación con mallas | 5. Remoción de arenas o desarenación |
| 2. Igualación | 6. Sedimentación primaria |
| 3. Mezclado | 7. Neutralización |
| 4. Flotación | 8. Filtración primaria |

6. TRATAMIENTOS SECUNDARIOS

Los tratamientos secundarios combinan procesos químicos y biológicos, se emplean frecuentemente para remover materiales suspendidos y coloidales, sustancias orgánicas, bacterias y otros materiales residuales.

El proceso biológico depende de algunas características relacionadas con la degradación de materiales. Algunos sistemas son:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| 1. Sistemas de filtración:
Filtros rociadores y percoladores | 5. Sistemas anaerobios:
Aereación |
| 2. Floculación y coagulación | Lodos activados |
| 3. Oxidación química | Digestión aerobia |
| 4. Reducción química | Biodiscos |

6. Procesos biológicos

7. Sistemas aerobios

8. Lagunas de estabilización:

Lagunas facultativas

Lagunas anaerobias

Lagunas aerobias

Lagunas de maduración

7. TRATAMIENTOS TERCIARIOS

Los tratamientos terciarios están orientados a la remoción de aquellas sustancias que son poco afectadas por los tratamientos convencionales. Estas sustancias pueden ser compuestos solubles orgánicos o inorgánicos, materiales sólidos particulados y organismos patógenos.

Estos tratamientos combinan procesos físicos, químicos y biológicos, y ofrecen al profesional encargado del tratamiento de agua, un panorama importante por varias razones : la gran necesidad de mejorar la calidad de los efluentes que se descargan a nuestros lagos y corrientes subterráneas, la recuperación del agua y la necesidad de mejorar la calidad y minimizar costos de operación y mantenimiento en las industrias.

En los siguientes capítulos se describen algunos de los tratamientos terciarios más importantes.

8. SELECCIÓN DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA

Para realizar la selección de un tratamiento de agua se necesita la siguiente información mínima:

1. Estado primario del agua (características del agua de alimentación).
2. Volumen de agua disponible.
3. Volumen del agua requerido.
4. Estado final deseado (características del agua requeridas).

Se deben tomar en cuenta las características e instalaciones de la planta en la cual se instalará el proceso de tratamiento de agua y considerar los siguientes puntos:

1. Determinación representativa de las características del agua de alimentación, tomando en cuenta que dichas características pueden variar a lo largo del año.
2. Determinación de las necesidades del tratamiento de agua en forma precisa debido a que en ocasiones se pretende obtener mas calidad y cantidad de las necesarias, provocando un incremento en los costos.
3. Selección de la unidad de proceso más conveniente y tener una visión general de las necesidades del lugar para considerar un tratamiento de agua general y poder recuperar toda el agua posible.
4. Desarrollo del diseño de la unidad del proceso.
5. Evaluación económica y análisis costo-beneficio.

La siguiente tabla muestra una gama de tratamientos de agua como operaciones unitarias que forman parte de un sistema de purificación de agua.

Clarificación

Técnica clásica

Muy limitada a aplicaciones domésticas

Filtros de remoción de partículas

Filtro de un medio contra filtros de medios dual y múltiple

Filtración de superficie contra la de profundidad

Fenómeno de desgaste

Frecuencia de retrolavados

Velocidad de diseño

Empaque de revestimiento de las columnas

Filtros de carbón activado

Eliminan el residual de desinfectantes

Remueven materia orgánica

Parámetros de diseño

Efecto de adsorción multicomponente

Elución de orgánicos preadsorbidos

Frecuencia de retrolavados

Crecimiento microbiano

Control microbiológico

Suavizadores de agua

Pretratamiento de la ósmosis inversa

Taponamiento de las membranas por fierro

Crecimiento microbiano

Métodos para almacenar salmuera

Control microbiológico

Unidades de ósmosis inversa

Selección de la membrana

Rechazo de sílice

Arreglos de pasos dobles

Beneficio adicional para remover iones

Aplicaciones de la nanofiltración

Aspectos microbiológicos

Requerimiento de químicos para el agua alimentada

Consideraciones de diseño

Problemas con el residual de dióxido de carbono

Sanitización

TRATAMIENTOS TERCIARIOS COMUNES

Para disminuir los contaminantes que contiene el agua cruda

Contaminante	Intercambio iónico	Microfiltración	Carbón activado	Electrodialisis	Ultrafiltración	Ósmosis inversa	Clorinación	Ozonización	Luz UV
Dureza	✓			✓		✓			
Alcalinidad	✓			✓		✓			
Partículas		✓		✓	✓	✓			
Sólidos disueltos	✓			✓		✓			
Silice	✓					✓			
Fierro	✓					✓		✓	
Manganeso	✓					✓		✓	
Materia orgánica			✓		✓	✓	✓	✓	✓
Cloro			✓						
Sólidos suspendidos		✓			✓	✓			
Materia Microbiana						✓	✓	✓	✓

C A P Í T U L O II

INTERCAMBIO IÓNICO

1. ASPECTO HISTÓRICO

A principios de la historia del hombre, el fenómeno del intercambio iónico fue notado y reportado informalmente y hasta 1845 H.S. Thompson inició prácticas de materiales cambiadores de iones. Su estudio original fue continuado por Thomas Way, durante los años 1850 a 1854. Continuando los experimentos clásicos de Way, un grupo de investigadores llevaron a cabo trabajos de experimentación. Way no reconoció todo el valor de la acción reversible de los silicatos dobles, que es una función preponderante en la regeneración de los lechos de intercambio, lo que hace práctico este proceso. El intercambio iónico, para acondicionamiento de agua, se estableció sobre una base firme y práctica hasta 1905. Robert Gans, un químico alemán, sintetizó minerales cambiadores de iones mediante la fusión de arcilla, arena y carbonato de sodio. Durante los comienzos del intercambio iónico, el proceso fue utilizado únicamente para suavización del agua por remoción del calcio y magnesio y en menor grado, del hierro y manganeso. Actualmente se emplean extensamente, no solo para acondicionamiento de agua, sino también para procesar soluciones, recuperación de metales y procedimientos analíticos.

2. PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico consiste en remover del agua cruda los iones que se desean eliminar y los transfiere a un material sólido, llamado intercambiador de iones, el cual los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el esqueleto del intercambiador de iones.

El intercambiador iónico necesita regenerarse con sustancias que aporten nuevamente los iones deseables. El tiempo transcurrido entre dos regeneraciones se le llama tiempo de operación y la capacidad para almacenar iones en su esqueleto, capacidad de intercambio.

Las propiedades más importantes de los materiales intercambiadores de iones son:

- a) Su estructura química debe incluir en su molécula uno o varios radicales de función ácida o básica.
- b) Deben ser insolubles en las condiciones normales de operación, de forma que esto no sucede si la temperatura sobrepasa un cierto valor.
- c) El material debe presentarse en forma granular de la mayor homogeneidad

posible y con ciertas dimensiones para que su pérdida de carga en filtración sea aceptable.

d) La variación de los iones retenidos por el material no debe producir la degeneración de su estructura física. En algunos casos se producen cambios del volumen debido a una hinchazón o contracción de los granos, lo cual debe considerarse en el diseño del equipo.

e) Los intercambiadores de iones solo pueden trabajar en presencia de una fase líquida de concentración limitada.

f) Los materiales están destinados a fijar iones y no a filtrar materias en suspensión, coloides o emulsiones grasas.

g) La presencia de gases disueltos en gran cantidad puede dar lugar a fuertes perturbaciones en la actividad de los intercambiadores.

h) De acuerdo a su origen se clasifican en: orgánicos e inorgánicos, ya sean sintéticos o naturales. Y de acuerdo a su función se dividen en: resinas de intercambio de cationes, que pueden ser débilmente ácidas por sus grupos carboxílicos o fuertemente ácidas por sus grupos sulfónicos; y resinas de intercambio de aniones que pueden ser débilmente básicas por sus grupos de aminas primarias, secundarias y terciarias o fuertemente ácidas por sus aminas cuaternarias.

i) Su tiempo de vida útil varía de 5 a 10 años dependiendo de sus propiedades químicas y físicas, así como de las condiciones de operación.

3. NOMENCLATURA

En el intercambio iónico se emplean algunos conceptos comunes:

Eficiencia nominal del intercambiador es el flujo de agua permitida por diseño del equipo y capacidad de la resina, para pasar por el intercambiador. Se expresa en unidades de volumen/unidades de tiempo.

Eficiencia del intercambiador es la eficiencia real permanente del intercambiador. Sus unidades son las mismas del concepto anterior.

Tiempo de corrida es el tiempo transcurrido entre regeneraciones de las resinas, es decir el tiempo de producción de agua tratada.

Periodo de operación es el tiempo de corrida más el tiempo empleado para la regeneración.

Cantidad de agua tratada es el volumen de agua tratada obtenido de la multiplicación de la eficiencia del intercambiador y el tiempo de corrida.

Capacidad de intercambio total es la cantidad de iones que son intercambiados durante el tratamiento. Se expresa en diversas unidades másicas, molares o atómicas como gramos como CaCO_3 .

Capacidad útil de intercambio es la fracción utilizable de la anterior, en función de las condiciones hidráulicas y químicas de cada caso particular.

Periodo de regeneración es el tiempo total que incluye el tiempo de retrolavado, regenerado y enjuague para cada unidad.

Agua de retrolavado es la cantidad de agua necesaria para eliminar finos y material extraño del lecho de resinas, así como también para uniformarlo.

Agua de enjuague es la cantidad de agua necesaria para remover el exceso de las sustancias químicas regenerantes.

Nivel de regeneración es la cantidad de regenerante necesario para realizar la regeneración por unidad de volumen de resina. La capacidad del intercambio depende del nivel de regeneración.

Nivel de fuga o punto de fuga es el momento en el cual la cama de resinas que aún no está saturada, ha llegado a ser tan delgada que los iones no deseados pasan a través de ella sin realizar el intercambio.

4. INTERCAMBIADORES CATIONICOS

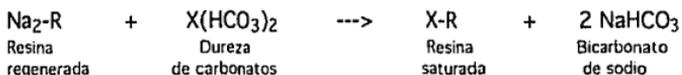
Los intercambiadores catiónicos son capaces de eliminar iones positivos del agua a tratar. Los procesos de intercambiadores catiónicos se dividen en procesos de ciclo sodio y en ciclo hidrógeno, dependiendo del químico con el cual se realice la regeneración.

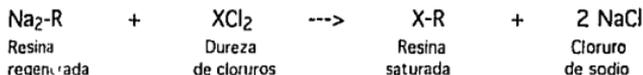
Se dividen en resinas catiónicas fuertemente y débilmente ácidas.

4.1 Resinas catiónicas fuertemente ácidas

En ciclo sodio, el intercambio se explica con las siguientes ecuaciones

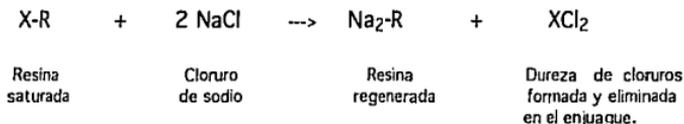
donde X representa los iones de calcio y magnesio; y R a la resina:





La regeneración de las resinas se realiza en cuatro pasos básicos:

El retrolavado que se realiza con la introducción del agua desde la base de la cama de resina hacia la parte superior y su objetivo es eliminar los finos y material no utilizable. La regeneración propiamente dicha se realiza en este ciclo con una solución de cloruro de sodio, conocida comunmente como salmuera. Las siguientes ecuaciones explican esta parte del proceso :



Y finalmente se realizan enjuagues (lento y rápido) hasta que la dureza del agua alcance el valor requerido.

Aplicaciones: Se utiliza principalmente para el ablandamiento del agua, es decir para eliminar la dureza (causada por iones calcio y magnesio), para el tratamiento del agua para calderas a presiones media y baja, circuitos de refrigeración, industria textil, plantas termoeléctricas, cervecerías.

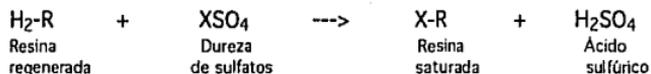
En ciclo hidrógeno tienen la capacidad de eliminar cationes y ceder iones de hidrógeno formando los ácidos correspondientes. Su proceso se explica con las siguientes ecuaciones:



Resina regenerada Dureza de cloruros Resina saturada Ácido clorhídrico

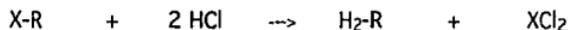


Resina regenerada Dureza de carbonatos Resina saturada Ácido carbónico que se elimina por aereación

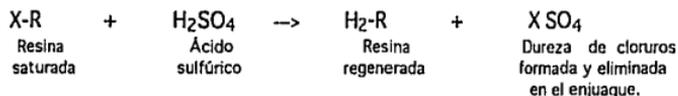


Resina regenerada Dureza de sulfatos Resina saturada Ácido sulfúrico

La regeneración se realiza con ácido sulfúrico o clorhídrico normalmente:



Resina saturada Ácido clorhídrico Resina regenerada Dureza de cloruros formada y eliminada en el enjuague.



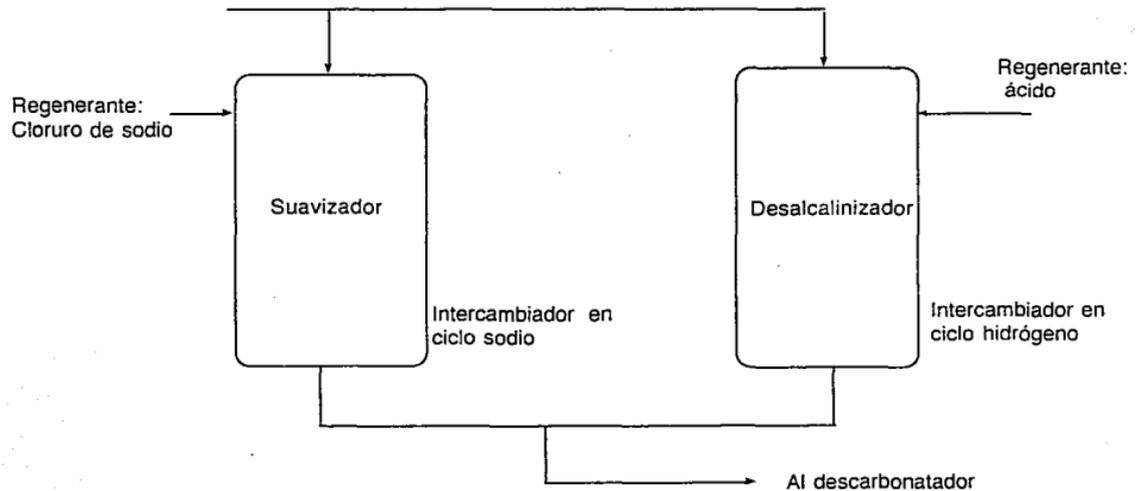
Resina saturada Ácido sulfúrico Resina regenerada Dureza de cloruros formada y eliminada en el enjuague.

Aplicaciones: Se emplea principalmente para reducir la alcalinidad del agua, al formar los ácidos correspondientes. En sistemas de suavización del agua con alimentación de sosa cáustica para neutralizar los ácidos minerales en el efluente.

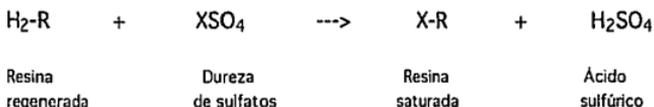
El ciclo hidrógeno- sodio consiste en operar intercambiadores en ambos ciclos en forma paralela. Las corrientes parciales se ajustan de manera que los ácidos minerales, provenientes del intercambiador en ciclo hidrógeno, se neutralicen con el bicarbonato de sodio, proveniente del intercambiador en ciclo sodio, como se representa en el siguiente ejemplo:

INTERCAMBIADOR DE CATIONES FUERTEMENTE ÁCIDO

Ciclo Hidrógeno - Sodio



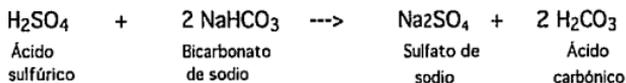
Ciclo hidrógeno



Ciclo sodio



Ciclo hidrógeno-sodio



El flujo se divide entre intercambiadores de iones de sodio e hidrógeno por medio de un control de mezclado ajustado con la ayuda de indicadores medidores de flujo en cada una de las corrientes.

Aplicaciones: Se emplean generalmente como suavizadores del agua.

4.2 Resinas catiónicas débilmente ácidas

Las resinas de intercambio de cationes débilmente ácidas pueden intercambiar los cationes de los ácidos débiles únicamente en ciclo hidrógeno. El agua tratada con esta resina tiene una reducción de carbonatos pero contiene dureza no carbonatada así como sales neutrales:



Este tipo de resinas proporcionan, durante la primera parte de su operación agua débilmente ácida y su capacidad disminuye con la presencia del bicarbonato de sodio si se encuentra en una concentración del 50% del total de carbonatos de hidrógeno.

Aplicaciones: Se utilizan principalmente para la reducción de la dureza carbonatada por ejemplo, en el tratamiento de agua de enfriamiento.

5. INTERCAMBIADORES ANIÓNICOS

Los intercambiadores aniónicos son capaces de eliminar iones negativos del agua a tratar. Los hay de base débil que contienen en sus estructuras grupos de aminas secundarias o terciarias y los de base fuerte con aminas cuaternarias.

5.1 Resinas de intercambio de aniones débilmente básicas

Los intercambiadores de aniones de base débil son capaces de eliminar ácidos minerales fuertes como el clorhídrico, sulfúrico y nítrico.

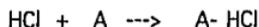
Intercambio catiónico fuértemente ácido

Entrada	Acumulación	Salida
CaCl ₂ MgCl ₂ NaCl CaCO ₃ MgCO ₃ NaHCO ₃ Ca(HCO ₃) ₂ Mg(HCO ₃) ₂ NaNO ₃ Ca(NO ₃) ₂ Mg(NO ₃) ₂ CaSO ₄ MgSO ₄ Na ₂ SO ₄	Ca ⁺² - R Mg ⁺² - R Na ⁺¹ - R	HCl $H_2CO_3 \rightleftharpoons H_2O + 2CO_2$ HNO ₃ H ₂ SO ₄

Intercambio catiónico débilmente ácido

Entrada	Acumulación	Salida
CaCO ₃ MgCO ₃ NaHCO ₃ Ca(HCO ₃) ₂ Mg(HCO ₃) ₂	Ca ⁺² - R Mg ⁺² - R Na ⁺¹ - R	$H_2CO_3 \rightleftharpoons H_2O + 2CO_2$

La reacción típica aparenta ser un proceso de adsorción más que un proceso de intercambio:

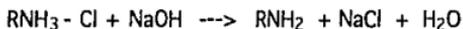


donde A representa un intercambiador de aniones.

El intercambio de estas resinas se representa en las siguientes ecuaciones:



La regeneración se realiza normalmente con sosa cáustica:



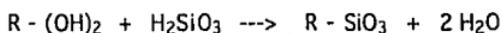
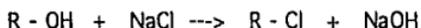
Aplicaciones: Se utilizan principalmente para remover cloruros, sulfatos y nitratos, mientras que no intercambian ácidos minerales débiles a excepción de un intercambio parcial del ácido carbónico. Se emplean únicamente en conjunto con intercambiadores de cationes fuertemente ácidos. El agua tratada con estas unidades está desmineralizada, sin embargo contiene sílice y el contenido de ácido carbónico va aumentando al irse agotando las resinas.

5.2 Resinas de intercambio de aniones fuertemente básicas

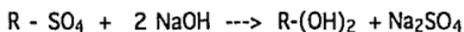
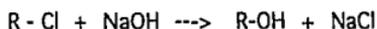
Los intercambiadores de base fuerte son verdaderos materiales para intercambio iónico por lo tanto intercambian aniones de ácidos minerales

fuertes pero también a los ácidos minerales débiles tales como el carbónico y silícico.

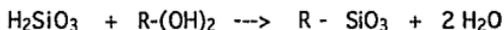
El intercambio de estos materiales se representa en las siguientes ecuaciones:



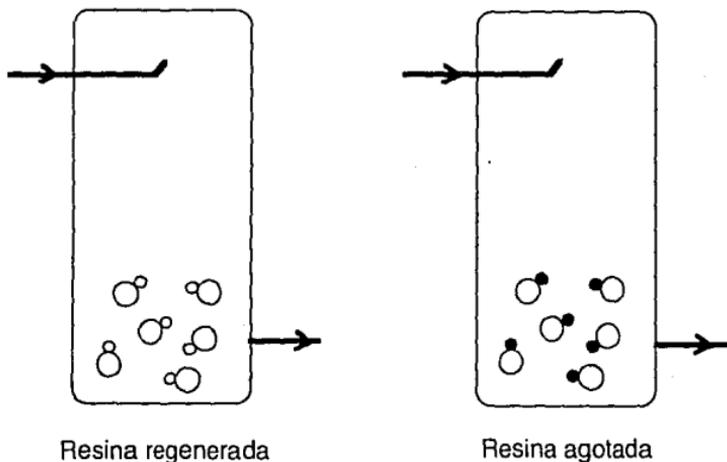
Para su regeneración se emplea generalmente sosa cáustica:



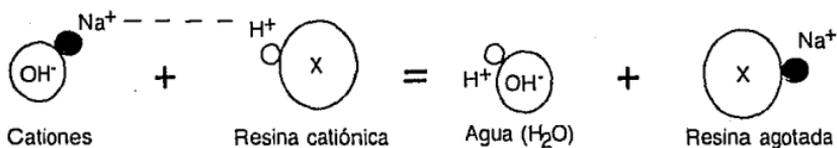
Aplicaciones: Se utilizan principalmente para la desacidificación y remoción de ácido silícico del agua desalcalinizada proveniente de intercambiador de cationes.



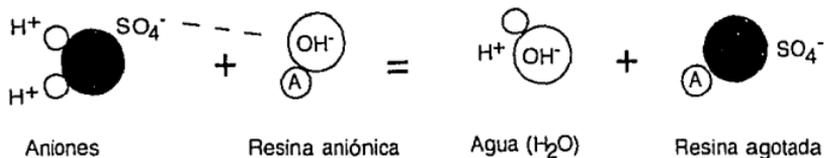
Ciclo de una resina de intercambio iónico



Resinas catiónicas



Resinas aniónicas



6. BASES DE DISEÑO

Las bases de diseño son generales para los materiales de intercambio iónico.

La capacidad del intercambiador se calcula con la ecuación,

$$Q \cdot L \cdot X = R \cdot UVC$$

donde:

Q = Flujo de agua que se va a tratar en unidades de volumen por tiempo.

L = Tiempo de corrida

X = Iones que se van a eliminar, en el caso de resinas catiónicas fuertemente ácidas en ciclo sodio equivale a la dureza total, en ciclo hidrógeno son los cationes totales, para las resinas catiónicas débilmente ácidas corresponde a la dureza de carbonatos. para las resinas aniónicas fuertemente básicas se refiere a los aniones totales y finalmente para las resinas aniónicas débilmente básicas corresponde a la dureza aniónica. Se expresa en unidades de concentración.

R = Cantidad de resina de intercambio iónico en volumen.

UVC = Capacidad de volumen utilizable de la resina de intercambio en unidades de peso molecular o equivalente por volumen del material de intercambio.

Para ejemplificar el análisis dimensional y familiarizarnos con las unidades más comunes se tiene:

$$Q (\text{m}^3/\text{h}) \cdot L (\text{h}) \cdot X (\text{g como CaO}/\text{m}^3) = R (\text{m}^3) \cdot UVC (\text{g como CaO}/\text{m}^3)$$

$$\frac{\text{m}^3}{h} * h * \frac{\text{g como CaO}}{\text{m}^3} = \text{m}^3 * \frac{\text{g como CaO}}{\text{m}^3}$$

para calcular la eficiencia de intercambio (EI) se emplea la siguiente ecuación:

$$EI = R * UVC / X \quad \text{en unidades de volumen (m}^3\text{)}$$

y la cantidad de resina necesaria se calcula:

$$R = X * Q * L / UVC \quad \text{en unidades de volumen (m}^3\text{)}$$

Para el proceso de regeneración, la cantidad de regenerante depende de la naturaleza de las resinas:

Las resinas catiónicas fuertemente ácidas en ciclo sodio requieren cerca del 250 al 300 % de los requerimientos teóricos de cloruro de sodio con una concentración del 8 al 15 % .

En ciclo hidrógeno se requiere del 250 % del valor teórico el cual se calcula de la siguiente forma cuando se emplea ácido clorhídrico:

$$\text{HCl (g/m}^3\text{)} = (36.5 / 28) * X$$

donde X se refiere a cationes totales en g como CaO/m³ y la concentración que se recomienda es del 5 al 8 % . Y cuando se emplea ácido sulfúrico a una concentración del 1 al 4 % se calcula de forma similar:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (g/m}^3\text{)} = (60/28) * X$$

Las resinas catiónicas débilmente ácidas requieren de ácido clorhídrico al 2% ó ácido sulfúrico al 1% y generalmente se necesita del 100 al 110% del

teórico.

Las resinas de intercambio de aniones fuertemente básicas requieren en la práctica de 300 a 400% del valor teórico el cual se calcula como:

$$\text{NaOH (g/m}^3\text{)} = X \text{ (g como CaO/m}^3\text{)} * 1.43$$

donde X representa los aniones totales.

Las resinas de intercambio débilmente básicas requieren del 150 al 180% del valor teórico el cual se calcula con la misma ecuación pero donde X representa la dureza aniónica.

7. ARREGLOS DE UNIDADES DE INTERCAMBIO IÓNICO

1. Sistema con unidades de intercambio de cationes fuerte y débilmente ácidas.

Si se utiliza el intercambiador de cationes fuertemente ácido únicamente, se removerán todos los cationes pero para regenerar se necesitara un 250% del valor teórico de regenerante. Cuando se combina con un intercambiador de cationes débilmente ácido, se remueven los cationes de bicarbonatos en forma separada, reflejando esto en una necesidad del valor teórico de regenerante, es decir, un ahorro en las regeneraciones.

2. Sistemas con unidades de intercambio de aniones fuerte y débilmente básicas.

Si se remueven todos los aniones en un intercambiador fuertemente básico, la cantidad de regenerante será de 300 a 400% del valor teórico pero si se

combina con un intercambiador débilmente básico, en el cual los aniones de ácidos minerales fuertes son removidos, se necesitará únicamente un 180% del valor teórico de regenerante. Esto reduce el costo total de regenerantes y además elimina todos los aniones del agua cruda.

3. Sistema con dos unidades de intercambio de cationes fuertemente ácido.

Un arreglo con dos unidades de cationes fuertemente ácidas y con su sistema de regeneración en direcciones opuestas, se utiliza en plantas desmineralizadoras cuando el agua natural contiene grandes cantidades de sal o cuando con una sola unidad tiene una fuga muy alta de sodio.

La cantidad de resina de intercambio se calcula como se ha visto anteriormente y se distribuye en partes iguales en los dos contenedores.

A diferencia de un sistema con una sola unidad, donde los iones de calcio y magnesio forman depósitos en las primeras capas y los iones como el sodio y potasio se depositan en las capas internas del lecho en este arreglo, se remueven los iones de calcio y magnesio en la primera unidad y los iones de sodio y potasio se remueven en la segunda. De esta forma la fuga de iones se reduce si se tiene especial cuidado en la regeneración de la última unidad. Para garantizar esta ventaja se recomienda regenerar con la cantidad total de ácido calculada para las dos unidades y pasar lo primero por la segunda columna y después por la primera. Esto implica que el segundo intercambiador se regenera excelentemente por el exceso de ácido. Además, la práctica demuestra que el exceso total de ácido clorhídrico, si es el que

se elige como regenerante, en el sistema de dos unidades se reduce al 80% en comparación con un sistema de una sola unidad donde se necesita un 150% de exceso.

Por otro lado el sistema con dos unidades tiene un 20% más de capacidad del material de intercambio iónico, porque en la regeneración, a la salida de la segunda unidad se tiene una mezcla de NaCl-HCl y el contenido de NaCl ayuda a remover los iones de calcio y magnesio de la primera unidad.

4. Lechos estratificados.

Son unidades con resinas de intercambio ya sea catiónico o aniónico, en las cuales se tienen resinas de intercambio fuerte y débilmente ácido o básico respectivamente. Estos lechos representan la solución más económica para regenerar a contracorriente, porque las resinas débilmente ácidas o básicas tienen capacidades más altas que las fuertemente ácidas o básicas y necesitan menos volumen de regenerante.

5. Lecho mixto o mezclado.

Son unidades que constan de resinas de intercambio de cationes fuertemente ácidas y fuertemente básicas, las cuales se encuentran mezcladas durante la operación. En estos lechos se da una desionización de múltiple efecto, funcionando cada par de resinas contrastadas, como una etapa del tratamiento. Esto produce un efluente de muy baja concentración iónica, superior al obtenido mediante operación convencional de dos lechos.

Cuando las resinas se han agotado, se retrolava el lecho y la diferencia en

densidades produce una separación bien definida en las dos capas, con un estrato relativamente estrecho en el que se presenta algo de mezcla. Los contenedores se equipan con ventanillas transparentes a través de las que el operador puede observar este fenómeno. Después de la separación hidráulica, se introducen los regenerantes. Entonces se enjuaga el lecho y se mezclan las resinas mediante inyección de aire al fondo del contenedor.

8. EQUIPO Y APLICACIONES

Existen diferentes sistemas de intercambio iónico que pueden ser empleados en la industria. La selección de ellos dependerá de la calidad del influente, las especificaciones para el efluente y la economía de operación.

1. Desionización por lecho mezclado. Consta de un solo intercambiador y se emplea generalmente cuando el agua cruda tiene bajo contenido de sales, la capacidad del sistema también es baja y representa un bajo consumo de regenerantes.

2. Desionización con remoción de sílice y ácido carbónico por el cambiador aniónico. Consta de dos intercambiadores, uno catiónico fuertemente ácido en ciclo hidrógeno y otro aniónico fuertemente básico.

3. Desionización convencional sin remoción de sílice. Consta de un intercambiador catiónico fuertemente ácido en ciclo hidrógeno y seguido por un cambiador aniónico débilmente ácido y finalmente un desgasificador de tiro forzado o vacío.

4. Desionización de etapas múltiples para tratar influentes altamente

mineralizados para producir efluentes de alta calidad. Consta de un intercambiador fuertemente ácido en ciclo hidrógeno, un cambiador aniónico débilmente básico, otro cambiador fuertemente ácido en ciclo hidrógeno, un cambiador aniónico débilmente básico y por último un desgasificador. Con este sistema se obtiene un contenido iónico muy bajo en el efluente y se emplean los mismos materiales en desionización.

5. Desionización con remoción de ácidos fuertes por cambiador de aniones débilmente básico regenerado con sosa en escamas, ácido carbónico como

CO₂ y sílice por cambiador fuertemente básico regenerado con sosa cáustica. Consta de cuatro unidades, un cambiador catiónico en ciclo hidrógeno, un cambiador aniónico débilmente básico, un desgasificador y un cambiador aniónico fuertemente básico.

6. Desionización con remoción de ácido carbónico como dióxido de carbono y supresión de sílice por el cambiador aniónico.

Consta de un cambiador catiónico fuertemente ácido en ciclo hidrógeno seguido por un desgasificador y un cambiador aniónico fuertemente básico. Se emplea para el agua de alimentación de calderas principalmente.

Otras opciones incluyen cambios en el diseño, como la regeneración a contracorriente y la reducción de la carga sobre el sistema de intercambio iónico mediante tratamiento previo. Muchas son las posibilidades que tiene el ingeniero de diseño para reunir unidades individuales de un sistema de

desmineralización con objeto de adecuarse al tipo de agua cruda procesada, la economía de la operación de la planta y la calidad última requerida por el uso de proceso.

Finalmente, en la preparación de agua ultrapura, se emplean diseños especiales de intercambio iónico donde el material de intercambio se encuentra en forma de cartuchos desechables.

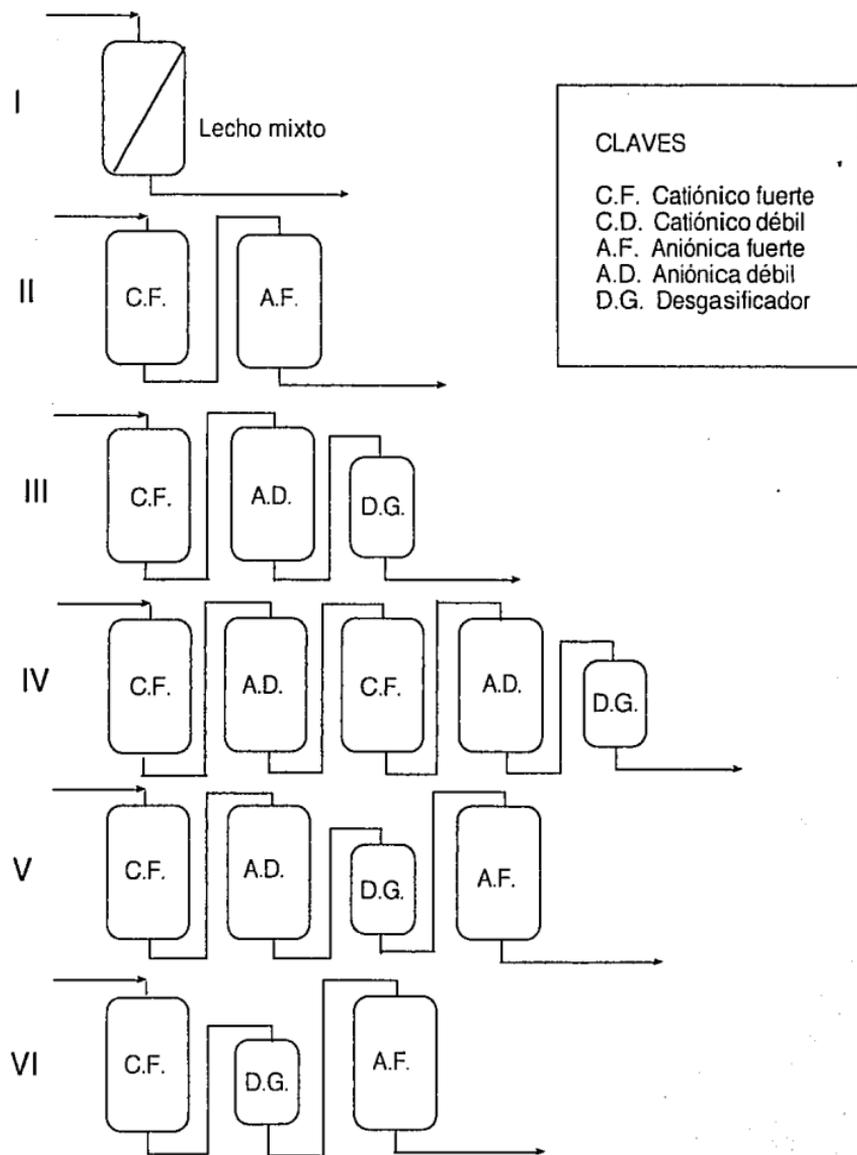
Por otro lado el uso de desgasificadores tiene grandes ventajas económicas, ya que originalmente la remoción de ácido carbónico, que se produce en el intercambiador de cationes, se realiza en el intercambiador de aniones fuertemente básico, pero las necesidades de regenerante aumentan y de esta forma, con un desgasificador colocado previo al intercambiador de aniones, aumenta la capacidad de intercambio y disminuye el regenerante necesario.

9. VARIACIONES EN EL PROCESO

9.1 Regeneración a contracorriente

Con el proceso de regeneración normal, los regenerantes pasan a través del intercambiador en la misma dirección con la que pasa el agua cruda. Lo que sucede en la regeneración convencional es que la carga de resina recién regenerada por aniones o cationes se sitúa, en primera instancia, en las capas superiores del intercambiador y van colocándose hacia abajo durante la operación.

Sistemas de intercambio iónico



Debido a las diferentes afinidades en la cama de resina, se forman ciertas capas, empezando por la parte superior hacia la parte inferior.

La regeneración a contracorriente se puede presentar en dos diseños diferentes:

1. Flujo de servicio hacia arriba e inyección de los productos químicos a contracorriente hacia abajo, seguida de un enjuague en la misma dirección, pero no se retrolava dentro de la unidad, de modo que periódicamente (después de 50 a 100 ciclos) la resina deberá extraerse de la unidad, limpiarse en un recipiente aparte y regresarla al sistema. Para este proceso se requiere un abastecimiento de agua clara, es decir, de turbidez baja.

2. Flujo de servicio hacia abajo y el de regeneración de abajo hacia arriba, con un espacio libre en la parte superior para efectuar las regeneraciones.

En un proceso a contracorriente el regenerante limpio pasa al principio por las capas inferiores del lecho de resinas y posteriormente atraviesan las capas más agotadas, por lo tanto la fuga de iones es menor que utilizando el proceso convencional.

La principal desventaja de regeneración convencional es que los iones de las capas más agotadas pasan a través de todas las demás capas de resina, pasando por capas que probablemente no se encuentran agotadas.

**Comparación entre las regeneraciones
a corriente paralela y a contracorriente**

Factor operante	Corriente paralela	Contracorriente
<u>Regeneración</u>		
Ácido (lb/pie ³)	6.0	3.7
Concentración	2% y 4%	2%
<u>Capacidad</u>		
Kgr/pie ³	7.7	14.5
lbs H ₂ SO ₄ /Kgr	0.78	0.26
<u>Regeneración</u>		
Consumo de ácido, como porcentaje del teórico	520 %	170 %

9.2 Proceso a contrapresión hidráulica

Consiste en introducir aire comprimido al interior de lecho de resinas o agua por la parte superior con una salida de drenado 10- 20 centímetros abajo de la superficie de la cama de resinas. Los regenerantes se suministran por la parte inferior hacia la superior sin tener que esperar que el material de intercambio sea reagrupado. El enjuague del exceso de regenerantes se realiza nuevamente bajo contrapresión dinámica; recordando que se recomienda que el agua utilizada para enjuagar los intercambiadores catiónicos debe estar desalcalinizada y para los intercambiadores aniónicos agua desmineralizada.

9.3 Proceso de lecho fluidizado

El contenedor de la cama suspendida cuenta con dos platos. El agua atraviesa durante la operación de la parte superior hacia la inferior. Una cantidad considerable del material de intercambio se deposita como una cama compuesta sobre el plato, mientras la otra cantidad permanece en suspensión. Si la cama de lecho fluidizado se pone fuera de operación para que sera regenerada, la cama compuesta se desliza hacia abajo, casi compacta sin reagruparse. Después de la regeneración la parte superior de la cama de resinas regresa a su posición sin reagruparse.

" En los últimos años, los aspectos económicos y consideraciones del medio ambiente han recibido mayor atención. Esto ha dado lugar a emplear la regeneración a contracorriente en el proceso de intercambio iónico,

reduciendo la cantidad de regenerante necesario para encontrar el punto adecuado de fuga de iones. El incremento del uso de lechos mixtos también ha hecho posible realizar regeneraciones con la corriente normal pero con niveles de regenerantes mucho menores a los requerimientos del proceso típico con dos camas separadas.

Otra propuesta para una operación eficiente de una planta de intercambio iónico consiste en reciclar parte del regenerante empleado lo que representa un ahorro de químicos. Para llevar a cabo estos ahorros en químicos, se necesita tener un conocimiento certero de la composición del regenerante empleado así como su desplazamiento a través de la columna de intercambio. Esto requiere de una cantidad considerable de trabajo analítico y localizar donde ocurren las bandas. La posición de estas bandas en el regenerante empleado se controla por medio de las condiciones de operación durante la regeneración." (Ultrapure Water, et.al. oct 93)

10. DESIONIZACIÓN CONTÍNUA

10.1 El proceso

La desionización continua es un proceso que combina resinas de intercambio iónico y membranas con electricidad para desionizar el agua. Un sistema de desionización continua consiste en muchos compartimientos de flujo, formados por membranas de intercambio aniónico, intercambio catiónico y separadores.

El elemento básico que se repite, llamado " celda paralela" consiste de un compartimiento de concentración de iones y un compartimiento de dilución. Ambos compartimientos se comunican a través de membranas permeables ya sea a cationes o a aniones. El compartimiento de dilución contiene un lecho mixto de resinas de intercambio iónico.

Los pasos del proceso son:

1. Alimentación de agua a los compartimientos de dilución y de concentración en paralelo.
2. Las resinas capturan los iones disueltos.
3. Una corriente eléctrica provoca la captura de cationes a través de las membranas y resinas catiónicas e igualmente la captura de aniones por las membranas y resinas aniónicas.
4. Las membranas, permeables a los cationes, los transportan fuera del compartimiento de resinas, pero no así con los aniones. El agua no atraviesa la membrana.
5. Las membranas, permeables a los aniones, los transportan fuera del compartimiento de resinas, pero no así a los cationes.
6. La corriente del concentrado acumula los iones del agua.
7. El agua pura se obtiene del sistema.

Mientras el agua dentro del compartimiento de dilución va disminuyendo su concentración de iones, el voltaje de la corriente eléctrica disocia el agua en iones hidrógeno y en iones hidroxilo, los cuales regeneran las resinas de

intercambio iónico. Por lo tanto, la desionización se lleva a cabo normalmente con la cama de lecho mixto, pero con la ventaja de que no necesita regenerarse con productos químicos.

De esta forma, contando con el lecho mixto de resinas con regeneración continua, la desionización continua puede producir agua desionizada con una conductividad de 18 ó menos micromhos por centímetro.

La clave del proceso es el uso de resinas de intercambio iónico en el compartimiento de dilución. Las resinas son conductoras de electricidad bajo una diferencia de potencial. La conductividad eléctrica varía por la movilidad de los iones y la afinidad de las resinas hacia los iones que las rodean. En general los iones tienen mayor orden de magnitud de conductividad en una resina de intercambio iónico que en el agua.

Mientras se va desionizando el agua, su resistencia eléctrica va aumentando. En algunas ocasiones, es posible una transferencia de corriente solo por la presencia de resinas de intercambio iónico. La desionización continua puede utilizarse como tratamiento único o se puede combinar con ósmosis inversa o intercambio iónico.

"Esencialmente, la desionización continua o electrodesionización es una modificación de la electrodiálisis convencional, con resinas de intercambio iónico en los compartimientos de la electrodiálisis" (Ultrapure Water, et.al. jul/aug 94).

10.2 Diseño de los compartimientos

La cantidad de celdas paralelas varía entre 30 y 120, con sus respectivos electrodos para que pueda realizarse la desionización continua. Las celdas y sus electrodos se colocan en arreglo vertical, espaciadores empacados separan las hojas de las membranas y el paquete completo se sostiene con varas atadas. La tubería múltiple interna distribuye la alimentación a los compartimientos apropiados y remueve el producto y concentrado obtenidos. Es indispensable regular a un flujo uniforme para evitar fugas internas, principalmente el flujo que va del concentrado al compartimiento de dilución.

Las unidades de desionización continua están disponibles para flujos de 5 a 30 gpm. Estas unidades pueden configurarse en paralelo para dar una capacidad de 100 gpm o más: los sistemas industriales pueden diseñarse por flujos mayores.

La cantidad de energía eléctrica necesaria para el proceso de desionización continua depende del flujo dentro de cada compartimiento y la concentración de sales a la entrada y a la salida:

$$I = \frac{Q * F * (N_f - N_e)}{n \text{ (eff)}}$$

donde: I = Intensidad de corriente en ampers

Q = Flujo interno en cada compartimiento

F = Constante de Faraday

N_f = Concentración de sales a la alimentación, en equivalentes/ml

N_e = Concentración de sales a la salida, en equivalentes/ml

n = Número de celdas

eff = Eficiencia de la corriente

donde se puede obtener el potencial como $P = I^2 R_e$ en Watts. R_e es la resistencia de cada conjunto y depende de la conductividad de la solución a tratar, la forma iónica de las resinas de intercambio en los compartimientos de dilución y la resistencia de los componentes del conjunto (membranas, espaciadores y resinas).

"Un área donde la tecnología de la electrodesionización está ganando campo es en la producción de agua altamente pura para plantas de fuerza nuclear y petroquímica". (Ultrapure Water, et.al. jul/aug 94)

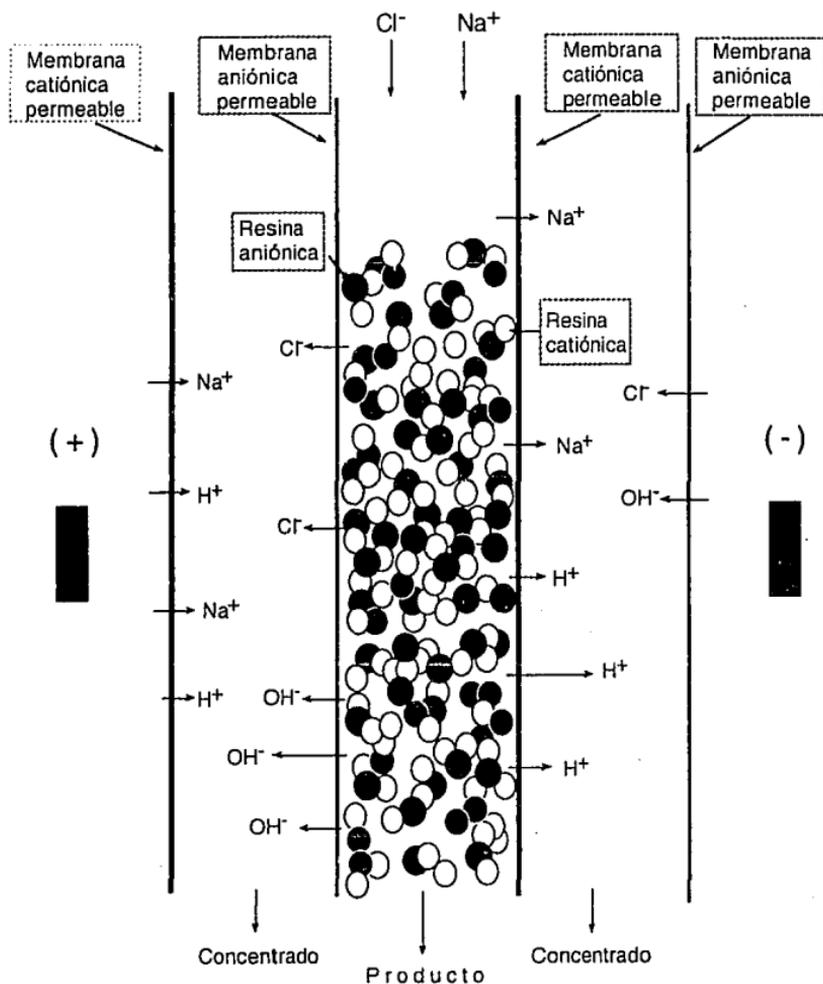
11. APLICACIONES ESPECIALES DEL INTERCAMBIO IONICO

El intercambio iónico se ha empleado ampliamente en las diferentes industrias, de las cuales se describen a continuación algunos casos especiales.

11.1 Industria Nuclear

El desarrollo del diseño de calentadores supercríticos, particularmente para usarse en las estaciones de fuerza nuclear, ha dado como resultado la necesidad de contar con agua cada vez más pura.

Desionización Continua



Para cubrir estas necesidades, se ha desarrollado la tecnología del material de intercambio iónico. Un buen diseño de ingeniería junto con la elección adecuada de resinas y el uso de la regeneración a contracorriente, producirán agua con la calidad y especificaciones del proceso.

11.2 Industria de los microprocesadores

Dentro de la producción de microprocesadores, con el desarrollo de la electrónica, se necesita trabajar en condiciones absolutamente puras, para almacenamiento, limpieza y producción de las pequeñas piezas de los circuitos integrados: por lo tanto se requiere tener agua con una conductividad prácticamente de cero. Para cubrir estas especificaciones se necesitan resinas especiales de intercambio iónico que son particularmente regeneradas y con una calidad excepcionalmente buena.

11.3 Concentración de sustancias químicas

11.3.1 Extracción de uranio.

En la extracción de uranio, el mineral que lo contiene se hace polvo y el metal se obtiene por extracciones químicas. Las soluciones obtenidas contienen bajas concentraciones de uranio junto con muchas impurezas. Una resina de intercambio fuertemente básico extrae selectivamente los complejos de uranio. El líquido obtenido en la regeneración contiene varios gramos de uranio por litro. Esto ofrece una forma más económica para obtener el uranio, que los tratamientos directos sobre la solución original

que resulta de la extracción.

11.3.2 Extracción de vitaminas y antibióticos.

Las vitaminas y antibióticos se extraen generalmente del caldo de la fermentación, con resinas de intercambio iónico, las cuales tienen la misma microestructura y son materiales adsorbentes y completamente inertes. Por ejemplo la estroamicina se concentra en un intercambiador de cationes débilmente ácido y la penicilina en un intercambiador de aniones.

11.4 Purificación

La desmineralización y ablandamiento son procesos similares a los descritos para el tratamiento de agua. Sin embargo, las soluciones orgánicas, que se desean purificar, son generalmente sustancias coloridas, por lo que hace necesario realizar una decoloración. Para esta operación son efectivas las resinas de base débil, ya que desmineralizan y eliminan color. La elección de las resinas depende de la concentración y tipo de las sustancias que aportan color. Otro proceso importante de purificación es la decoloración de mieles y jarabes de azúcar de caña. Las propiedades de intercambio iónico y de adsorción, son las más efectivas para la remoción de color y desmineralización parcial, cuando son necesarias, dando altos porcentajes de decoloración en un gran número de operaciones.

C A P Í T U L O III

TÉCNICAS DE FILTRACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de filtración, como su nombre lo dice, son los tratamientos que se basan en una separación a través de un medio filtrante.

De acuerdo a este medio filtrante se tiene una gran diversidad de procesos. Para el tratamiento de agua se clasifican de acuerdo al espectro de filtración:

- a) Macrofiltración
- b) Microfiltración
- c) Ultrafiltración
- d) Nanofiltración
- e) Ósmosis Inversa (hiperfiltración)

Como tratamientos terciarios se utiliza la ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

2. FILTRACIÓN DIRECTA

La filtración directa consiste en hacer pasar un fluido a través de un medio filtrante en dirección perpendicular. Este tipo de filtración se divide en macrofiltración y microfiltración.

La macrofiltración separa partículas que son visibles al ojo humano y

algunas observables con el microscopio óptico, es decir, partículas desde 1.3 hasta 1000 micras aproximadamente. Se aplica generalmente en procesos donde solo se desean remover partículas grandes.

La microfiltración es un tratamiento que se lleva a cabo a baja presión y puede separar partículas de 0.2 hasta 2 micras de diámetro. Se aplica en la separación y purificación de fluidos, en un nivel macromolecular. Como filtros pulidores se emplean en el pretratamiento de otros procesos como la ultrafiltración y ósmosis inversa y también como parte final de tratamientos para producir agua para industrias de bebidas, industrias electrónicas y otras plantas. Estos filtros constan de un contenedor en acero inoxidable y el cartucho, que es el medio filtrante. Los materiales y diseños de cartuchos son muy diversos y va surgiendo nueva tecnología de acuerdo a las necesidades del mundo actual: se distinguen principalmente por el tamaño de poro de su estructura y se clasifican en absolutos y en nominales. Los absolutos son aquellos que retienen al 100% las partículas mayores al tamaño de micra del diámetro de sus poros y su filtración es de superficie mientras que los nominales tienen un porcentaje menor al 100% pero su filtración es de profundidad por lo que pueden retener partículas de tamaños menores al que está referido este filtro.

" El tamaño de poro en los filtros de profundidad se entiende que es nominal, lo cual significa que una fracción, normalmente del 10-20 % de las partículas del tamaño de poro, pasaran a través del filtro. De esta forma,

cerca de una de cinco partículas del tamaño de poro no serán filtradas. El tipo de filtro de profundidad más común es el cartucho encordado de algodón natural o hilado de polímero con su soporte de metal o de polímero hueco.

Un filtro absoluto, por el otro lado, utiliza normalmente membrana delgada de celulosa, polímeros o materiales metálicos con un tamaño de poro controlado tanto en tamaño como en distribución. En este caso el tamaño de poro del filtro especifica que partículas mayores que este tamaño no atravesarán la membrana debido al control en el tamaño de los poros. " Water Conditioning & Purification, et. al. may 94).

3. FILTRACIÓN TANGENCIAL

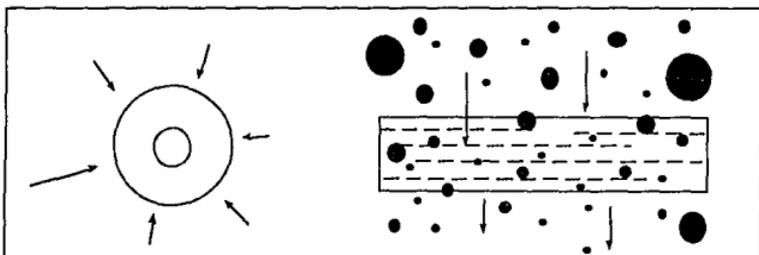
La filtración que se ha mencionado hasta ahora es una filtración directa pero también se tiene la filtración cruzada o tangencial. La primera es una filtración donde el flujo del fluido está en forma perpendicular al medio filtrante y en la filtración cruzada se encuentra en forma paralela con la ventaja de tener una duración más larga debido a que se disminuye la obstrucción de la membrana.

" Probablemente no hay mejor inversión que en el equipo que prepara adecuadamente el agua que será alimentada a un tratamiento con membranas porque es relativamente menos caro y proporciona grandes beneficios.

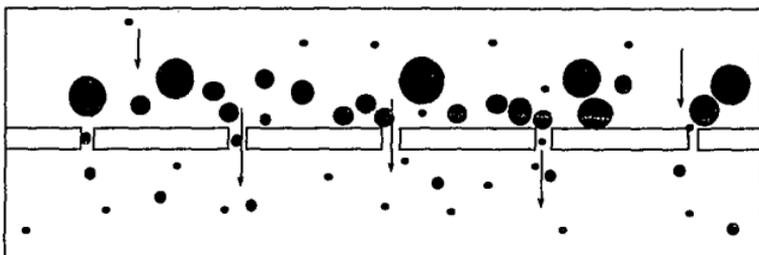
Los cartuchos que remueven material insoluble de alrededor de 5 micras son casi siempre indispensables.

Tipos de filtración

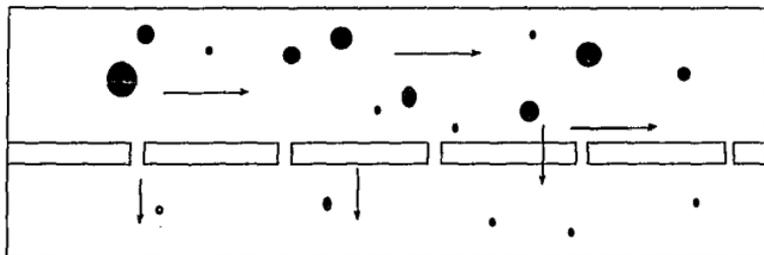
Filtración de profundidad



Filtración de superficie



Filtración de flujo cruzado



Los filtros multimedia que pueden eliminar turbiedad y oxidar metales como el hierro y manganeso eficientemente, se prefieren, así como el empleo de bombas para inyectar químicos, ácido o antincrustantes para mantener las sales solubles, o agentes controladores biológicos para prevenir el biotaponamiento. Dependiendo de la naturaleza del agua, otros equipos como clarificadores o filtros de carbón pueden ser apropiados.

Con un buen pretratamiento, las membranas de equipos de filtración tangencial soportarán no más que la carga para la cual fueron diseñadas. El resultado es un funcionamiento óptimo y una disminución de costos totales."

(Water Techonoly, et.al. sep 93).

La nanofiltración remueve partículas en un intervalo de 300 a 1000 de peso molecular. Ofrece un rechazo de sales preseleccionado, de la mayor parte de materia orgánica y si se compara con la ósmosis inversa, permite un flujo mayor con una presión menor que la presión osmótica. La nanofiltración es un proceso de filtración tangencial. En México no es muy conocida por lo que en la industria no es común su aplicación. A continuación se describe ampliamente el proceso de ultrafiltración que al igual que la ósmosis inversa, es un proceso que se han empleado en la industria mexicana con mayor aceptación cada vez. El siguiente capítulo se destinó a la ósmosis inversa debido a la extensión e importancia que tiene este proceso en el tratamiento de agua.

Características típicas de diversos tipos de carbón activado

Propiedad	Carbón activado en polvo	Carbón activado vegetal (madera)	Carbón activado mineral
Granulometría	90 % (malla 200) ó 50% (malla 323)	6 X 20 ó 14 X 35	8 X 30 (es el más utilizado)
pH	2 - 4, 6 - 8, 8 - 11	2 - 4	5 - 7
Humedad al envasar	12 %	12 %	10 %
Densidad aparente en gr / cc	0.25 - 0.28	0.22 - 0.25	0.37 - 0.40
Actividad relativa de melazas	98 - 99 %	99 %	97 %
Número de iodo	800	800 - 900	600 - 750
Actividad al azul de metileno	25	25	25
Solubles en agua (% max.)	4, 5, 7	3.5	2.0

Análisis obtenidos usando los métodos de la dirección general de normas 1992

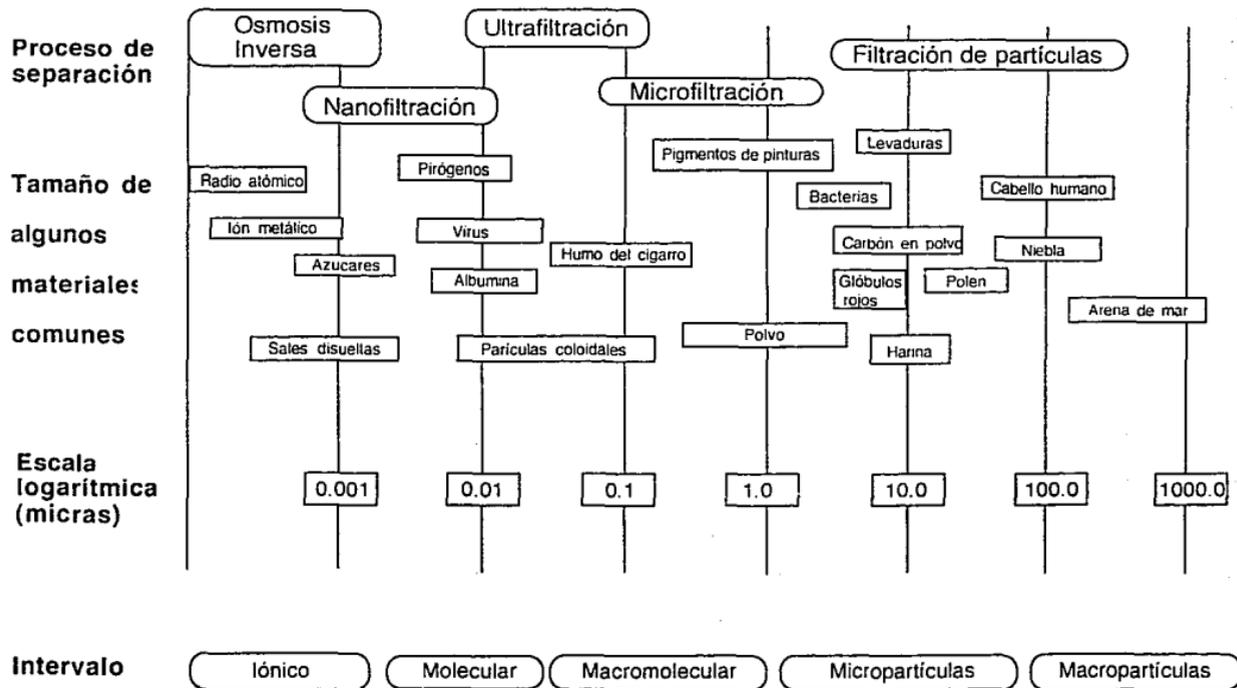
4. ULTRAFILTRACIÓN

4.1 Proceso de ultrafiltración

La ultrafiltración es una técnica de membrana que depende de una fuerza impulsora, presión y una membrana semipermeable: se utiliza para separar moléculas disueltas en una corriente de agua de acuerdo a su tamaño mediante un ultrafiltro, con poros de aproximadamente 0.13 a 0.002 micras. La membrana semipermeable, resistente y delgada, retiene la mayoría de las macromoléculas de cierto tamaño, mientras que permite que la mayoría de las moléculas menores, incluyendo el solvente, pasen al filtrado. Las moléculas muy pequeñas como los solventes, sales, aminoácidos y azúcares generalmente pasan a través de la membrana cuantitativamente. De este modo, la ultrafiltración produce una fracción retenida (retentato o concentrado) enriquecida en moléculas grandes y un filtrado (permeado) que posee pocas o ninguna de estas moléculas.

Dentro de las ventajas que presenta la ultrafiltración cabe destacar que remueve partículas microbiológicas y bacterias, no requiere de altas presiones (entre 80 y 100 psi), no requiere de sustancias químicas excepto para sanitización, es fácil de limpiar, puede remover partículas de alto peso molecular (cerca de 1000 de peso molecular), utiliza poco espacio físico para grandes volúmenes tratados.

Espectro de las técnicas de filtración



4.2 Membranas de ultrafiltración

La ultrafiltración tiene membranas que difieren en diseño y rendimiento a las membranas microporosas. A pesar de la existencia y ventajas de la configuración de la membrana, no se comprendieron sino hasta los años sesentas, cuando Loeb y Sourijan presentaron su trabajo y actualmente se consideran como los filtros más apropiados para retener una amplia gama de macromoléculas y brindar elevadas velocidades de flujo. Un filtro de este tipo consiste en una delgada película polimera o capa epidérmica unida y apoyada sobre un sustrato altamente poroso. El sustrato brinda resistencias y durabilidad al filtro, pero la delgada piel, es la verdadera membrana de ultrafiltración y se ubica hacia el filtrado. La capa epidérmica debe estar densamente estructurada para poder retener las moléculas, pero debido a que es muy delgada, la resistencia al flujo originada por la densidad estructural se ve reducida al mínimo. Como la capa epidérmica está soportada por una capa de sustrato porosa y muy abierta, las velocidades de flujo a través del filtro resultan elevadas. Los diferentes especialistas describen la estructura microscópica de la capa epidérmica de varias maneras, pero todos coinciden en que las moléculas y las partículas retenidas son rechazadas en la superficie de la membrana y no penetran dentro de la estructura porosa del sustrato. Debido al rechazo de superficie y a que el material que pasa a través de la capa epidérmica es, generalmente, mucho más pequeño que el diámetro de poro del sustrato, las membranas de capa epidérmica muy

excepcionalmente se obturan en forma irreversible. Esta resistencia a la obturación contrasta marcadamente con la susceptibilidad al taponamiento de los filtros de membrana microporosa.

Los filtros de membrana microporosa tienen asignado un valor de tamaño de poro absoluto y retendrán todas las partículas mayores que dicho diámetro de poro, mientras que a los ultrafiltros de capa epidérmica se les asigna un intervalo de valores y retendrán a la mayoría de las moléculas de dicho tamaño.

La habilidad de muchas macromoléculas disueltas de deformarse y pasar a través de aperturas estrechas así como la naturaleza compleja de la capa o piel retentiva, constituyen dos razones por las cuales se asignan límites nominales.

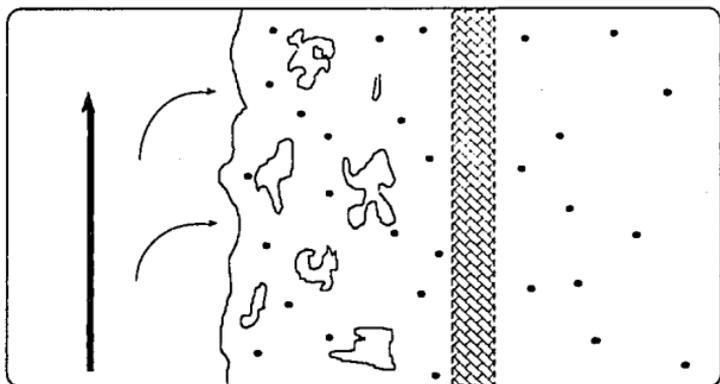
Además, debido a que estos filtros realizan la separación en escala de moléculas y no de partículas, las interacciones moleculares pueden afectar el proceso de modo que no se trata de un simple tamizado mecánico.

4.3 Aplicaciones

La ultrafiltración tiene una gran gama de aplicaciones de las cuales se mencionan las más importantes:

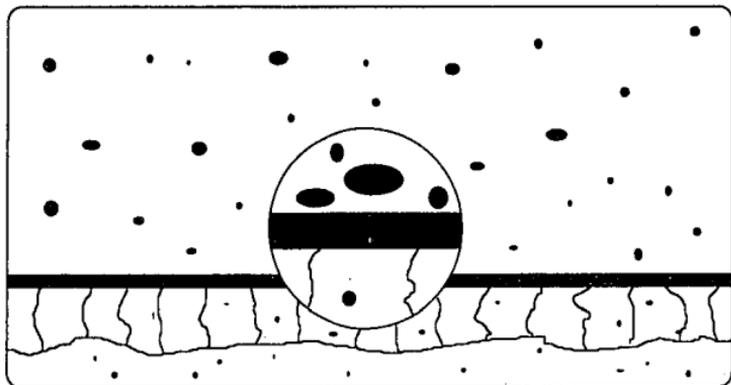
1. Eliminación de solventes y sales de una solución de macromoléculas, sin involucrar cambios de fase, temperaturas extremas o modificaciones en las condiciones iónicas, mientras retiene las macromoléculas.

Ultrafiltración



Representación gráfica de la ultrafiltración.

La membrana semipermeable permite el paso de moléculas pequeñas, mientras no permite que atraviesen las más grandes



Representación gráfica de la capa epidérmica

2. Separación de moléculas pequeñas de las más grandes que pasan a través del ultrafiltro, por ejemplo separar solutos de peso molecular mayor a 500 g/mol, con presiones osmóticas bajas y concentraciones moderadas.

3 .Fraccionamiento de mezclas de macromoléculas para efectuar estudios de enlace.

4. Concentración y desalado del suero de la leche y su fraccionamiento.

5. En el tratamiento de agua residual como sustituto para los espesadores, clarificadores y floculadores ya que se puede separar del agua, arcillas, materia vegetal y microorganismos.

6. Como un postratamiento del agua producida en el intercambio iónico y electrodiálisis.

7. Como un pretratamiento del agua para la ósmosis inversa.

" La tecnología de membranas delgadas para ultrafiltración fue extremadamente efectiva en la remoción de hierro en un sistema de enfriamiento secundario de Fort St. Vrain. El sistema de ultrafiltración no requería de un pretratamiento y tenía costos de operación y mantenimiento mínimos. . . Los elementos de ultrafiltración con membrana delgada se han aplicado eficientemente en la industria energética: 1) remueve sílica coloidal para alimentar calentadores de alta presión; 2) remueve materia orgánica, microorganismos y partículas en el pretratamiento de la ósmosis inversa; 3) remueve materia orgánica y partículas del agua residual de plantas de producción de energía; 4) como un sustituto costeable para el

tratamiento químico con cal para eliminar las partículas del agua." (Ultrapure Water, et. al. oct 93).

4.4 Eficiencia de retención

Los ultrafiltros presentan, como ya se mencionó anteriormente una retención nominal, por lo que deben considerarse diversos factores que afectan la capacidad de una molécula para pasar a través de un ultrafiltro y la eficiencia de retención para un soluto particular, la cual está determinada principalmente por el tamaño y la forma de las moléculas del soluto.

El peso molecular es una guía aproximada del tamaño molecular y por lo tanto, es posible caracterizar convenientemente los ultrafiltros por su retención porcentual de solutos seleccionados de pesos moleculares exactamente conocidos. De estos datos se puede asignar a cada membrana un límite de peso molecular nominal, abreviado como l_{pmn} , al cual y sobre el cual la mayoría de las especies son retenidas eficientemente por esa membrana. Sin embargo debe considerarse que el peso molecular no es un índice confiable, ya que mientras una molécula lineal de un peso determinado pasa a través de la membrana, otra molécula del mismo peso pero globular, no pasa por la misma membrana.

De esta forma, la ultrafiltración no constituye una técnica de alta resolución, sin embargo resulta de gran utilidad para ciertos tipos de fraccionamientos. Aquí cabe hacer una similitud con la filtración de profundidad donde también se habla de tamaño nominal y no absoluto.

Otros factores que deben considerarse son el medio iónico y el pH, ya que pueden alterar la conformación de una molécula de soluto o en algunos casos modificar las propiedades retentivas de la membrana. También pueden tener un efecto las interacciones entre moléculas de soluto o entre el soluto y los polímeros de la membrana.

4.5 Polarización de la concentración

La polarización de la concentración consiste en la formación de una capa de macromoléculas concentradas sobre la superficie de la membrana, que pueden reducir significativamente el flujo y alterar las características de retención del sistema. En algunos casos, la capa resulta bastante tangible y puede palparse como un lodo o gel sobre la membrana. La mayoría de los equipos para ultrafiltración proveen un sistema de agitación para dispersar la capa polarizada, pero mientras que la agitación puede reducir el problema, los efectos de la capa limitante no pueden ser eliminados en muchos casos, por lo tanto, para obtener los mejores resultados de la ultrafiltración, conviene comprender cuales son los efectos de la polarización de la concentración y como reducirlos a un mínimo.

4.5.1 Formación de la capa limitante

Cuando se coloca por primera vez una solución en un equipo de ultrafiltración, todas las especies del soluto se distribuyen uniformemente, a medida que se aplica presión a la muestra, el solvente y las pequeñas moléculas de soluto comienzan a moverse rápidamente a través de la

membrana; sin embargo, las macromoléculas, que no pueden pasar a través de ésta, se frenan sobre la superficie del filtro. Debido a que estos polimeros son grandes y por lo tanto lentos para difundirse nuevamente hacia la disolución, se acumulan en una capa concentrada sobre la membrana. En esta etapa, mientras se va formando la capa limitante, la velocidad del fluido está controlada por la permeabilidad de la membrana y por la presión aplicada. En este caso se dice que la filtración está controlada por la membrana. Si aumenta la presión, el flujo aumenta y por lo tanto la concentración de moléculas que se acumula en la capa limitante aumenta. En muchos casos se alcanza una concentración limitante cuando la capa macromolecular polarizada se torna tan concentrada que forma una película de gel semisólido. En este estado, la concentración de macromoléculas en la capa de gel deja de aumentar pero puede ocurrir una mayor acumulación de soluto por espesamiento de capa de gel.

4.5.2 Flujo gel-limitante

Una vez que la capa de gel ha formado una cobertura completa sobre la superficie de la membrana, el gel pasa a ser el factor limitante de la velocidad de flujo del filtrado. La resistencia de la capa limitante de la membrana y con ello la elección de ultrafiltro ya no afecta el flujo. En esta situación se dice que la ultrafiltración está gel-limitada y el flujo alcanza un nivel estable que resulta insensible a los aumentos de presión, es decir, para la filtración polarizada por gel, el flujo está controlado por la

velocidad a la cual el soluto retenido puede ser redistribuido de la capa limitante de regreso al seno de la solución. Por este motivo cualquier técnica que ayude a esta redistribución aumentará el flujo del filtrado.

Los flujos pueden verse afectados, además, por otras dos variables adicionales: la primera consiste en disminuir la concentración de soluto en la muestra y la segunda en aumentar la concentración a la cual la capa limitante se gelifica.

4.5.3 Flujo membrana-controlado

Aquí las condiciones gel-limitado no interfieren en la velocidad de la ultrafiltración y puede efectuarse en un espectro de condiciones que varía desde membrana-controlado hasta gel-limitante, debido a que la concentración limitante a la cual la capa limitante forma un gel, varía ampliamente para diferentes macrosolutos.

Un factor que determina la tendencia del soluto a formar una capa de gel durante la ultrafiltración, es la difusividad y depende del peso molecular y la conformación de la molécula.

De esta forma la ultrafiltración de membrana-controlada se presentará más probablemente con fluidos que contengan macromoléculas globulares que los fluidos con macromoléculas lineales.

A presiones y velocidades elevadas, muchas moléculas que tienden a formar gel, evitarán formar una capa de gel si se encuentra en concentraciones menores que 0.5 %.

Para identificar si la ultrafiltración será membrana controlada o gel-limitada se pueden efectuar una serie de filtraciones modificando la presión aplicada y midiendo el flujo de filtración. Con estos datos se traza una gráfica de presión contra flujo y se observa un comportamiento directamente proporcional a bajas presiones y posteriormente se ve un comportamiento de flujo constante, es decir, donde la presión ya no influye en la velocidad de la ultrafiltración, que es el punto en el cual el flujo se torna gel-limitado.

4.6 Parámetros para incrementar el flujo

Definitivamente los parámetros son diferentes en cada caso y ensayos en laboratorio los determinan eficientemente. Existen equipos pequeños que ayudan a realizar estas pruebas acercándose lo más posible a las condiciones de operación en planta.

4.6.1 Membranas

El flujo es generalmente más elevado en membranas más abiertas pero estas tienen un $lpmn$ mayor; en el caso de la ultrafiltración membrana-controlada la diferencia de permeabilidad afecta significativamente; de esta forma se debe evaluar entre el tamaño de poro de la membrana para aumentar el flujo y la aplicación de la ultrafiltración para cumplir con la separación deseada.

4.6.2 Presión

El aumento de la presión causa un incremento en el flujo hasta que la capa limitante alcance su concentración limitante y forma un gel. La presión

efectiva máxima depende de la concentración, velocidad de retrotransporte del soluto y la tendencia a gelificar. Las soluciones diluidas con moléculas altamente difusoras no forman gel, por lo que permanecen sensibles a la presión.

4.6.3 Agitación

La agitación disminuye efectivamente la polarización de la concentración ayudando al retrolavado del soluto y así evitar la formación de la capa limitante. De esta forma resulta más efectiva en las operaciones capa limitante que en las de membrana-controlada. Como regla se puede establecer que para los solutos de elevada difusividad que no forman una capa gel-limitante, un aumento de presión resultará la forma más efectiva de incrementar el flujo, mientras que, para la filtración gel-limitada, la forma más efectiva consiste en aumentar la agitación o en algunos casos se combina un aumento de agitación y presión.

4.6.4 Concentración del soluto

La dilución de una disolución permite incrementar el flujo del filtrado porque reduce la polarización de la concentración, sin embargo el tiempo de operación total aumenta porque es mayor el volumen debido al líquido empleado para diluir.

4.6.5 Temperatura

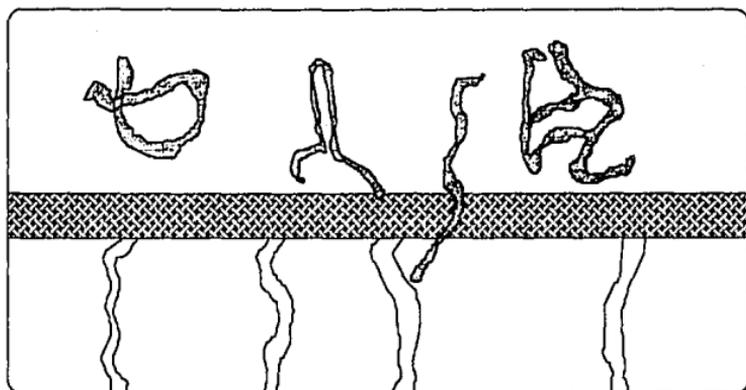
Un incremento en la temperatura de operación provoca, generalmente, un aumento del flujo, porque se incrementa la actividad, movilidad y solubilidad

de las moléculas del soluto, la viscosidad de la solución disminuye y hay una menor tendencia de formar una capa gel-polarizada. Solo se debe tener precaución por la posibilidad de la desnaturalización de las moléculas en la disolución.

4.6.6 Medio iónico

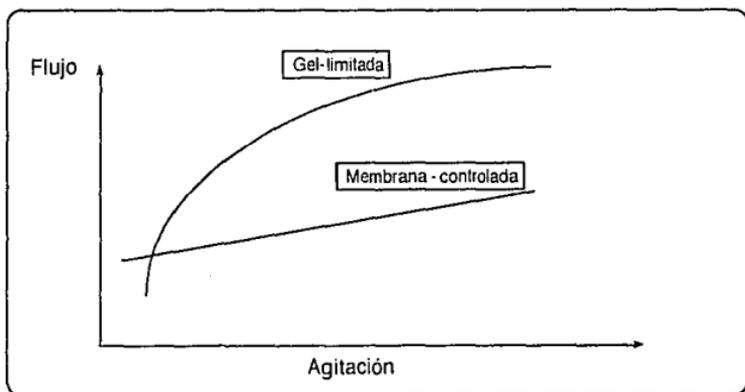
Los cambios en el medio iónico pueden alterar la difusividad y la habilidad del soluto para formar una capa de gel. De esta forma los cambios de pH, fuerza iónica y tipo de disolución, pueden afectar el flujo. En general, la velocidad de flujo se ve beneficiada cuando se hace máxima la solubilidad de las macromoléculas retenidas.

Ultrafiltración



Tamaño y forma: factores que afectan la retención.

Un polímero lineal puede pasar a través de la membrana, mientras que una molécula globular del mismo peso molecular pero de mayor diámetro es retenida.



Representación gráfica de los tipos de ultrafiltración.

Un incremento en la agitación produce un aumento del flujo en el caso de la filtración gel-limitada.

CAPÍTULO IV

ÓSMOSIS INVERSA

1. ASPECTO HISTÓRICO

Los primeros experimentos relacionados con el proceso de ósmosis natural inversa, fueron sobre la ósmosis natural: en 1748, Abbe Nollet encontró que al separar alcohol y agua por una vesícula de animal, el agua pasa a través de esta, hacia el alcohol, con un aumento de presión, sin embargo el alcohol no mostró el mismo comportamiento. Dutrochet y Vierodt estudiaron este fenómeno con otras soluciones acuosas a través de membranas de animal. Dutrochet propuso los términos "endómosis y exómosis" (del griego "empujar") para describir el flujo espontáneo del agua hacia una solución cuando se encuentra separada por una membrana. La propiedad más importante que presenta la membrana es la de permitir el paso libre del agua pero no así de las sustancias disueltas; y fue hacia 186, cuando J.K. Van't Hoff sugirió el nombre de semipermeable para describir esta propiedad.

Posteriormente aparece la ósmosis inversa, a partir de la comprobación de la reversibilidad del fenómeno de ósmosis natural.

La industria mexicana está empezando a utilizar la ósmosis inversa, se puede decir que apenas se inicia esta tecnología en nuestro país, por lo tanto son pocas las industrias que ya tienen instalaciones para este proceso se ha empleado principalmente en laboratorios de control de calidad, laboratorios

médicos, laboratorios experimentales, porque se manejan flujos menores y por lo tanto es menos costoso el equipo, sin embargo en la industria mexicana se está iniciando su aplicación.

2. NOMENCLATURA

En el proceso de ósmosis inversa, además del concepto de la filtración tangencial que se describió en el capítulo anterior, se describen algunos conceptos importantes:

Índice de ensuciamiento (SDI).- Las siglas pertenecen al concepto en inglés, Silt Density Index; concepto que tiene gran importancia en este proceso, indica el nivel de sólidos suspendidos en el agua alimentada a una unidad de ósmosis inversa. El valor del SDI indica la rapidez del taponamiento de una membrana de ósmosis inversa. "Parece sorprendente que otros métodos (como turbiedad, contéo de partículas y distribución de partículas) para caracterizar el material particulado no correlacionen mejor el grado de taponamiento observado en la ósmosis inversa que el SDI y PF(Factor de taponamiento)" (Ultrapure Water, et.al. jul/aug 94).

El método manual, indicado por la ASTM (Método D-4189), para la determinación del SDI consiste en alimentar una muestra del agua a presión constante de 30 psi (207 kPa) a un filtro-membrana de 0.45 micras de tamaño de poro y normalmente 47 mm de diámetro y determinar la disminución del flujo del filtrado contra el tiempo de filtración. Se toma el

tiempo en que se filtran los primeros 500 ml (t_1) y después de filtrar por un intervalo de 5, 10 ó 15 minutos (T) se vuelve a determinar el tiempo en que se filtran otros 500 ml (t_2). Para tener un valor más exacto se recomienda que T sea de 15 minutos. Entonces:

$$SDI = \frac{(1 - (t_1/t_2))}{T} \times 100$$

Índice de taponamiento (PF).- Es un valor en porcentaje de la disminución de la capacidad de una unidad de ósmosis inversa. Corresponde al cociente de la fórmula del SDI:

$$PF = (1 - (t_1/t_2)) \times 100$$

Las siglas corresponden al inglés Plugging Factor. El método ASTM D-4189 no recomienda reportar el valor del SDI para valores de T donde el PF es mayor al 75%, en estos casos conviene realizar la medición a valores menores de T si es posible, para lograr que el PF sea menor o igual al 75%.

Índice de Langelier (LSI).- Es una expresión de un cálculo que permite predecir una posible incrustación en las membranas de ósmosis inversa, a causa de la precipitación de materiales incrustantes como el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, carbonato de estroncio, sulfato de bario, fluoruro de calcio, entre otros; a condiciones específicas de temperatura, pH, sólidos disueltos totales, dureza y alcalinidad. Sus iniciales corresponden al inglés Langelier Saturation Index y se emplea el carbonato de calcio como

compuesto modelo: relaciona el pH del agua saturada con carbonato de calcio y el pH de la propia agua.

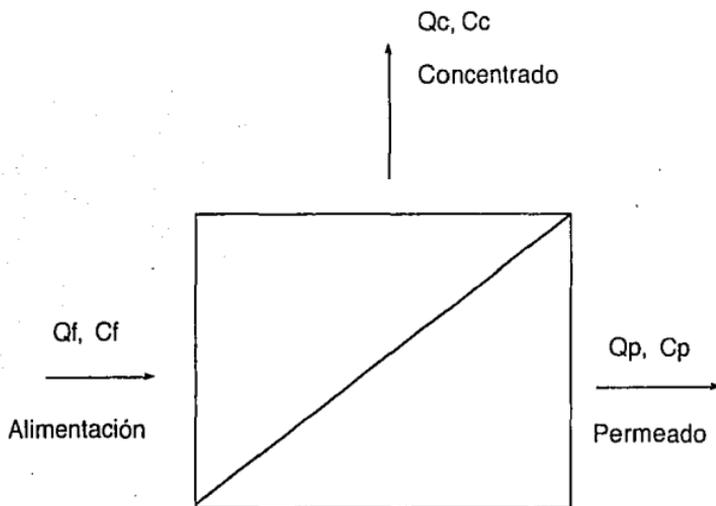
$$\text{LSI} = \text{pH}_{\text{agua}} - \text{pH}_{\text{agua saturada con carbonato de calcio}}$$

De forma que si el pH del agua es menor que el del agua saturada con carbonato de calcio, entonces el LSI será negativo, indicando que la incrustación por carbonato de calcio no se formará. En cambio si el valor del LSI es positivo indicará que se incrustará el carbonato de calcio. En este caso, se busca mantener un pH del agua bajo por medio de la adición de ácido, para que el valor del LSI sea por lo menos igual a cero. Otra opción es la adición de antincrustantes, como el hexametáfosfato de sodio o ácidos poliacrílicos, para no necesitar modificar el pH del agua.

3. PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es el fenómeno que se realiza al aplicar una presión en sentido contrario a la dirección de la ósmosis natural y superior a la llamada presión osmótica. La ósmosis natural es un fenómeno de transporte que ocurre, como ya se mencionó, de forma espontánea cuando dos soluciones de diferentes concentraciones se encuentran separadas por una membrana semipermeable, la cual impide el paso del soluto pero deja pasar el agua (que es el disolvente). En este momento se presenta una presión del lado de la solución menos concentrada a la más concentrada.

Representación gráfica de la ósmosis inversa



Claves:

Q = Flujo

C = Concentrado

Cuando la cantidad de disolvente que pasa en ambas direcciones es la misma, se alcanza el equilibrio osmótico y la presión ejercida, es la presión osmótica.

Si se aplica por el lado de la solución más concentrada una presión mayor a la osmótica, se presenta entonces el fenómeno de ósmosis inversa o también conocido como hiperfiltración.

De acuerdo con la termodinámica, la ósmosis natural se realiza conforme a la segunda ley, considerando que el potencial químico es mayor para la solución menos concentrada y por lo tanto el agua de esta solución, con mayor potencial químico, fluirá hacia el potencial químico menor de la solución más concentrada hasta llegar al equilibrio osmótico. La ósmosis inversa se realiza con una presión mayor a la osmótica para invertir los potenciales químicos. La velocidad de transporte en la ósmosis inversa dependerá de la presión aplicada, la presión osmótica y temperatura del sistema, el área y características de la membrana.

4. PRESIÓN OSMÓTICA

Para que se pueda presentar el fenómeno de ósmosis inversa, la presión osmótica debe ser contrarrestada en 25-40 bars, para un orden de velocidad razonable de permeación de agua.

El valor de la presión osmótica depende de la salinidad de alimentación en términos de equivalentes de cloruro de sodio de acuerdo con la siguiente

ecuación.

$$p = \frac{0.385 * C_b * (T + 273)}{1000 - (C_b / 1000)} \quad \text{psi}$$

donde p es la presión osmótica

C_b es la concentración de la sal y

T es la temperatura en $^{\circ}\text{C}$

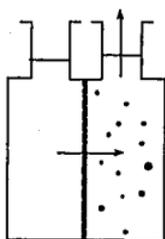
o de otra forma $p = 1.12 (T + 273) M_t$

donde M_t es la suma de molalidades de todos los constituyentes iónicos y no iónicos de la solución.

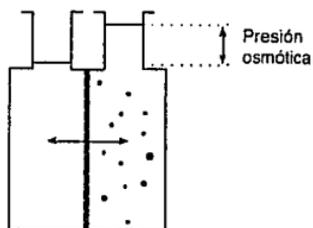
5. EFECTO DE LA PRESIÓN

Un aumento de la presión provoca un flujo mayor para una determinada salinidad de alimentación; a medida que el agua atraviesa la membrana, la solución de salmuera incrementa su concentración y por lo tanto, la presión osmótica también aumenta y la fuerza total decrece dando lugar a un flujo menor. Sin embargo se considera que el flujo de sal a través de la membrana es proporcional a la diferencia de concentración, mientras que el flujo de agua es proporcional a la diferencia de concentración, mientras que el flujo de agua es proporcional a la diferencia de presión y por lo tanto el paso de sal resulta independiente de la presión. De esta forma es evidente que un aumento en la presión de operación aumentará el flujo de agua sin alterar el flujo de sal.

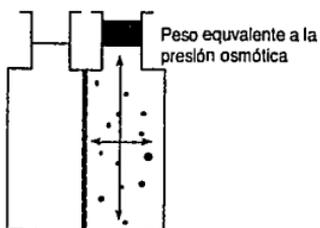
Explicación gráfica de la ósmosis inversa



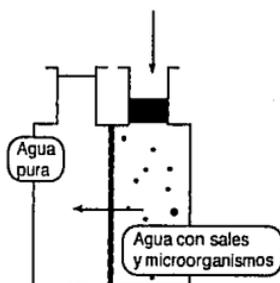
Ósmosis natural



Equilibrio osmótico



Equilibrio osmótico



Ósmosis inversa

6. MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA

El componente más importante en la ósmosis inversa son las membranas las cuales son semipermeables y muy especializadas. Actualmente se están desarrollando nuevos materiales para tener mayor eficiencia en los procesos. El material debe ser hidrofílico, altamente permeable al agua e impermeable a solutos y capaz de soportar altas presiones de agua de alimentación sin falla. Para minimizar los costos de operación, la recuperación del agua debe ser alta y la vida de la membrana debe ser maximizada y para disminuir los costos de capital, el flujo del agua también debe ser el máximo. Esto significa que la membrana debe ser resistente a los ataques físicos, químicos y biológicos, tolerante al pH y a la temperatura y sobre todo, debe ser económica. Se requiere que las características químicas y de transporte no cambien después de experimentar una alta presión por un tiempo prolongado. La membrana debe ser capaz de colocarse en formas tales que tenga una alta densidad, es decir, una gran superficie de la membrana por volumen contenido y debe considerarse que el contenedor de la membrana también es una fracción significativa del costo de calidad.

Existen diferentes materiales para las membranas de ósmosis inversa: de forma que se tienen: celulosicas, poliamidas y compuestas.

Presiones osmóticas típicas

Compuesto	Concentración en mg / l	Presión osmótica en atm (a 25 ° C)
Na Cl	35,000	27.07
Na Cl	1,000	0.77
Na HCO ₃	1,000	0.87
Na ₂ SO ₄	1,000	0.41
Mg Cl ₂	1,000	0.24
Mg SO ₄	1,000	0.66
Ca Cl ₂	1,000	0.65
Sacarosa	1,000	0.07
Dextrosa	1,000	0.14

6.1 Descripción de las membranas

6.1.1 Membrana celulósica.- Las primeras investigaciones reportadas, se realizaron durante la década de los cincuentas. En la universidad de Florida, el profesor C.E. Reid, desarrolló la primera membrana de acetato de celulosa con gran permeabilidad al agua. Mas tarde en 1958, junto con Brenton, obtienen una membrana densa homogénea que funciona con un flujo ligeramente menor que 0.2 l/m^2 , pero que puede producir agua con un céntimo de la concentración de sales del agua de alimentación.

Más tarde Loeb y Sourirajan desarrollan una membrana con una capa delgada que provee un soporte poroso (con 100 micras de grosor) dando como resultado un alto flujo y gran selectividad; y a la vez una estructura resistente.

En 1960, Loeb y Dobry, en la Universidad de California, obtuvieron una membrana con estructura asimétrica que consiste de una capa densa gruesa de 0.2 a 0.5 micras y tamaños de poro de 0.001 micras, con la capacidad de un flujo y rechazo de sal razonables, muy resistente a las sustancias químicas y a la degradación biológica.

La semipermeabilidad de las membranas mejora si se colocan en forma concéntrica en agua a temperatura entre 60 y 90°C. Para lograr un rechazo de sal mayor del 95%, Burns y Roce proponen flujos de agua promedio aproximadamente de $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ con 0.2 MPa de presión aplicada.

Valores típicos de rechazo de solutos para membranas de acetato de celulosa

Solutos	Porcentaje de rechazo		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Calcio	99.7	96.3	99.0
Magnesio	99.9	93.0	99.0
Sodio	97.0	88.0	
Potasio	97.0	83.0	
Hierro	100.0	99.9	100.0
Manganeso	100.0		100.0
Aluminio	99.99	97.3	99.0
Cromo			92.6
Amonio	95.0	77.0	
Bicarbonato			80 - 98
Sulfato	100.0	99.0	99.0
Cloruro	97.0	86.0	
Nitrato	86.0	58.0	
Fluoruro	98.0	88.0	
Boro	60.0	38.0	
Silice	95.0	80.0	
Ortofosfato	100.0		99.0
Sólidos D.T.	99.0	89.0	
DQO	97.0	94.0	
DBO	94.0	81.0	
Sacarosa			99.9
Color			100.0

Las membranas de diacetato de celulosa presentan mayores rechazos para iones divalentes que para los monovalentes.

El acetato de celulosa tiene excelentes cualidades de permeación y tiene amplias aplicaciones en el tratamiento de agua por su tolerancia a oxidantes y al ataque químico en general.

Las membranas de triacetato de celulosa, en el diseño de fibras huecas, presentan un mayor rechazo de sales, en comparación con las anteriores, una pequeña mejoría en la resistencia al ataque por microorganismos, una posible mejoría en la estabilidad hidrofílica a valores de pH muy altos o muy bajos y a temperaturas elevadas.

6.1.2 Membrana de poliamida.- La fibra asimétrica de poliamida fue introducida en 1967 por DuPont, con lo cual se logró un gran avance en aumentar el área activa de la membrana. A pesar de que la permeación de estas membranas tiene un orden de magnitud menor al de las membranas de acetato de celulosa, su densidad de empaquetamiento es aproximadamente de un orden de magnitud mayor, es decir, el área de la superficie de la membrana por unidad de volumen del permeado es mayor.

Johnson y Lim describieron la preparación de membranas de poliamida en 1973. Los materiales de poliamida pueden ser descritos como polímeros de condensación sintéticos y orgánicos. Las fibras huecas pueden ser similares a las fibras de triacetato de celulosa si se utiliza un solvente y un plasticida adecuado. Para mejorar el rechazo de los iones monovalentes se utiliza como

postratamiento, un recubrimiento con ácido tánico a las fibras.

Estas membranas de fibras huecas de poliamida tienen bajos rechazos del ion bicarbonato a valores de pH bajos en la alimentación, pero mejoran al aumentar el valor de pH, además muestran una remoción muy buena de sustancias orgánicas.

En 1979, Shields reportó una membrana de poliamida con mejor estabilidad química y física, por lo tanto una vida más larga. Posteriormente, Burns y Roe reportan que las membranas son capaces de operar a temperaturas mayores que las de acetato de celulosa sin que ocurra la hidrólisis.

Con respecto al ataque por microorganismos, las membranas de poliamida son prácticamente inmunes a la degradación biológica.

Sin embargo, estas membranas son extremadamente sensibles a los oxidantes, los cuales se emplean frecuentemente para sanitizar.

6.1.3 Membrana Compuesta.- La membrana compuesta es similar a la membrana asimétrica de Loeb-Sourirajan y está formada por una capa muy delgada de un polímero semipermeable sobre una superficie finamente porosa de una membrana de soporte altamente permeable en el rechazo y además tiene una mejor resistencia a la compresión.

La membrana compuesta se mejora en comparación con la clásica membrana asimétrica al eliminar el área entre la capa delgada y la subestructura porosa.

Se han desarrollado diferentes tipos de capas delgadas siendo el

polisulfonato el que ha tenido mayor uso comercial en su fabricación. En North Star Research and Development Institute se desarrolló una membrana de polietilenimina, llamada NS-100, la cual tiene una capa activa de polietilenimina con m-tolileno 2,4 diisocianato sobre un soporte poroso de polisulfonato. Esta membrana es la más prometedora por su gran estabilidad al pH, flujo de permeado, remoción de solutos, un rechazo de sal del 99.5% cuando se usa con agua de mar sintética: además se ha reportado que tiene una excelente estabilidad con alimentaciones de agua alcalina. El mayor problema es que esta membrana se ataca enseguida con cloro, que es el gran desinfectante.

En 1979, Buns y Roe describieron sus membranas: una llamada NS-200 que consta de una capa delgada compuesta de alcohol furfúrico, la cual ha demostrado tener un rechazo de sales del 99% y flujos del permeado de 0.73 a 0.81 m³/m²/día probado con una solución de 3.5% de sales a 6.9 MPa por 1,000 horas; y la PA-100, que se prepara de forma similar a la primera pero con el cloruro de isotaloilo para la formación de la barrera de ósmosis inversa en lugar de diisocianato de tolileno, pero presenta un gran problema de sensibilidad al agua de alimentación clorada, lo cual refleja un deterioro de las propiedades de ósmosis inversa a corto tiempo. Posteriormente se desarrolló la membrana PS-300 que se prepara por condensación interfacial de una etilendiamina-epiclorhidrina condensada con cloruro de isoraloilo. Se han encontrado sensibles al agua clorada, con más estabilidad que PA-100.

Membranas para ósmosis inversa

Aplicaciones principales	Membranas de poliamida comuesta y capa delgada	Membranas de acetato de celulosa	Membrana de polisulfonato
Laboratorios de universidades y hospitales Hemodiálisis Farmacéutica Biotecnología Alimentos y bebidas Cosméticos	Rechazo excelente de sales La mejor para obtener agua de alta pureza Presenta dificultades para ser sanitizada	Rechazo moderado de sales Tolera cloro para sanitizar Limitantes de pH	Excelente para aguas superficiales Fácil para lavar y sanitizar con cloro Rechazo moderado de sales
Electrónica Semiconductores Electroplatinos Electropintura Recubrimientos electrónicos	Máximo rechazo de sales Remoción óptima de sílice No tolera oxidantes	Rechazo moderado de sales Tolera cloro para sanitizar Limitantes de pH	Rechazo moderado de sales Facilidad de limpieza y sanitización Excelente para agua superficial
Industria química general Alimentación a calderas	Máxima remoción de sílice Máximo rechazo de sales Baja presión de operación	Rechazo moderado de sales Tolera cloro para sanitizar Limitantes de pH	Excelente para agua superficial Rechazo moderado de sales Sistema económico debido al manejo de altos flujos

Tanto la membrana compuesta de NS-100 como la PA-300 poseen una barrera delgada semipermeable con un alto flujo de agua y alta selectividad. Comparadas con las membranas no compuestas muestran una resistencia mejor a la compresión, al ataque bacteriano, mayor estabilidad a temperaturas elevadas y valores de pH extremos; una resistencia mejorada a materia orgánica y un rechazo mayor de solutos orgánicos.

6.2 Módulos de arrollamiento de las membranas

Anteriormente se han mencionado diferentes tipos de membranas las cuales pueden estar arrolladas en módulos en espiral, en forma tubular y en módulos de fibras huecas, que se describen a continuación.

6.2.1 Módulos en espiral. Las membranas se enrollan por pares en un tubo por el cual se recoge el permeado. El agua que va a tratarse debe fluir en forma paralela a este tubo, entre las dos caras activas de las membranas por medio de unos espaciadores y el permeado pasa a través de un material poroso hasta el tubo central. Los elementos que forman estas membranas se conocen como "separators" los cuales permiten la producción con un buen flujo de permeado aprovechando optimamente el área superficial de las membranas.

De esta forma, se puede partir de membranas planas y construir módulos compactos, que resultan más prácticos para su instalación, operación y mantenimiento. Una de las principales ventajas de este sistema es que presenta la capacidad de "autolavado" debido a la formación de flujo

turbulento en la superficie de las membranas. Este diseño también ofrece una gran selección de materiales para las membranas, permitiendo al usuario mayor oportunidad de tener un equipo más eficiente para un proceso específico.

6.2.2 Módulos en forma tubular. Para este diseño en forma tubular se emplean generalmente membranas de acetato de celulosa que se encuentra totalmente dentro de un tubo. El agua es alimentada al interior del tubo, la filtración se realiza hacia el exterior del mismo, por lo tanto el líquido purificado pasa a través de la membrana tubular y el concentrado se colecta en el otro extremo dentro del tubo.

6.3.3 Módulos de fibras huecas. Una fibra hueca es similar a un cilindro poroso de pared gruesa, del tamaño de un cabello humano, cuya resistencia es función de la relación diámetro exterior - diámetro interior. Cuando se logra mantener constante esta relación se logra obtener una membrana de superficie máxima por unidad de volumen, capaz de resistir, sin soporte mecánico, altas presiones.

El agua cruda se introduce radialmente al interior del módulo, por medio de un tubo axial, poroso o perforado. Y por efecto de la presión exterior, el agua pura pasa al interior del canal central, a través de la placa que soporta los extremos libres del módulo, hasta un disco poroso de donde se obtiene. El rechazo concentrado se colecta en el exterior de las fibras.

Configuraciones de membranas para ósmosis inversa

Característica	Configuración		
	Fibras huecas	Espiral	Tubular
Flujo	Alto	Alto	Alto
Intervalo de rechazo	Alto	Alto	Alto
Tolerancia de pH	4.10	4.70	4.70
Producción	Excelente	Buena	Pobre
Resistencia a la construcción	Baja	Mediana	Alta
Facilidad de limpieza	Pobre	Buena	Excelente
Presión de operación en psig	400 - 450	400 - 600	400 - 800
Requerimiento de bombeo del producto	Raro	Ocasional	Siempre

La principal desventaja que presenta este arreglo de membranas es que se requiere de una gran cantidad de prefiltraciones para conservar el área superficial de las membranas sin obstrucciones que se provocan por el flujo laminar del agua dentro de los extremos.

6.3 Limpieza y mantenimiento de las membranas

Con el objetivo de maximizar la vida de las membranas utilizadas en la ósmosis inversa, se debe seguir un programa de limpieza y mantenimiento a las mismas. Se debe tomar en cuenta que tanto la obstrucción como la adsorción de materiales reducirán la permeabilidad y harán que disminuya la velocidad de flujo, y por lo tanto la producción.

6.3.1. Métodos de limpieza de las membranas. Los métodos de limpieza de las membranas utilizadas en ósmosis inversa son muy variados y dependen del fabricante.

Se realiza con una solución limpiadora que generalmente es recomendada por el fabricante de las membranas, a temperaturas menores de 39°C dependiendo del material de la misma. Esta temperatura puede obtenerse al recircular la solución limpiadora por el equipo de ósmosis inversa ya que la fricción que sufre la solución tanto con la bomba como por la misma membrana incrementan gradualmente la temperatura. El lavado puede ser ciclo ácido-básico cuando el taponamiento de las membranas es de carácter orgánico, puede tener solo un ciclo o agentes desincrustantes si el taponamiento es de carácter inorgánico. El enjuague final es un paso muy

importante y se debe verificar que el flujo se haya recuperado por lo menos en un 85-90% del original. Periódicamente se recomienda aumentar el flujo de rechazo para eliminar depósitos sobre la membrana (efecto de barrido). En caso de que la limpieza no resulte favorable se debe determinar la causa de obstrucción y determinar el pretratamiento adecuado o tomar medidas correctivas antes de reemplazar las membranas.

6.3.2 Efecto de la presión, temperatura y edad. La vida útil de las membranas dependerá de estos tres factores: temperatura, presión y edad; los cuales se combinan en una expresión conocida como coeficiente de compresión o de retención de flujo de la membrana. El exceso tanto de temperatura como de presión para la mayoría de las membranas, dan por resultado una compresión que la afecta en mayor o menor grado dependiendo de la estructura y material de la membrana. Esto se explica porque la membrana contiene cerca de un 12% en volumen de agua dentro de sus estructura molecular. Después de un cierto tiempo este contenido de agua se desplaza gradualmente originando una compresión. La mayor compresión ocurre durante los primeros meses de operación y si la membrana se opera bajo condiciones de presión y temperatura constantes, la rapidez de compresión y el flujo de agua se mantienen virtualmente constantes. La temperatura tiene un mayor efecto sobre la compresión que los otros dos factores. Si la membrana se encuentra arriba de la especificada por el fabricante, es posible disminuir la presión de operación.

6.3.3 Efecto del pH en las membranas. El efecto que tiene el pH en las membranas depende básicamente del material y estructura de las mismas. Por ejemplo, para las membranas del tipo de acetato de celulosa los límites son entre 3 y 8. La hidrólisis de la membrana se tolera dentro de este intervalo. En el caso de las membranas de poliamida los límites recomendados están entre 4 y 11.

El valor de pH en la alimentación puede tener un efecto mayor en los ácidos y bases débiles, pero no así con los fuertes. Las especies no ionizables tienen un rechazo pobre, mientras que las sales ionizadas de ácidos y bases débiles se rechazan bien.

6.3.4 Efecto de los compuestos y sustancias orgánicas. La obstrucción por las sustancias orgánicas adsorbidas es, en algunas ocasiones lo suficientemente débil, de tal modo que la recirculación del agua limpia a través del sistema, puede ser adecuada para restaurar el funcionamiento normal de la membrana. Sin embargo es recomendable efectuar una limpieza como ya se mencionó con ciclo ácido-básico con detergentes enzimáticos. En ocasiones se introduce aire al sistema para ayudar a aflojar los obstruccionistas durante el enjuague. La acumulación de materia orgánica se favorece cuando se cierra el sistema por un tiempo prolongado. Para las membranas de acetato de celulosa se recomiendan dosis de cloro a intervalos regulares y para membranas de poliamida se recomienda un enjuague con formaldehído.

Agentes químicos limpiadores para membranas para ósmosis inversa

Químicos	Obstruores de las membranas						
	CaCO ₃	CaSO ₄ , BaSO ₄ SrSO ₄ , CaF ₂	SiO ₂	Óxidos metálicos	Coloides inorgánicos	Materia biológica	Orgánicos
Ácido clorhídrico pH 4 *	✓				✓		
Ácido cítrico 2% pH 4	✓			✓	✓		
Nutek NT-600 5%	✓						
Ácido cítrico 2% e hidróxido de amonio pH 8		✓					
Na ₂ EDTA 1.5 % y NaOH o HCl pH 7-8		✓					
Na ₂ S ₂ O ₄ 1%		✓		✓			
NaOH pH 11 **			✓		✓		✓
Ácido cítrico 2% con Na ₂ EDTA 2% y NH ₄ OH pH 4	✓			✓			
BIZ 5% y NaOH pH 11			✓		✓		✓
NaHMP 1 %				✓	✓		✓
Formaldehido 0.25 % y BIZ 0.25 % con fosfato						✓	

* Un pH menor sería más efectivo

** Un pH mayor sería más efectivo

Los porcentajes son en peso

6.3.5 Incrustaciones por dureza. Las incrustaciones por dureza son altamente perjudiciales para la vida útil de las membranas y su funcionamiento. Estas deben evitarse manteniendo el agua de recuperación del agua debajo del 50%, adicionando soluciones antincrustantes y con el control de pH donde la precipitación no ocurra. Pequeñas cantidades de ácido cítrico pueden ayudar a prevenir la acumulación de obstruores inorgánicos de la superficie.

6.3.6 Obstrucciones con fierro y silicatos. La obstrucción con fierro y silicatos resulta muy perjudicial para las membranas. El ácido cítrico ha resultado favorable para eliminarla, así como también el diotanto de sodio. Sin embargo, es más recomendable prevenir la formación de estos depósitos que tratar de removerlos después.

" Los tres problemas comunes asociados con los sistemas de membranas son el taponamiento, la incrustación y el ataque químico. . .

El taponamiento incluye problemas causados por sólidos suspendidos que:

- son partículas discretas
- forman asentamiento normal (sedimentan)
- pueden ser vivientes, antes vivientes (ahora muertos) o no vivientes.

La incrustación en la ósmosis inversa es la formación de un material sólido cristalino de sustancias que entraron a la unidad disueltas en el agua alimentada. El compuesto incrustante más común es el carbonato de calcio.

El ataque químico es la degradación de la habilidad de las membranas de

rechazar los contaminantes no deseados o sustancias disueltas del agua alimentada, debido a una reacción química entre la membrana y ciertas sustancias disueltas contenidas en el agua de alimentación." (Water Technology, et.al. sep 93).

7. INSTALACIONES DE ÓSMOSIS INVERSA

Las instalaciones de ósmosis inversa consisten en una yuxtaposición de módulos elementales, lo cual permite flexibilidad en la operación y capacidad de la unidad.

El montaje más sencillo es en paralelo, donde todos los módulos trabajan en las mismas condiciones de operación. Para la protección de la bomba y membranas se cuenta generalmente con un prefiltro de cartuchos. Los instrumentos de medición necesarios son dos manómetros: a la entrada y a la salida de los módulos, para controlar la pérdida de carga en el interior del sistema; y dos caudalímetros o flujómetros en: el agua tratada y el efluente, para conocer la recuperación.

Otros sistemas utilizan módulos en serie-rechazo, donde el rechazo del primer módulo se alimenta al segundo y se alcanzan porcentajes de recuperación de 70 a 90% sin que aumente el coeficiente de polarización.

Para instalaciones que requieren una calidad muy elevada, se utiliza el sistema serie-producción, que consiste en pasar la producción de la primera etapa a la alimentación del segundo módulo, con la ayuda de un grupo de

bombeo. El rechazo de esta segunda etapa se encuentra poco concentrado por lo que se recircula a la entrada de la instalación.

" El servicio a un equipo de ósmosis inversa es la clave de su funcionamiento adecuado, pero eventualmente los clientes se preocupan menos por el servicio y más por incrementar la calidad de su sistema. Proporcionen lo que ellos desean con un acercamiento cuidadoso de sus necesidades, poniendo atención meticulosa a la selección de los componentes, empleando productos fabricados por compañías reconocidas y programando un servicio regular." (Water Technology, et. al. Aug 94).

8. PRETRATAMIENTO NECESARIO PARA LA ÓSMOSIS INVERSA

El pretratamiento que forma parte del sistema de ósmosis inversa, juega un papel muy importante tanto para incrementar la vida útil de las membranas como para disminuir el costo del proceso completo; a pesar de que pueden causar un aumento en los costos iniciales, se amortizan rápidamente por la disminución en los costos de operación.

El pretratamiento consiste básicamente en: eliminar iones de los compuestos, cuya precipitación sobre la membrana pueda obstruirla irreversiblemente, siendo determinado por el índice de Langelier; remoción de sólidos suspendidos con un valor de SDI (índice de ensuciamiento) menor de 4-6; ajustar y controlar el pH y temperatura en la alimentación; desinfectar y prevenir la cuenta microbiana o materia orgánica; remover el

aceite tanto emulsificado como no emulsificado; remover materia específica que puede dañar la bomba o válvulas. El objetivo principal de cualquier pretratamiento es conseguir la vida máxima de la membrana.

" Las impurezas en el agua alimentada a sistemas de ósmosis inversa se han reducido para proporcionar turbiedad normal y un bajo índice de taponamiento del flujo tangencial. Se ha encontrado que el taponamiento por coloides han provocado una disminución del funcionamiento de las membranas.

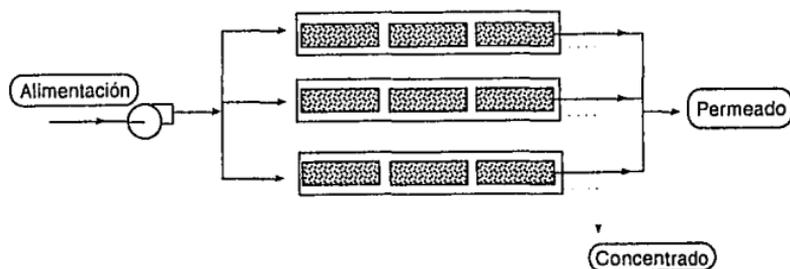
Hemos encontrado que ácidos y antincrustantes previenen la formación de incrustaciones en el sistema de ósmosis inversa, o también los suavizadores de agua pueden emplearse como pretratamiento de la ósmosis inversa para reducir el efecto de la dureza del agua y prevenir la incrustación en los elementos. . .

Uno de los mayores problemas con el diseño y operación de los sistemas se han estado corrigiendo, las metodologías deben ser establecidas para observar y monitorear hasta los menores problemas que puedan influir, para mejorar el funcionamiento y operación del sistema.

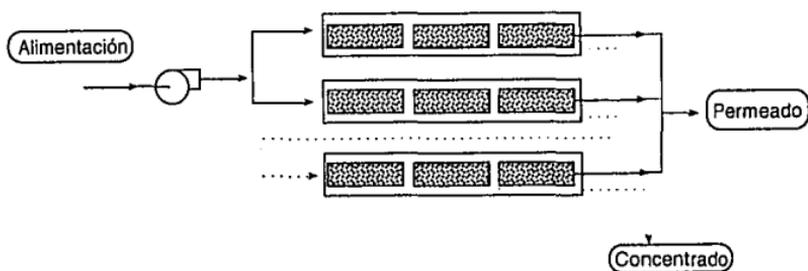
La participación del operador es crítica para reunir y evaluar la gran cantidad de datos que puedan ser colectados y estructurados en un reporte representativo para una evaluación adecuada." (Ultrapure Water, et.al. oct 93).

Opciones de diseño para ósmosis inversa

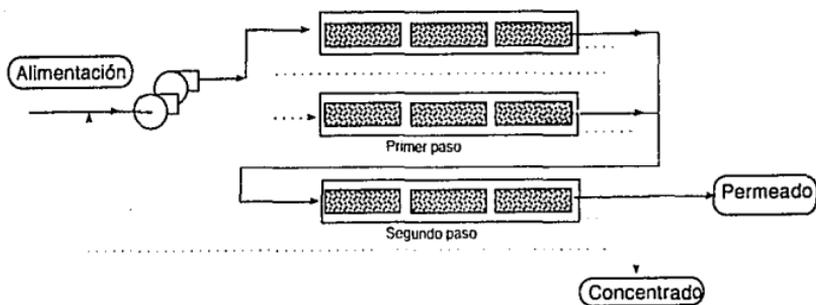
Paso simple en paralelo



Paso simple con tratamiento al concentrado



Sistema en dos pasos



" Las membranas son generalmente uno de los componentes mas caros en un sistema de ósmosis inversa pequeño, creando una necesidad de protegerlas. El pretratamiento al agua que va a ser alimentada a un sistema de ósmosis inversa, protege las membranas de las amenazas del agua pluvial hasta sus longevidades incluyendo sedimentos y cloruros." (Water Technology, et.al. aug 94).

" Un pretratamiento y cuidado adecuados en un sistema de ósmosis inversa puede resultar un sistema de vida larga y con poca necesidad de limpieza. . . Cuando una membrana presenta un aumento en la diferencial de presión, la membrana debe lavarse. Uno de los mayores problemas con el diseño y operación de los sistemas. . ." (Ultrapure Water, et.al. may/jun 94).

9. APLICACIONES

El empleo de la ósmosis inversa es muy variado y depende del grado de purificación que se requiera para un sistema determinado.

Algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

1. Desalinización del agua de mar para obtener agua potable. Esta aplicación es muy común en los pozos petroleros de nuestro país.
2. Recuperación de iones metálicos de algunas corrientes de deshecho.
3. Pre y postratamiento del intercambio iónico cuando el agua requerida es de alta pureza, por ejemplo para la industria electrónica. El proceso de ósmosis inversa puede emplearse antes o después del intercambio iónico, de

acuerdo a las características fisicoquímicas del agua cruda, del análisis económico particular de cada industria, entre otros.

4. Purificación y ablandamiento para agua de alimentación a equipos de intercambio de calor como calderas y serpentines.

5. Reducción de DBO y DQO en corrientes de agua de desecho. El concepto de reciclaje del agua en las industrias se está tomando en cuenta cada vez más, sin embargo predominan los tratamientos secundarios en nuestro país para esta aplicación.

6. Desmineralización del agua de proceso y obtención de agua ultrapura para consumo humano. Existen diversas industrias de bebidas que requieren agua desmineralizada para sus productos, como industrias refresqueras y de jugos, industrias vitivinícola y de bebidas alcohólicas; y las industrias embotelladoras de agua que han tenido un gran crecimiento en estos últimos años.

7. Agua para la industria farmacéutica y para medicamentos inyectables. En nuestro país es muy común el uso de agua destilada para la industria farmacéutica, de tal modo que en algunas de ellas se emplean los procesos de ósmosis inversa y destilación en serie.

8. Agua para laboratorios médicos y químicos en lugar del agua destilada.

9. Agua para lavanderías. Es una aplicación común en Los Estados Unidos de Norteamérica.

10. Agua para cosméticos, industria fotográfica, textil y papelera.

11. Agua para la generación de energía.
12. En la industria alimenticia para concentración de jugos.
13. Pretratamiento de producción de agua para cromatografía.

La ósmosis inversa, además de la gran gama de aplicaciones que tiene, debido a sus diseños modulares, puede mejorar la calidad del agua producida así como también puede incrementar su capacidad de producción. La ósmosis inversa puede emplearse en lugar de la desmineralización por intercambio iónico, electrodiálisis, destilación y otros tratamientos, con la ventaja de que elimina la materia orgánica eficientemente y que sus costos de mantenimiento y mano de obra son menores en comparación con los demás procesos, por lo que el costo por unidad de volumen del agua producida es mucho menor que el costo con un tren de tratamiento que brinde la misma calidad de agua.

" En la recién década de los 80's, AECL Reseach cosntruyó un centro de tratamiento de desechos (WTC) para el manejo de desechos sólidos y líquidos con bajo nivel de radioactivos de sus instalaciones en Chalk River, en Ontario, Canadá. Las corrientes de desecho líquido de los laboratorios de Chalk River son eficientemente reducidas en volumen por medio de una combinación de las tecnologías de microfiltración tangencial continua, ósmosis inversa en espiral y ósmosis inversa tubular." (Ultrapure Water, et.al. nov 93).

" Las plantas que necesitan una buena calidad de agua desmineralizada,

emplean normalmente desmineralizadores de intercambio iónico para cumplir con sus necesidades. Estos sistemas, con una operación y mantenimiento adecuados, producen agua excepcionalmente pura. Como todas las cosas, sin embargo, hay una forma de incrementar el proceso de intercambio iónico empleando la ósmosis inversa como una etapa de pretratamiento del tren desmineralizador."(Ultrapure Water, et.al. apr 94).

" Una combinación relativamente nueva en los procesos con membranas utiliza juntas la electrodesionización (desionización continua) y la ósmosis inversa para la producción de agua de alta pureza. La unidad de ósmosis inversa proporciona un excelente pretratamiento para la electrodesionización para casi todas las aguas de alimentación. La ósmosis inversa remueve contaminantes del agua de alimentación que pueden causar problemas en la unidad de electrodesionización." (Ultrapure Water, et. al. jul/aug 94).

El último capítulo presenta un estudio de factibilidad técnico económica para implementar esta tecnología en una planta vitivinícola que disponía de un tratamiento convencional de desmineralización y esterilización.

CAPÍTULO V

TRATAMIENTOS PARA DESINFECCIÓN DEL AGUA

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos empleados para la desinfección del agua tienen como objetivo principal evitar las infecciones hídricas y pueden ser físicos o químicos. La desinfección del agua implica la destrucción de microorganismos patógenos y difiere de la esterilización porque no significa la destrucción completa de la vida microbiana.

Los principales microorganismos que se encuentran en el agua pueden ser patógenos entéricos que provocan enfermedades graves. Hay desinfectantes capaces de destruir a todos estos patógenos y otros que solo son efectivos contra algunos de ellos.

La desinfección debe romper el ciclo enfermedad-infección, destruyendo los agentes infecciosos antes de que lleguen a los cuerpos de agua, o se desarrollen en ellos.

Un desinfectante efectivo debe cumplir con las siguientes propiedades:

1. Destruir toda clase de patógenos del agua, en un intervalo práctico de tiempo y de temperatura, así como de las posibles variaciones en la composición del agua.
2. Aplicable en concentraciones no tóxicas ni al hombre ni a sus animales domésticos y sin mal sabor ni olor.

3. Debe ser factible económicamente, seguro y fácil de almacenar, transportar, manejar y aplicar, buscando siempre la seguridad de los operarios.

4. Su concentración en el agua debe determinarse fácilmente.

5. Debe persistir en el agua desinfectada para contar con una protección residual razonable contra la contaminación del agua antes de utilizarla.

Los tratamientos principales de desinfección por medios físicos son:

1. Desinfección por calor.

2. Luz ultravioleta.

3. Nanofiltración.

4. Ósmosis inversa.

y por medio químicos son:

1. Clorinación del agua.

2. Ozonización.

3. Aplicación de iones metálicos.

4. Aplicación de halógenos y otros compuestos.

2. TRATAMIENTOS FÍSICOS

2.1 Desinfección por calor

La elevación de la temperatura es un medio muy común para desinfectar el agua porque la mayoría de los microorganismos que producen enfermedades hídricas peligrosas no son resistentes al calor.

Es un método que se emplea a nivel casero y ha dado buenos resultados,

aunque en la mayoría de los casos se afecta el sabor del agua potable.

La pasteurización consiste en mantener una relación tiempo-temperatura eficiente para los casos en que se puedan controlar estas variables.

2.2 Luz ultravioleta

La luz solar es un desinfectante natural y los efectos biológicos de la radiación se hacen intensos en la zona ultravioleta.

Las propiedades que tiene la luz ultravioleta son:

1. Excelente desinfectante.
2. Muy efectivo contra los virus y levaduras.
3. Requiere un mantenimiento mínimo.
4. No adiciona sustancias químicas al agua.
5. No deja una actividad residual, por lo que puede o no ser ventajoso dependiendo de la aplicación.
6. Remueve trazas de cloro y cloraminas.
7. Destruye los productos intermediarios que se producen en la ozonización.

Por otro lado una de sus desventajas es que requiere de agua limpia y por lo tanto requiere de un pretratamiento extenso, además el agua no debe contener color, turbiedad ni hierro. La luz ultravioleta puede presentar dificultades si no se siguen los parámetros de operación señalados en su diseño, por ejemplo un factor muy importante a tomar en cuenta es el flujo.

2.2.1 Naturaleza de la luz ultravioleta

Los rayos ultravioletas son capaces de penetrar al DNA de varios organismos,

así como destruirlo.

Dentro del espectro de luz solar, el intervalo visible para el ser humano se encuentra entre los rayos infrarrojos y los ultravioletas.

El hombre ha utilizado los rayos que están fuera del intervalo visible, para diferentes fines. En este caso la luz ultravioleta, con la propiedad de disminuir las funciones vivientes de los organismos, se ha empleado para la desinfección.

2.2.2 Desinfección con luz ultravioleta

La luz ultravioleta puede producirse en forma artificial al pasar corrientes eléctricas fuertes a través de varias sustancias. La lámpara de sol, por ejemplo, produce rayos ultravioletas, los cuales, con un control apropiado, dan un bronceado sano. En exceso pueden provocar quemaduras solares.

La lámpara de luz ultravioleta, que se utiliza en desinfección del agua, depende del uso de una lámpara de vapor de mercurio a baja presión para la producción de la energía ultravioleta. En una lámpara de vapor de mercurio un arco eléctrico se hace pasar por un gas inerte; éste a su vez, vaporiza el mercurio contenido en la lámpara y como resultado de esta vaporización se producen los rayos ultravioletas.

Esta lámpara no entra en contacto directo con el agua sino que se sitúa dentro de un tubo de cuarzo y el agua mantiene el contacto con la parte externa de este tubo. Se utiliza cuarzo porque es un material que no absorbe los rayos ultravioleta.

Para asegurar una desinfección eficiente se recomienda tener un flujo de 0.2 gpm por pulgada de la lámpara que produce la luz ultravioleta, por lo tanto la capacidad del equipo de desinfección puede modificarse con el número de tubos de luz ultravioleta y el tamaño de los mismos. Las lámparas tienen un tiempo de vida media aproximadamente de un año y deben ser reemplazadas cuando han perdido de un 40 a un 59 % de su producción de luz ultravioleta; esta eficiencia se mide con una celda fotoeléctrica y su medidor.

Para tener una desinfección efectiva con luz ultravioleta, el agua debe de estar limpia y libre de sólidos suspendidos; debe estar incolora y libre de coloides, hierro, manganeso, sabor y olor. También, si se encuentran en exceso los bicarbonatos, cloruros y sulfatos, se afectará la eficiencia ya que estos absorben los rayos ultravioleta.

De acuerdo a las limitantes de este tratamiento se recomienda:

1. La unidad de luz ultravioleta debe colocarse tan cerca como sea posible al punto de demanda, para evitar una contaminación posterior.
2. Se debe monitorear la unidad para mantener una producción efectiva de luz ultravioleta y facilitarse el proceso de desinfección realizando los pretratamientos necesarios.
3. Cualquier lámpara defectuosa debe ser reemplazada inmediatamente. Puede instalarse un control automático de control con alarma para verificar la producción efectiva de luz ultravioleta de cada lámpara de una unidad.

3. TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Los productos químicos, en concentraciones adecuadas, proporcionan la desinfección del agua.

Existen los productos químicos oxidantes, los cuales comprenden a los halógenos, el ozono y otros oxidantes como el permanganato de potasio y el peróxido de hidrógeno.

La capacidad oxidante de estos productos no es necesariamente una medida de su eficiencia como desinfectante, porque los desinfectantes deben cumplir las propiedades señaladas al principio del capítulo.

Otros desinfectantes químicos son los iones metálicos, como los de plata, que son bactericidas y se pueden emplear en las albercas en 0.15 ppm, los de cobre que son alguicidas y los de mercurio. Estos no son muy empleados debido a que son más costosos y tienen efectividad solo para algunos patógenos pero no a todos.

Los productos químicos tensoactivos son los detergentes catiónicos que son fuertemente destructores y los aniónicos que son débilmente destructores. Sin embargo se utilizan generalmente en la desinfección de agua de lavado y de enjuague que se emplean básicamente en la industria alimenticia.

3.1 Clorinación

El cloro es un agente oxidante que se ha empleado ampliamente en la desinfección del agua. Es un elemento químico descubierto por Scheele, tiene una capa externa con siete electrones rodeando su núcleo por lo que tiende a

completar su capa de ocho electrones, es decir, resulta un agente oxidante. Además de su acción desinfectante puede emplearse para la remoción de hierro y manganeso porque los precipita, sin embargo, puede ocasionar problemas de olor y sabor si hay presente fenoles, al reaccionar con ciertas sustancias orgánicas produce productos tóxicos y puede formar cloraminas que son muy difíciles de remover; por su toxicidad se debe tener mucha precaución en su manejo y aplicación.

" La gente ha desinfectado el agua con cloro desde principios de siglo. Su uso ha disminuído drásticamente la incidencia de enfermedades como el cólera, difteria y fiebre tifoidea. Se ha empleado para eliminar quistes, virus y esporas, mientras su fuertes propiedades oxidantes ayudan a eliminar hierro, ácido sulfhídrico y manganeso del agua. " (Water Technology, et.al sep 93)

A continuación se describen algunos términos específicos de este proceso:

Demanda de cloro. Es la cantidad de cloro que se utiliza por las sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua. Es igual a la dosis de cloro menos el cloro residual.

Cloro residual. Cantidad de cloro que queda después de satisfacer la demanda de cloro. Es la cantidad de cloro que no ha reaccionado aún y por lo tanto ejerce fuertemente el proceso de desinfección.

Cloro combinado. Tratamiento del agua residual donde el cloro residual es de 8 a 10 ppm, es decir de 40 a 50 veces mayor en comparación al utilizado en el tratamiento del agua municipal para consumo humano.

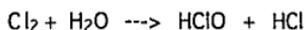
Características de los desinfectantes químicos

Característica	Desinfectante ideal	Cloro	Hipoclorito de sodio	Bióxido de cloro	Ozono
Toxicidad hacia los microorganismos	Altamente tóxico a altas diluciones	Alta	Alta	Alta	Alta
Solubilidad	Soluble en agua y en tejidos celulares	Ligera	Alta	Alta	Alta
Estabilidad	Poca estabilidad y pérdida de acción germicida al paso del tiempo	Estable	Ligeramente estable	Inestable	Inestable
No tóxico hacia las formas superiores de vida	Tóxico a microorganismos y no tóxico al ser humano	Altamente tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico
Interacción con material extraño	No absorbido por materia orgánica diferente a las células bacterianas	Oxida a la materia orgánica	Oxidante activo	Alta	Oxida a la materia orgánica
Toxicidad a temperatura ambiente	Efectivo a temperatura ambiente	Alta	Alta	Alta	Muy alta
Penetración	Alta capacidad de penetrar a través de superficies	Alta	Alta	Alta	Alta
No corrosivo y no colorante	No deberá atacar a metales o ropa	Altamente corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo	Altamente corrosivo
Capacidad de desodorizar	Alta capacidad de desodorizar	Alta	Moderada	Alta	Alta
Disponibilidad	Disponible en la cantidad adecuada y a precio razonable	Bajo costo	Costo moderado bajo	Costo moderado	Costo moderado alto

Otros conceptos se irán introduciendo a lo largo de esta sección.

3.1.1 Prácticas de clorinación

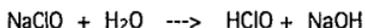
La reacción del cloro gaseoso con el agua en ausencia de cualquier otra sustancia es:



En este caso, como no existe ningún componente con que el ácido hipocloroso pueda reaccionar, se dice que la demanda de cloro es cero. Como resultado, si se incrementa la cantidad de cloro adicionado, la concentración del ácido hipocloroso se incrementará respectivamente.

En esta reacción se observa, además, que el 100 % del cloro gaseoso se está consumiendo.

Si se emplea hipoclorito de sodio que es líquido en lugar de cloro gaseoso se tiene:



Sin embargo el agua que se trata con cloro presenta diversas sustancias orgánicas e inorgánicas, las cuales reaccionan con el cloro.

3.1.2 La clorinación y las bacterias

Originalmente se pensó que las propiedades desinfectantes del cloro se debían a la producción de oxígeno mostrado en la reacciones anteriores; sin embargo su carácter oxidante no es el único que influye, ya que existen

compuestos como el permanganato de potasio con una fuerza mayor pero menos efectivo como desinfectante. Una explicación que se considera aceptable es que el cloro reacciona con las estructuras celulares de las bacterias y forma compuestos clorados que destruyen las enzimas básicas sin las cuales el organismo no puede existir ni reproducirse. Esto se ha comprobado con la disminución de bacterias en agua que ha sido clorada y entonces se cree que se convierte en compuestos solubles.

3.1.3 El cloro con el hierro y manganeso

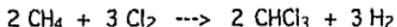
El agua puede contener estos elementos en compuestos solubles e insolubles, los cuales dan sabor y/o color al agua; por lo tanto es necesario removerlos, lo cual se puede llevar a cabo con la aereación y/o con la clorinación.

Estos procesos son efectivos porque involucran un aumento de oxígeno en el agua, el cual convierte las formas ferrosas o manganosas, que son las que causan color, a las formas férricas o mangánicas, que son sólidos fáciles de separar del agua.

3.1.4 Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos encontrados principalmente en el agua residual, otorgan olor, color y sabor al agua. Cuando se combinan con cloro se producen compuestos llamados trihalometanos.

Estos ácidos tienen estructuras moleculares muy complejas y pesos moleculares entre 1,500 y 20,000 por lo que se describirá la reacción con la molécula orgánica más pequeña para mayor facilidad:



El cloroformo es un trihalometano que se presenta frecuentemente en el agua que se trata con cloro. Sin embargo, debido a lo complejo de las moléculas y las reacciones químicas, muchos otros compuestos trihalometanos se producen.

Se debe tomar en cuenta que estos compuestos son cancerígenos cuando se presentan en concentraciones mayores a 100 ppb, por lo que las autoridades han limitado este tratamiento. Se han presentado algunas opciones para evitar los daños de estos compuestos:

1. Remoción de compuestos orgánicos antes de la clorinación.
2. Remoción de los trihalometanos después de la clorinación.
3. Uso de cloro y amoníaco para producir cloraminas, que no producen trihalometanos, dando una desinfección eficiente.

De estas opciones, la última es la que se emplea actualmente por ser práctica, segura y económica.

3.1.5 Clorinación a punto de ruptura

En la sección anterior se mencionó la adición de amoníaco para evitar la producción de trihalometanos y formar cloramidas en su lugar, sin embargo estos compuestos producidos presentan también algunos problemas.

El agua natural contiene amoníaco orgánico o inorgánico, por lo tanto al clorar el agua se forman cloramidas aún sin adicionar amoníaco. Estos compuestos, a pesar de ser muy estables, son menos eficientes en la

desinfección que el cloro libre (HClO), son más difíciles de remover y producen olor y color en el agua.

Por lo tanto se necesita eliminarlos por medio del proceso llamado clorinación a punto de ruptura. En seguida se describe la gráfica de cloro adicionado vs cloro residual, de forma seccionada para comprender mejor este proceso.

Sección I. Cuando se agrega cloro al agua inmediatamente reacciona con sustancias de hierro y manganeso principalmente y algunas bacterias.

Sección II. Al seguir adicionando cloro se presentan reacciones con compuestos nitrogenados (amoníaco) para formar cloramidas.

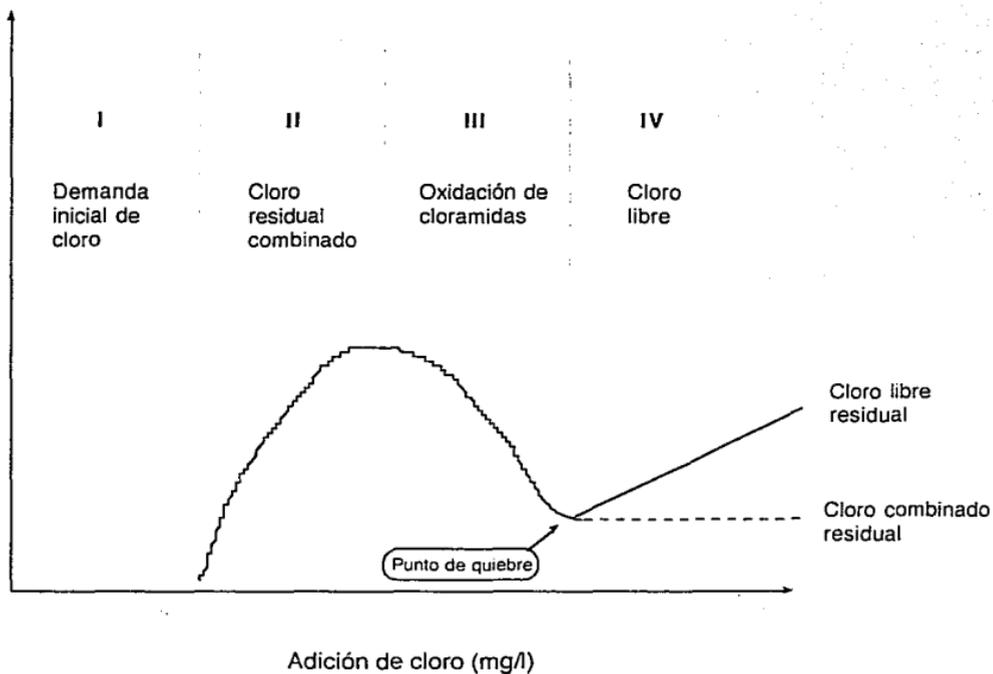
Sección III. En esta sección se oxidan los compuestos combinados con cloro, es decir, se destruyen la mayoría de las cloramidas formadas en la sección anterior.

Sección IV. Como todas las sustancias oxidables reaccionaron en la sección anterior, cualquier adición de cloro da lugar a la formación de cloro libre (HClO) el cual es el mejor desinfectante. Este es el punto de ruptura y la reacción del cloro con el agua es la misma que se describió con agua en ausencia de cualquier sustancia.

Existe, sin embargo, una cantidad de cloramidas que no reaccionaron después del punto de ruptura y reciben el nombre de residuos.

Fases de la clorinación del agua

Cloro residual (mg / l)



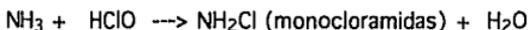
El término cloro libre disponible se refiere a la cantidad de cloro que existe como HClO y está disponible para oxidar, por lo que presenta gran fuerza desinfectante.

El cloro disponible combinado se refiere al cloro que ha reaccionado con amoníaco o algún otro compuesto nitrogenado, es decir, se refiere básicamente a las cloramidas y tiene un efecto desinfectante.

El cloro residual total es la suma de los dos anteriores.

Generalmente el agua natural contiene tanto nitrógeno inorgánico como orgánico. El nitrógeno inorgánico requiere de un tiempo de contacto con cloro de 20 a 30 minutos para formar cloramidas. El nitrógeno orgánico necesita mayor tiempo de contacto y la reacción da lugar a compuestos orgánicos nitrogenados complejos, los cuales son muy difíciles de remover del agua. Al ir incrementando la concentración de cloro en el agua, el pH irá disminuyendo y las reacciones que se pueden presentar son:

a pH mayores de 8.5 y una relación de Cl₂:NH₄ menor de 5:1



a pH entre 4.5 y 8.5 y una relación Cl₂:NH₄ mayor de 5:1



donde las dicloramidas se reflejan por un sabor característico que dan al agua, y a pH menores de 4.5 con una relación Cl₂:NH₄ mayor de 5:1



donde el tricloruro formado es un gas inestable que tiene un olor fétido muy fuerte.

Cabe destacar que en el punto de ruptura todas las cloramidas a excepción del tricloruro de nitrógeno se forman en el agua.

Por lo tanto la clorinación a punto de ruptura, dentro de las desventajas que presenta, es que se necesita una dosis de 9 mg/l por cada mg/l de nitrógeno amoniacal y además existe la formación de compuestos tóxicos.

3.1.6 Puntos de aplicación

La cloración del agua tiene los siguientes puntos de aplicación:

La cloración simple se refiere a la aplicación del cloro sin ningún otro tratamiento. Por ejemplo la cloración de agua de manantiales para consumo humano.

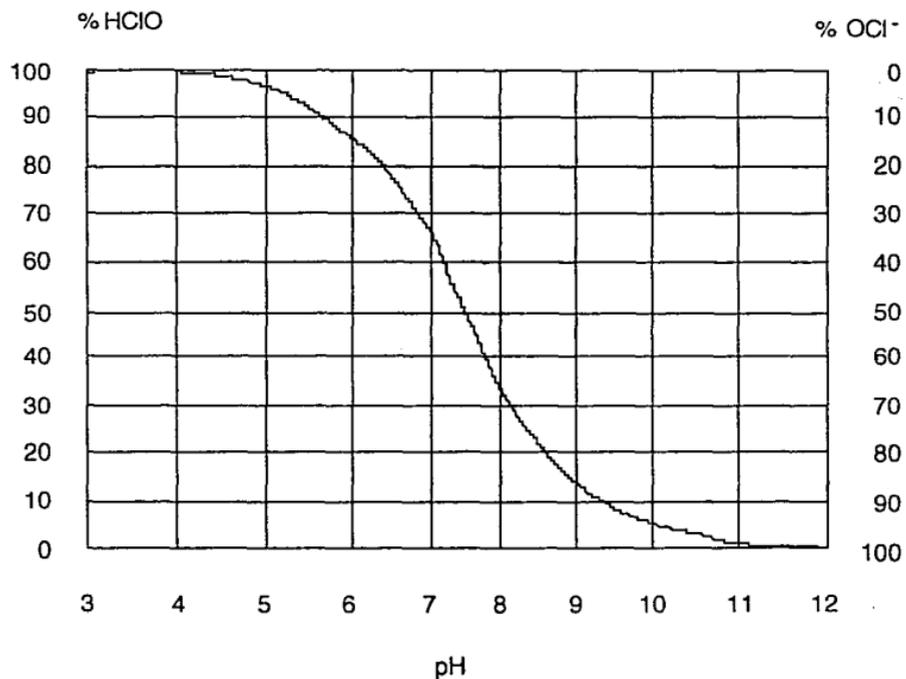
La postcloración es la aplicación del cloro después de otro tratamiento. Por ejemplo la cloración de agua tratada por intercambio iónico.

La precloración involucra la aplicación del cloro antes de cualquier tratamiento. Hay que considerar que una adición temprana de cloro puede ocasionar la formación de clorofenoles y otros productos desagradables.

La recloración es la aplicación de cloro después de una o más cloraciones.

El cloro se presenta en diferentes compuestos, los cuales se dividen en estables e inestables.

Distribución de la clorinación respecto al pH



Temperatura 20 °C

Compuestos inestables de cloro

Gas cloro.- Es el menos caro de los compuestos para sanitizar cuando se emplea en albercas de una capacidad menor a 750,000 litros. Es un producto muy peligroso y disminuye drásticamente el pH.

Hipoclorito de sodio (estable únicamente en solución).- Es completamente soluble en agua, elimina el color de telas y se descompone fácilmente por almacenamiento.

Hipoclorito de calcio.- Es de manejo fácil, no se descompone en almacenamiento, incrementa la dureza del agua por el calcio, incrementa el pH y crea turbiedad debida a compuestos inertes insolubles.

Hipoclorito de litio.- Completamente soluble en agua a temperaturas normales y de manejo fácil; no requiere ser premezclado, no elimina el color de vinil a temperaturas normales, es un producto con un costo elevado e incrementa los sólidos disueltos totales por contenidos inertes.

La estabilización de estos compuestos clorados se puede realizar con ácido cianúrico. Cuando se disuelve en agua a 25 ppm, dura de tres a cinco veces más que los productos originales.

Compuestos estables de cloro

Tricloro.- Es un producto de disolución lenta, se emplea eficientemente en clorinadores automáticos, es el compuesto clorado estable más popular, reduce la alcalinidad total y el pH.

Efectos del cloro gaseoso a diferentes concentraciones

Concentración del cloro gaseoso	Efectos
1 ppm	Síntomas ligeros después de varias horas de exposición
3 ppm	Olor detectable
4 ppm	Inhalaciones por 60 minutos sin efectos serios
5 ppm	Malestares
15 ppm	Iritación de mucosas y piel
30 ppm	Tos
40 ppm	Efectos peligrosos se se inhala de 30 a 60 minutos
1000 ppm	Mortal después de algunas inhalaciones profundas

Dicloro.- Es fácil de manejar, su pH es casi neutro y es el compuesto estable de costo más alto. (Water Conditioning & Purification, et.al. jun 94)

3.1.7 Consideraciones de ingeniería

Uno de los puntos básicos de la cloración es el contacto del cloro de manera uniforme y rápida para lograr hasta un 90% de reducción de bacterias y virus, antes de que se formen cloramidas y otros compuestos.

Una vez que se determina la necesidad de cloro se procede a la selección de dosificadores.

Otro de los puntos importantes son los parámetros de seguridad.

El cloro líquido es muy irritante para la piel y mucosas, puede causar quemaduras si se expone por un tiempo prolongado y en los ojos produce quemaduras muy graves. El cloro gaseoso es irritante para las vías respiratorias y en concentraciones mayores a 15 ppm irrita las membranas mucosas, todo el sistema respiratorio y la piel. Además cuando se inhala en cantidades mayores puede causar la muerte por asfixia. Tomando en cuenta lo anterior, el cloro debe manejarse cuidadosamente y envasarse en equipo especializado. Para el cloro gas debe cumplirse lo siguiente:

1. Material de construcción del contenedor.- Acero inoxidable.
2. Contar con dispositivos de seguridad (válvula de seguridad).
3. Pasar pruebas de presión a intervalos de tiempo definidos por el Instituto del Cloro. Los cilindros de almacenamiento deben ser construidos en una sola pieza y sin costuras.

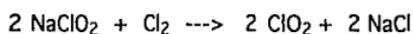
Para el manejo de más de 900 kg de cloro se utilizan carros tanque de ferrocarril y pipas, los cuales cuentan con una abertura única en la parte superior del contenedor (registro paso hombre), dos válvulas para la descarga del cloro líquido, dos para el cloro gas y la válvula de seguridad.

3.2 Dióxido de cloro

El dióxido de cloro es un desinfectante que actualmente casi no se utiliza debido principalmente a que requiere muchos cuidados para su preparación y control. Es un compuesto líquido muy inestable, de color rojo intenso y tiene propiedades explosivas a bajas temperaturas. En su forma gaseosa tiene características similares a las del cloro gas, pero a diferencia, es poco compresible por lo que no se licúa fácilmente por aumento de presión.

A diferencia del cloro, no forma cloramidas ni trihalometanos, su acción desinfectante es más lenta pero permanece activa por más tiempo, no forma clorofenoles, por lo que no afecta ni el sabor ni el olor del agua. Es buen oxidante de sales de hierro y manganeso. Hay dos formas para su producción:

1. Reacción de cloro (gas o líquido) con clorito de sodio



2. Reacción de clorito de sodio con ácido clorhídrico



procesos que se han ido modificando para obtener menos cantidad de cloro libre debido a que dan lugar a la formación de trihalometanos y cloramidas.

Este compuesto se ha utilizado como desinfectante primario y preoxidante en

el tratamiento de coagulación-filtración.

3.3 Ozonización

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno, su fórmula química es O_3 , es un gas ligeramente azul con un olor acre característico. Es corrosivo y venenoso en concentraciones fuertes en la atmósfera, es límite máximo para la operación de plantas de tratamiento es comúnmente de 0.2 mg de ozono por m^3 de aire.

Es un agente oxidante muy fuerte, elimina olores y sabores, tiene un efecto viruscida mayor que otros agentes, tiene un efecto floculante sobre ciertas sustancias del agua y por su inestabilidad química se convierte en oxígeno fácilmente, por lo cual no adiciona ninguna sustancia nociva al agua. Sin embargo representa una inversión inicial alta aunque sus costos de mantenimiento sean mínimos.

La producción del ozono se realiza mediante descargas eléctricas de alto voltaje, entre electrodos fijos en aire atmosférico seco. Se emplea corriente alterna y para evitar la formación de un arco eléctrico, los electrodos se recubren con un material dieléctrico.

" De hecho, el ozono en altas concentraciones no solo desinfecta, sino que esteriliza (destruye) casi todas las formas de vida incluyendo esporas y quistes. . . comparado con el cloro es un 51% más poderoso, 3 125 veces más rápido y no presenta las desventajas de formar productos cancerígenos tales como los trihalometanos."(Water Conditioning & Purification, et.al.may

1994).

Comparación de potenciales de oxidación de diferentes desinfectantes del agua (Water Technology, et.al. jul 1994):

Fluoruro	3.06
Ozono	2.80
Ácido hipocloroso	1.49
Ácido hipobromoso	1.33

3.3.1 Consideraciones de ingeniería

Con base en el desarrollo de los sistemas de ozonización se realizan las siguientes recomendaciones para la determinación de un sistema adecuado:

1. Identificación del lugar donde se requiere la aplicación de ozono.
2. Dosis de ozono requerida.
3. Tiempo de contacto.
4. Efecto del ozono en los procesos o tratamientos posteriores.

El estudio preliminar consiste en :

1. Características del tratamiento y parámetros que se requieren determinar.
2. Periodos de pruebas y su duración.
3. Prueba a escala o piloto.
4. Operaciones y personal de operación.

Con los datos y pruebas realizadas se determinará eficientemente un sistema de ozonización.

3.3.2 Técnicas de difusión del ozono

Las técnicas para difundir el ozono en el agua son muy variadas, las más importantes se enumeran a continuación.

1. Difusión convencional de burbujas finas.

2. Mezcladores de turbina

Con presión positiva

Con presión negativa (tipo aspiradora)

3. Inyectores

Con presión positiva

Con presión negativa

4. Columnas empacadas

5. Cámaras rociadoras (spray)

6. Técnicas de vanguardia

Contacto por tubo profundo en U

Contacto con platos porosos de difusión de barrido

Contacto con turbina sumergida estática y radial

3.3.3 Prácticas de Ozonización

Sus aplicaciones principales son como:

Desinfectante. Es un gran bactericida y requiere de menos tiempo de contacto que el cloro para desinfectar. Es menos sensible a los cambios de pH que los otros desinfectantes.

Control de olor y sabor. Es muy efectivo para la eliminación de olores y

sabores en el agua.

Remoción de hierro y manganeso. Cuando el agua contiene hierro o manganeso, el ozono los convierte en sus formas oxidadas insolubles en agua y por lo tanto fácil de remover.

Remoción de algas. El ozono es muy efectivo en el pretratamiento de la coagulación y filtración para remover algas.

Color. El ozono es el más efectivo par eliminar el color derivado de los ácidos orgánicos.

3.3.4 Selección de sistemas de difusión y contacto de acuerdo a su aplicación.

Como se describió en la sección 3.3.2 existen varios sistemas para la difusión y contacto del ozono. Y a pesar de que tienen una gran variedad de aplicaciones cada uno, hay ciertos tipos de difusores que favorecen cierta aplicación o proceso.

1. Para desinfección primaria.- Con el concepto de mantener una concentración residual del agente desinfectante se ha tenido éxito con el sistema de multietapas con difusores de burbujas finas.
2. Para la oxidación de hierro y manganeso.- Normalmente se realiza esta oxidación en etapas primarias o intermedias. La formación de precipitados de estos compuestos favorece el empleo de varios sistemas de contacto que no produzcan burbujas finas, sin embargo se ha presentado que a pesar de ser de burbujas finas su aplicación ha tenido éxito.

3. Remoción de color.-Se realiza en las primeras etapas o intermedias. En Estados Unidos se ha aplicado con éxito para el agua para beber con un sistema de contacto de burbujas finas. Los inyectores también se han empleado satisfactoriamente.

4. Eliminación de olor y color.- Sistemas de contacto de multietapas de burbujas finas se han aplicado eficientemente.

5. Remoción de algas.- La formación de altos niveles de burbujas finas de gas en el líquido bajo tratamiento para eliminación de algas induce la flotación. La configuración de turbinas sumergidas y el "ozoflotador" están específicamente diseñadas para la remoción de algas por flotación.

6. Remoción de partículas.- Para la remoción de partículas en etapas primarias de tratamiento se han empleado diferentes sistemas de difusión satisfactoriamente.

7. Oxidación.- La aplicación de ozono para la oxidación de compuestos orgánicos disueltos requiere la participación de ingenieros expertos para la selección de un sistema eficaz.

3.4 Iones metálicos

Los iones metálicos, que se emplean en desinfección, tienen una propiedad llamada oligodinámica o fuerza de cantidades diminutas, de la cual se deriva la acción desinfectante.

Entre los metales más empleados están los iones de plata, cobre y mercurio. Para la producción de iones de plata se utiliza un cilindro metálico con un

revestimiento interior especial que contiene electrodos de plata. De esta forma el agua a tratar pasa a través del cilindro y al aplicar la corriente eléctrica, recibe los iones. La concentración de plata empleada para albercas es de 0.15 ppm. Sin embargo este tratamiento requiere de un tiempo de contacto muy largo para una desinfección y la presencia de cloruros, amoniaco y materia orgánica disminuyen su eficiencia. Además, los iones de plata son eficientes para la destrucción de E.Coli pero no así con otras especies bacterianas, virus y algas.

Los iones metálicos en general no son desinfectantes eficientes, son difíciles de producir y son muy selectivos por lo que no se emplean con frecuencia actualmente.

3.5 Halógenos y otros compuestos

El cloro es un halógeno del cual se habló anteriormente, por lo tanto, solo faltan por mencionar el yodo y el bromo, que son menos comunes pero también son agentes oxidantes y desinfectantes.

El bromo es muy parecido al cloro pero su costo es mucho mayor. Se emplea básicamente para la desinfección de albercas.

El yodo lo utilizan los militares y campistas como un tratamiento de emergencia para agua potable. Es un halógeno que no se recomienda consumir continuamente porque causa efectos en el metabolismo de la tiroides del hombre. Actualmente se emplea con eficiencia en el campo de la medicina para la curación de heridas leves y cirugía.

Otro desinfectante es el ácido peracético, el cual se emplea principalmente en la desinfección de equipos para diálisis. Es un desinfectante relativamente nuevo y presenta características similares al formaldehído aunque con mayores dificultades de manejo. También es compatible con algunas membranas que no toleran el cloro, presentando un tamaño molecular suficientemente pequeño para atravesar las membranas y desinfectarlas por ambos lados. Algunas de las desventajas son su alto costo y su inestabilidad. Entre los biocidas no oxidantes se encuentra el formaldehído, el cual es un compuesto que se ha utilizado como desinfectante por su estabilidad, gran efectividad contra una gran variedad de bacterias y baja corrosividad, se puede clasificar como agente esterilizante debido a su capacidad esporicida, sin embargo su aplicación está limitada debido a los efectos dañinos en el ser humano. Generalmente se aplica con una concentración baja de 0.5 % para desinfección de membranas para ultrafiltración y ósmosis inversa, resinas de intercambio iónico, sistemas de almacenaje y distribución. En altas concentraciones, aproximadamente 4 %, se emplea como un tratamiento fuerte para sanitizar sistemas para hospitales.

Los compuestos cuaternarios de amonio son los más usados en el campo farmacéutico, alimenticio y como agente para sanitizar áreas y equipo médico. Finalmente los surfactantes ácidos aniónicos son menos empleados como biocidas debido a su limitada actividad contra algunas bacterias encontradas comunmente en sistemas de purificación del agua.

CAPÍTULO VI

APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS AVANZADOS EN LA INDUSTRIA MEXICANA

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos avanzados o terciarios tienen como propósito producir agua con una calidad específica para cada industria mexicana.

Los requerimientos que tiene el país actualmente se van incrementando cada vez, por lo tanto es necesario contar con la tecnología y la preparación más avanzadas.

La cultura de agua en México está creciendo, sin embargo falta mucho todavía y será necesario especializarnos cada vez más.

El agua es un recurso natural que debemos conservar por lo tanto la industria debe preocuparse por reciclarla y conservarla.

A continuación se mencionan algunas industrias y sus requerimientos de calidad de agua para conocer donde se aplican los tratamientos terciarios en México.

2. LA INDUSTRIA MEXICANA Y LOS TRATAMIENTOS AVANZADOS

2.1 Industria automotriz

La industria automotriz utiliza agua desmineralizada para el proceso de "primer" y para la dilución de pinturas. Su obtención puede ser por

intercambio iónico, generalmente con un lecho mixto de resinas catiónicas y aniónicas fuertes; y ósmosis inversa, con un diseño con tratamiento al concentrado o al permeado de acuerdo a la calidad de agua de alimentación.

Para el agua de servicio (como en cualquier industria), por ejemplo para calderas, se requiere de agua suavizada, la cual se obtiene por medio de un suavizador que consiste generalmente de un lecho de resinas de intercambio catiónico fuertemente ácidas.

Es importante no olvidar el pretratamiento adecuado al agua de alimentación en cada proceso, por ejemplo, filtro con grava y arena, con carbón activado, filtro de sedimentación dual, filtro-cartucho de polipropileno, ozonización, clorinación, entre otros.

2.2 Industria de lácteos

En la industria de lácteos, se necesita agua de alta calidad y sobre todo sin contaminación microbiana. En México se utiliza agua suavizada para el proceso de la leche, sin embargo hay algunos proyectos para obtener agua con mejor calidad, por ejemplo LICONSA de Tlalnepantla, se proyectó la aplicación de ósmosis inversa o de un tren completo de intercambio iónico para la desmineralización del agua que se utiliza en la hidratación de la leche.

2.3 Industria refresquera

La industria refresquera mexicana presenta un panorama pobre en cuanto a tratamiento de agua y esto se debe a que en épocas pasadas cuando se

contaba con espacios grandes, era suficiente el uso del tratamiento químico (clarificación del agua). Por otro lado, la difusión de sistemas modernos y automatizados ha sido lenta y finalmente el factor económico ha influido para frenar este crecimiento.

El tratamiento químico consiste en la adición de algunos compuestos como hidróxido de calcio, o si el agua contiene compuestos de sodio se requiere de cloruro de calcio, en combinación con floculadores, como el sulfato ferroso; seguido por la clarificación-sedimentación y finalmente procesos de filtración.

El intercambio iónico ofrece otra opción para el tratamiento del agua con la ventaja de que puede consistir en un proceso automático o semiautomático con un control de la calidad del agua más completo que en el tratamiento químico.

La ósmosis inversa ofrece, además de un proceso automático y mejor calidad de agua, una opción para recuperar el agua de lavado de botellas como ya se está haciendo en algunas plantas como: Jugos Naturales de Los Reyes La Paz (de Coca Cola).

Muchas refresqueras se encuentran en transición para aplicar tratamientos terciarios en sus plantas debido a las ventajas que se han señalado.

2.4 Industria petroquímica

La industria petroquímica utiliza en su mayoría agua suavizada tanto para calderas, como para torres de enfriamiento. El tratamiento más empleado es

el intercambio iónico. En las plataformas petroquímicas el agua potable es un recurso escaso y en algunas de ellas emplean ósmosis inversa tanto para el agua potable como para servicios y de proceso. Es necesario determinar un pretratamiento adecuado para no tapar las membranas.

2.5 Industria alimenticia

La industria alimenticia emplea una gran variedad de calidades de agua de acuerdo al punto de aplicación, sin embargo se puede decir que utiliza métodos convencionales (al igual que la industria refresquera) y en algunas de ellas requieren agua desmineralizada que pueden obtener con intercambio iónico, ósmosis inversa o alguna combinación de estos procesos. En algunos casos se requiere de agua baja en sales y libre de microorganismos tanto en su proceso como en la limpieza y desinfección de equipo y materiales. En este caso sería recomendable el proceso de ósmosis inversa.

2.6 Industria electrónica

En la electrónica se requiere agua con alta pureza debido a que los elementos electrónicos son susceptibles a cualquier ión presente. En algunas industrias utilizan un arreglo de intercambio iónico que consiste en resinas catiónicas fuertemente ácidas, aniónicas fuertemente básicas y un lecho mixto, por ejemplo para la refinación electrolítica de cobre.

La ósmosis inversa ofrece un panorama muy favorable para el agua requerida en la electrónica, ya sea combinada con intercambio iónico, con otro sistema de ósmosis inversa o en otros casos incluso destilación.

Para agua de servicios como: calderas y torres de enfriamiento solo se requiere de agua suavizada.

2.7 Imprenta

El agua requerida para placas de impresión donde se utiliza tinta hidrofílica, debe ser por lo menos suavizada, la cual se obtiene por intercambio iónico.

2.8 Industria vidriera

En la industria vidriera utilizan agua suavizada para el enfriamiento de cuchillas para el corte de botellas y agua desmineralizada para la preparación de soluciones que ayudan a que resbalen los envases.

Los procesos que pueden aplicar, además de los convencionales, son intercambio iónico y ósmosis inversa.

2.9 Industria textil

La industria textil utiliza agua suavizada para el agua de teñido y afelpado de sus telas. El agua para calderas y otros servicios es de esta misma calidad, por lo tanto lo que más se emplea, además de los convencionales, es el intercambio iónico.

2.10 Industria farmacéutica

La industria farmacéutica es donde se cuenta con una gran variedad de sistemas y tratamientos de agua para proceso, debido a que se requiere de agua de alta calidad.

Algunos sistemas, que varían debido a la calidad de agua cruda, son:

- Filtración y destilación

- Desmineralización con intercambio iónico y desinfección con luz ultravioleta.
- Desmineralización con intercambio iónico y microfiltración.
- Ósmosis inversa
- Ósmosis inversa y destilación
- Ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta.

2.11 Industria vitivinícola

Dentro de la industria vitivinícola en México se encuentra la Casa Pedro Domecq, que utiliza agua desmineralizada para algunos procesos y agua desmineralizada y desinfectada para otros. Cuenta con varios arreglos de intercambio iónico para el agua únicamente desmineralizada y a partir de noviembre de 1992 cuenta con un equipo de ósmosis inversa para el agua desmineralizada y desinfectada. Este tratamiento sustituyó a otro tren de intercambio iónico y luz ultravioleta como se describe en la siguiente sección.

El agua para servicios se obtiene de estos mismos procesos. Las industrias localizadas al pie de los viñedos mexicanos requieren de agua desmineralizada obtenida por intercambio iónico.

3. ESTUDIO ECONÓMICO PARA INTRODUCIR EL TRATAMIENTO DE AGUA DE PROCESO EN UNA PLANTA VITIVINÍCOLA MEXICANA

El agua de proceso, que requiere una planta vitivinícola como se señaló anteriormente, necesita tener un tratamiento de agua por medio del cual se disminuya la concentración de sales disueltas, el contenido de sílice y los microorganismos. Además debe ser aprobada organolépticamente por personal especializado, debe tener un sabor fresco, suave y agradable, una apariencia transparente y brillante; y un aroma fresco y ligero.

El estudio económico que se presenta a continuación, se realizó para optimizar el tratamiento del agua con la introducción de nueva tecnología.

El tratamiento de agua que venía realizándose y que continúa siendo útil en determinados pasos del proceso de elaboración de productos con alta graduación alcohólica (aguardientes de uva, brandies), consiste en:

1. Filtración del agua cruda por medio de carbón activado.
2. Desmineralización del agua por medio de resinas de intercambio iónico.
3. Esterilización del agua con luz ultravioleta.

La alternativa presentada consiste en el tratamiento del agua con ósmosis inversa tecnología que está empezando a conocerse mejor en nuestro país.

En los siguientes diagramas se encuentran:

1. Estudio económico para el tratamiento del agua.
2. Comparativo de costos para ambos tratamientos.

Estudio económico para el tratamiento de agua en una planta vitivinícola

Gastos de operación (para 1 año)

Concepto	Tratamiento con ósmosis inversa	Tratamiento con intercambio iónico
Energía eléctrica	38,080.00	6,480.00
Químicos	9,765.15	54,528.00
Mano de obra	2,130.20	39,420.00
Otros	0.00	11,895.94
Total	49,975.35	112,323.94
Diferencia	62,348.59	

Inversión

Equipo de ósmosis inversa	409,984.30
Sistema de intercambio iónico	188,000.00
Diferencia	221,984.30

Amortización

Ahorro en gastos	Ahorro	CPP	Acumulado
1er. año	68,271.70	19 / 2 %	68,271.70
2º año	80,501.38	17 / 2 %	148,773.09
3er. año	93,318.54	15 / 2 %	242,091.63
4º año	100,318.03	13 / 2 %	348,409.66
5º año	22,685.47	11 / 2 %	371,095.13
6º año	119,011.30	11 / 2 %	467,420.96

Análisis de inversiones

Año	Préstamo + intereses	Saldo	Amortización con el ahorro
1	273,040.68 23 %	204,768.98	(204,768.98)
2	247,770.46 21 %	167,269.08	(167,269.08)
3	199,050.20 19 %	105,731.66	(105,731.66)
4	123,706.05 17 %	17,388.02	(17,388.02)
4.2	17,909.66 15 %	(4,775.81)	4,775.81

Todos los costos están en nuevos pesos a dic. 1992

Comparativo de costos del agua

Base de cálculo

1 año X 20,000 lph X 240 días /año

Base = 115,200,000 litros de agua al año

Costo de operación anual en nuevos pesos (a diciembre de 1992)

Tratamiento	Costo en N\$
Ósmosis inversa	49,975.34
Intercambio iónico	112,323.94

Costo del agua en nuevos pesos (a diciembre 1992)

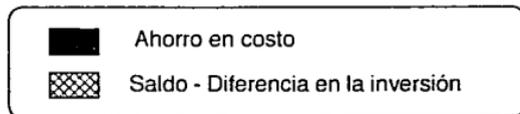
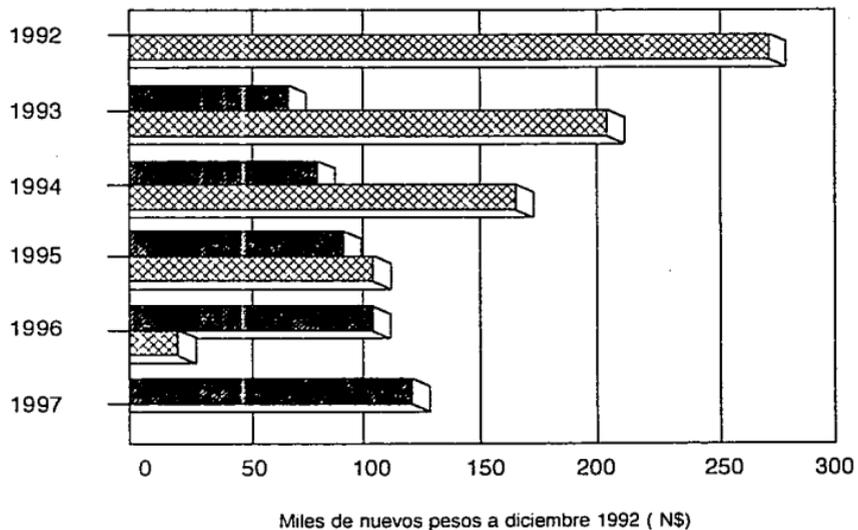
Tratamiento	Costo
Ósmosis inversa	N\$ 0.43 / m ³
Intercambio iónico	N\$ 0.98 / m ³

3. Gráficas de costo-beneficio, costos de operación y agua desechada por los mismos tratamientos. En esta última gráfica se observa que el agua de empleada en la regeneración de resinas solo podría ser aprovechada si se contara con otro tratamiento para su recuperación, sin embargo únicamente se neutraliza y desecha, en cambio el agua del concentrado se diluye en las cisternas de contraincendio y se utiliza en servicios sanitarios, por lo tanto no se deshecha.

De esta forma, el tratamiento de ósmosis inversa ofrece las siguientes ventajas:

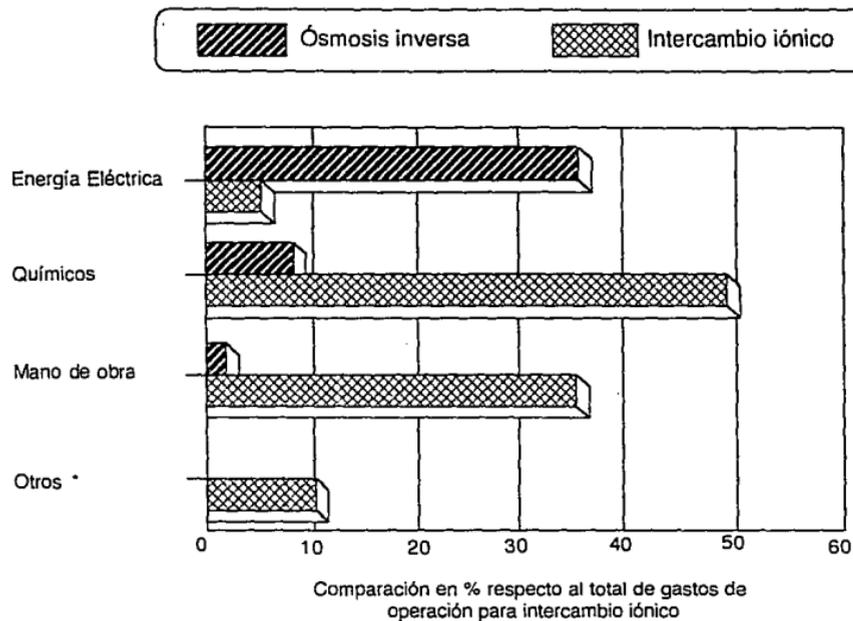
- Es un proceso automatizado, por lo que no requiere de un costo alto de mano de obra.
- Es un proceso que no produce agua de desecho
- Los resultados de calidad de agua no tienen una variación considerable.
- Se tiene un aseguramiento de la calidad del agua en todo el tiempo porque se monitoréan en forma continua los parámetros fisicoquímicos.

Gráfica de costo - beneficio para el tratamiento de agua en una industria vitivinícola



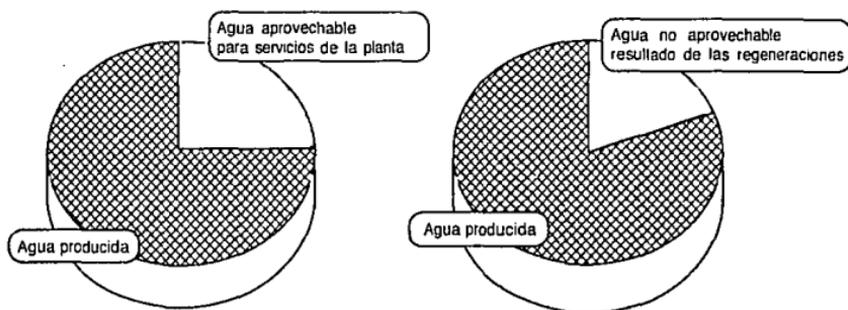
Diciembre 1992

Cuadro comparativo de gastos de operación para el tratamiento de agua en una planta vitivinícola



* Otros se refiere a reposición de resinas de intercambio iónico

Producción anual de agua por dos diferentes tratamiento de agua para una planta vitivinícola



Tratamiento por ósmosis
inversa
Recuperación = 75 %

Tratamiento por intercambio
iónico

Nota: El sistema de ósmosis inversa para este caso particular tiene una recuperación del 75% que cual puede variar de acuerdo a cada sistema específico y sus membranas.

4. COMENTARIOS

La industria mexicana se encuentra atrasada en algunas áreas, sin embargo, las exigencias de la época actual, el tratado de libre comercio, la calidad total en los procesos y productos, la situación política y económica, hacen necesario un esfuerzo cada vez mayor para estar en una superación constante.

Las industrias transnacionales presentan un panorama actualizado, pero también hay industrias mexicanas que se han preocupado por estar al día de los avances tecnológicos, sistematización y automatización de los procesos, mejorando calidad, producción y abatido costos.

Sin embargo en algunas industrias existen muchas limitantes para lograrlo por ejemplo, la tradición (hacer las cosas de la misma forma de siempre porque así se han hecho), la dirección de personal con una preparación pobre, la falta de recursos económicos, falta de apoyo en otras industrias por manejar mal la confidencialidad, el exceso de burocratismo, malas experiencias con proveedores sin soporte técnico, entre otras.

El cambio es muy difícil en empresas que tienen personal con mando muy antiguo y sin capacitación continua, en empresas donde sus directivos no se interesan por competir o que se sobreestiman, en empresas que están quebrando, en empresas que no están interesadas en invertir para su automatización; etcétera, por eso es necesario que cada uno se actualice y

especialice, que se abran fronteras para poder aportar un cambio positivo a nuestro país.

Las normas de agua están ganando más importancia y se están especializando para las diferentes áreas industriales, las empresas mexicanas deben mantenerse al tanto de ellas para que se fortalezca el esfuerzo que se realiza en su elaboración y buen manejo.

El agua potable embotellada ha alcanzado un crecimiento considerable que ha impulsado a la realización de exhibiciones, conferencias, seminarios y lo más importante, una difusión de la cultura del agua en México.

APÉNDICE I
LEGISLACIÓN

En este apéndice se contemplan la relación de normas técnicas ecológicas relacionadas con el agua residual.

NTE-CCA-001/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de centrales termoeléctricas convencionales.

Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-002/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria productora de azúcar de caña.

Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-003/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de refinación de petróleo crudo, sus derivados y petroquímica básica. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-004/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la

determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de fertilizantes, excepto de las que produzcan ácido fosfórico como producto intermedio. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-005/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de productos plásticos y polímeros sintéticos. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-006/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de la fabricación de harinas. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-007/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de la fabricación de la cerveza y de la malta. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-008/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en

cuerpos de agua, provenientes de la industria de asbestos de construcción.
Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-009/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria elaboradora de leche y sus derivados. Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-010/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria manufacturera de vidrio plano.
Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-011/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de productos de vidrio prensado y soplado.
Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-012/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de la fabricación de caucho sintético, llantas y cámaras. Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-013/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria del hierro y del acero. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-014/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria textil. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-015/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de la celulosa y el papel. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-016/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de bebidas gaseosas. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-017/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la

determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de acabados metálicos. Diario Oficial del 19 de octubre de 1988.

NTE-CCA-018/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de laminación, estrusión y estiraje de cobre y sus aleaciones. Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-019/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la impregnación de productos de aserradero. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-020/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de asbestos textiles, materiales de fricción y selladores. Diario Oficial del 6 de junio de 1988.

NTE-CCA-021/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria del curtido y acabado de pieles.

Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-022/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de matanza de animales y empacado de cárnicos. Diario Oficial del 4 de agosto de 1988.

NTE-CCA-023/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de envasado de conservas alimenticias. Diario Oficial del 19 de octubre de 1988.

NTE-CCA-024/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria de la industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica virgen. Diario Oficial del 14 de diciembre de 1988.

NTE-CCA-025/88

Establece los límites máximos permisibles y el procedimiento para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua, provenientes de la industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica reciclada. Diario Oficial del 14 de diciembre de 1988.

Acuerdo

Por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89, Gaceta Ecológica de enero de 1990.

NOM-2-1

Establece es sistema de unidades de medidas internacionales.

NOM-CH-5-1985

Establece los instrumentos de medición y termómetros industriales de vidrio.

NOM-AA-5-1980

Establece la determinación de grasas y aceites contenidos en el agua.

NOM-AA-7-1980

Establece la determinación de la temperatura del agua.

NOM-AA-8-1980

Establece la determinación del pH del agua.

NOM-AA-3-1980

Establece el procedimiento para el muestreo de aguas residuales.

NOM-AA-12-1980

Establece la determinación del oxígeno disuelto en el agua.

NOM-AA-14-1981

Establece el procedimiento para el muestreo de cuerpos receptores de agua.

NOM-AA-17-1980

Establece la determinación del color del agua.

NOM-AA-20-1980

Establece la determinación de sólidos disueltos totales del agua.

NOM-AA-26-1980

Establece la determinación del nitrógeno total del agua.

NOM-AA-28-1981

Establece la determinación de la DBO del agua.

NOM-AA-29-1981

Establece la determinación del fósforo total del agua.

NOM-AA-30-1981

Establece el análisis del agua para la determinación de la DQO.

NOM-AA-34-1981

Establece la determinación de sólidos del agua.

NOM-AA-36-1980

Establece la determinación de acidez y alcalinidad del agua.

NOM-AA-38-1981

Establece la determinación de la turbidez del agua.

NOM-AA-39-1980

Establece la determinación de las sustancias activas al azul de metileno del agua.

NOM-AA-42-1981

Establece la determinación del número más probable de coliformes totales y fecales.

NOM-AA-45-1981

Establece la determinación del color del agua en la escala platinocobalto.

NOM-AA-50-1981

Establece la determinación de fenoles del agua.

NOM-AA-51-1981

Establece la determinación de metales del agua por el método espectrofotométrico de absorción atómica.

NOM-AA-53-1981

Establece la determinación de materia extractable con cloroformo.

NOM-AA-57-1981

Establece la determinación del plomo por el método colorimétrico de la ditizona.

NOM-AA-60-1981

Establece la determinación del cadmio por el método colorimétrico de la ditizona.

NOM-AA-66-1981

Establece la determinación del cobre por el método colorimétrico de la neocuproína.

NOM-AA-71-1981

Establece la determinación de plaguicidas organoclorados del agua por el método de cromatografía de gases.

NOM-AA-72-1981

Establece la determinación de la dureza del agua por el método del EDTA.

NOM-AA-76-1982

Establece la determinación del níquel del agua.

NOM-AA-78-1982

Establece la determinación del zinc del agua.

NOM-AA-93-1984

Establece la determinación de la conductividad del agua.

DGN-AA-4-1977

Establece la determinación de sólidos sedimentables en el agua.

DGN-AA-6-1973

Establece la determinación de materia flotante en aguas residuales.

DGN-CH-1972

Establece los sistemas termales aplicados como elementos primarios de medición.

APÉNDICE II

1. Problemas de calidad según el tipo de resina

<u>Fuga</u>	<u>Tipo de Resina</u>
Alcalinidad	Catiónica débilmente ácida
Dureza	Catiónica débilmente ácida Catiónica fuertemente ácida
Sodio	Catiónica fuertemente ácida Aniónica débilmente básica
Acidéz Mineral Libre	Aniónica débilmente básica
pH alto	Aniónica débilmente básica
Conductividad	Aniónica débilmente básica Aniónica fuertemente básica
Silice	Aniónica débilmente básica Aniónica fuertemente básica
Enjuague difícil	Aniónica débilmente básica Aniónica fuertemente básica

2. Limpieza con salmuera alcalina

Concentración: NaCl al 10% y NaOH al 2%

Nivel de regeneración:

NaCl al 100% a 300 g/l y NaOH al 100% a 60 g/l

(a)

Temperatura: 35 a 50 °C

(b)

Notas: (a) El nivel de regeneración está referido al volumen de resina, en el caso de los lechos mixtos, deberá considerarse el volumen de la resina catiónica también, aún cuando solamente se desee tratar la resina aniónica. (b) Es necesario verificar la resistencia a la temperatura indicada por el fabricante ya que existen resinas aniónicas que son más sensibles a la temperatura.

Procedimiento

1. Bajar el nivel de agua dentro de la columna hasta alcanzar una altura entre 10 y 15 cm arriba del nivel de la resina.
2. Pasar la salmuera alcalina tibia a una velocidad máxima de 4 l/h cuidando de mantener el registro superior abierto durante la limpieza.
3. Detener la alimentación de salmuera y su envío al drenaje cuando se han introducido dos volúmenes completos de salmuera.
4. Dejar remojar la resina con salmuera durante un periodo de 8 horas mínimo, agitando con aire comprimido si es posible periódicamente

durante este paso.

5. Pasar el resto de salmuera a la misma velocidad que en el paso 2 y cerrar el registro superior si es necesario.

6. Enjuagar con agua cruda hasta la eliminación de la salmuera pasando 1 volumen lentamente y después 2 ó 4 volúmenes rápidamente.

7. Efectuar una regeneración doble (al nivel acostumbrado) teniendo cuidado de efectuar un enjuague completo entre las dos regeneraciones. En el caso de lechos mixtos deberán separarse primero las resinas y después efectuar dos regeneraciones completas.

3. Limpieza con hipoclorito de sodio

Concentración: 1% como cloro libre

Volumen: 3 litros de solución por litro de resina

Temperatura: ambiente

Notas: (a) Este procedimiento es un recurso extemo y solo se recomienda cuando otros procedimientos no han resultado efectivos. (b) El hipoclorito de sodio es un oxidante y desinfectante que requiere un manejo adecuado y con las precauciones indicadas por el proveedor. (c) Antes de iniciar este tratamiento es indispensable asegurar que las resinas están completamente agotadas para no afectar sus grupos funcionales. (d) Es un procedimiento de emergencia que no debe repetirse frecuentemente para no dañar permanentemente las resinas.

Procedimiento

1. Bajar el nivel de agua dentro de la columna hasta alcanzar una altura entre 2 y 5 cm arriba del nivel de la resina.
2. Pasar la solución diluida de hipoclorito a una velocidad máxima de 4 l/h, cuidando de mantener el nivel de flujo constante, para mejor control se recomienda mantener el registro superior abierto durante la limpieza.
3. Parar el paso de alimentación cuando se han introducido dos litros de solución por litro de resina.
4. Dejar remojar la resina con hipoclorito durante 3 a 4 horas máximo, agitando con aire si es posible.
5. Pasar el resto de hipoclorito a la misma velocidad señalada en el paso 2 y cerrar el registro si es necesario.
6. Enjuagar con agua cruda hasta la eliminación del hipoclorito.
7. Enjuagar una regeneración doble al nivel acostumbrado. En el caso de los lechos mixtos deberán efectuarse las dos regeneraciones completas, haciendo un enjuague completo entre los dos pasos, tanto para la resina catiónica como para la aniónica.

4. Limpieza con hidrosulfito de sodio

Concentración: Hidrosulfito de sodio al 2%

Volumen: 3 litros de solución por litro de resina

Notas: (a) Siempre agregue el hidrosulfito de sodio al agua y no al revés,

prepare la solución en un área ventilada. (b) El hidrosulfito de sodio se descompone rápidamente por lo cual no se recomienda almacenarlo durante mucho tiempo; una vez preparada debe utilizarse inmediatamente. (c) Nunca emplear el hidrosulfito para limpiar resinas aniónicas porque el hidrosulfito se deposita en los grupos funcionales.

Procedimiento

1. Bajar el nivel del agua dentro de la columna entre 2 y 5 cm sobre el nivel de resina.
2. Pasar la solución diluida de hidrosulfito de sodio, a una velocidad máxima de 4 litros de solución por litro de resina por hora, cuidando de mantener el nivel a un flujo constante. Abrir el registro si es necesario.
3. Detener la alimentación de hidrosulfito una vez que se han introducido dos litros de solución por litro de resina.
4. Dejar remojar la resina con la solución durante 12 horas (mínimo 4).
5. Pasar el resto del hidrosulfito a la misma velocidad que en el paso 2. Cerrar el registro si es necesario.
6. Enjuagar con agua cruda hasta la eliminación del hidrosulfito.
7. En el caso de resinas aniónicas efectuar una regeneración doble y en los lechos mixtos deberán separarse primero las resinas y después efectuar las dos regeneraciones completas.
8. En el caso de resinas catiónicas en el ciclo sodio efectuar una regeneración sencilla.

5. Limpieza con ácido clorhídrico

Concentración: HCl al 10 % e inhibidor de corrosión de 15 a 20 ppm

Nivel de regeneración: HCl al 100% a 300 g/l y el inhibidor de 0.45 a 0.60 g/l

Notas: (a) El nivel de regeneración está referido al volumen total de resina. (b) En el caso de limpieza de hierro, este procedimiento es un recurso extremo y solo se recomienda cuando la limpieza con hidrosulfito de sodio no ha sido efectiva. (c) El uso del inhibidor de corrosión es forzoso cuando existan problemas de resistencia del material de construcción del equipo. No se recomienda el formaldehído como inhibidor de la corrosión. (e) El ácido clorhídrico es muy corrosivo por lo tanto seguir las medidas de seguridad recomendadas.

Procedimiento

1. Bajar el nivel del agua hasta 2 a 5 cm arriba del nivel de la resina.
2. Pasar la solución de ácido a una velocidad máxima de 4 litros de solución por hora, cuidando de mantener el flujo constante. Abrir el registro si es necesario.
3. Detener la alimentación del ácido cuando se han introducido dos litros de solución por litro de resina.
4. Agitar con aire si es posible.
5. Dejar remojar la resina con el ácido durante 12 horas (mínimo 5 hs).
6. Pasar el resto del ácido a la misma velocidad que en el paso 2 y cerrar

el registro si es necesario.

7. Enjuagar con agua cruda hasta eliminar el ácido.

8. Efectuar una regeneración doble. Para los lechos mixtos deberán separarse las resinas y efectuar dos regeneraciones completas.

6. Esterilización con permanganato de potasio

Concentración: Permanganato de potasio a 500 ppm

Nivel de tratamiento: 1 gramo por litro

Notas: (a) El nivel de tratamiento se refiere al volumen de resina, en el caso de los lechos mixtos debe considerarse el volumen total de resinas catiónicas y aniónicas.

Procedimiento

1. Bajar el nivel del agua hasta 2 a 5 cm arriba del nivel de la resina.

2. Pasar la solución del permanganato a una velocidad máxima de 2 litros de solución por hora, cuidando de mantener el flujo constante. Abrir el registro si es necesario.

3. Detener la alimentación del permanganato cuando se han introducido dos litros de solución por litro de resina.

4. Dejar remojar la resina con el permanganato durante 3 horas (máximo 4 horas). Agitar con aire comprimido si es posible periódicamente durante este paso.

5. Pasar el resto del permanganato a la misma velocidad que en el paso 2 y

cerrar el registro si es necesario.

6. Enjuagar con agua cruda hasta eliminar el permanganato.

7. Efectuar una regeneración normal.

7. Esterilización con agentes de cloro lento

Concentración: 500 ppm

Volumen: 2 litros de solución por litro de resina

Notas: (a) Este procedimiento a diferencia de la limpieza con hipoclorito de sodio, puede emplearse en forma repetitiva, se recomienda para este tratamiento un agente que libere el cloro lentamente. (b) Para las resinas aniónicas se debe asegurar que están completamente agotadas. Esto se puede lograr pasando un litro de salmuera al 10 % de concentración por litro de resina. La resina catiónica debe estar completamente en la forma sodio.

Procedimiento

1. Bajar el nivel del agua hasta 2 a 5 cm arriba del nivel de la resina.

2. Pasar la solución del agente de cloro lento a una velocidad máxima de 2 litros de solución por litro de resina por hora, cuidando de mantener el flujo constante. Se recomienda abrir el registro durante la limpieza.

3. Parar la alimentación de la solución cuando se han introducido dos litros completos de solución por litro de resina.

4. Dejar remojar la resina con el agente de cloro lento durante 3 horas

(máximo 4 horas). Agitar con aire comprimido si es posible periódicamente durante este paso.

5. Pasar el resto del permanganato a la misma velocidad que en el paso 2 y cerrar el registro si es necesario.

6. Enjuagar con agua cruda hasta eliminar el agente de cloro lento.

7. Efectuar una regeneración doble, teniendo cuidado de un enjuague completo entre las dos regeneraciones. Para los lechos mixtos deberán separarse primero las resinas y después efectuar las dos regeneraciones completas.

8. Limpieza con sosa cáustica

Concentración: NaOH al 2 %

Nivel de regeneración: 130 a 150 g/l

Notas: (a) Es muy importante cuidar el factor de la temperatura ya que si se excede se puede disminuir el tiempo de vida de las resinas aniónicas.

(b) La sosa cáustica es un producto químico muy activo y ataca violentamente la piel, es imprescindible conocer y practicar las recomendaciones de seguridad para su manejo.

Procedimiento

1. Es conveniente efectuar un precalentamiento del lecho con 1 litro de agua a la temperatura del regenerante por litro de resina.

2. Pasar la solución de sosa cáustica a una velocidad máxima de 2 l/h.
3. Enjuagar hasta la eliminación de la sosa.
4. Para el caso de las resinas catiónicas, efectuar una regeneración doble, teniendo cuidado de efectuar un enjuague completo entre las dos regeneraciones.

BIBLIOGRAFÍA

GOLDEN, L.

Aplicaciones industriales de las resinas de intercambio iónico
Chem. Ing. Engr, núm 429, oct.1986, p.p. 31-34

Comprendiendo la ultrafiltración

Cortesía de Millipore

R P O 3 9. México D.F., 1989, 16 p.p.

NAIL, ARTHUR E.

Desinfection takes on a new look with ozone and ultraviolet

Water and Wastes Engineering

Houston Research, Inc. Texas 1990, 4 p.p.

MELTZAR, THEODORE H.

High-Purity Water Preparation. For the Semiconductor, Pharmaceutical, and Power Industries.

Tall Oaks Publishing, Inc., first printing. U.S.A. 1993, 833 p.p.

MASKEW FAIR GORDON, CHARLES GEYER JOHN, ALEXANDER OKUN DANIEL

Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales

Vol.2, 1a.edición, Ediciones Ciencia y Técnica, S.A.

México D.F. 1987, 547 p.p.

MASKEW FAIR GORDON, CHARLES GEYER JOHN, ALEXANDER OKUN DANIEL

Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales

Vol.4, 1a.edición, Ediciones Ciencia y Técnica, S.A.

México, D.F. 1987, 754 p.p.

WATTS, D.J.

Innovative Solution to an old problem.

Mfg. Chemist, Vol. 56, Num.3.

U.S.A. Mar. 1985, p.p. 59

Introducción a la Ingeniería Sanitaria (agua)

S A R H Subsecretaría de Planeación

Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica

Subdirección de Investigación y Entrenamiento

3a. edición. México, D.F. 1981

PAREKH BIPIN S.

Making Water Pure

Reprinted from Chemical Engineering, Jan 1991. McGraw Hill Publication.
Ionpure Technologies Corporation U.S.A. 1991.

TAFFE, PETER

Managing cleaner ways to potable water supply.

Actualización gerencial. INFOTEC.

Processing February (London) 1990 p.p. 21-25

KEMMER FRANK N., McCALLION JOHN

Manual de Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.

Nalco Chemical Company, Tomo I, McGraw Hill.

México, D.F., 1989 p.p. 12-1 a 12-39

SALVADOR AYANEGUI J.

Manual de Aguas para Usos Industriales

Vol. 1 Ediciones Ciencia y Técnica, S.A.

México, D.F., 1987 p.p. 181-234

ZARATE MOLINA, ALFREDO

Manual de diseño por computadora de plantas de tratamiento de agua para la industria.

Tesis UNAM 1989

DEGREMONT

Manual Técnico del Agua.

Grafo, S.A. Bilbao, España 1979.

POLLOCK SHEA, CYNTHIA

Medidas contra la destrucción de la capa de ozono.

Protección del ambiente: Dos opiniones II.

Instituto para la Vigilancia Mundial.

U.S.A., Washington, (Worldwatch Institute), 1988, p.p. 67-73

LANGLAIS, BRUNO; RECKHOW, DAVID; BRINK, DEBORAH.

Ozone in Water Treatment. Application and Engineering.

American Water Works Association, Research Foundation.

Lewis Publishers. 2th printing. U.S.A. 1991, p.p.319-407

PERRY ROBERH H.
Perry's Chemical Engineer's Handbook.
6th.ed., McGraw Hill International Editions
4th. printing 1988.

Plantas de tratamiento primario de aguas residuales
S A R H Subsecretaría de Planeación
Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica
Vol. III p.p. 601-638

MORGELI, B.
Portable plant takes the treatment to the water.
Environmental Protection Survey.
Noticias Técnicas, INFOTEC.
U.S.A., Minnesota, 1991, p.p. 19-21

Pure Water Handbook
OSMONICS, Inc.
U.S.A., Minnesota, 1991, 119 p.p.

L. SNOEYINK VERNON, JENKINS DAVID
Química del agua
1a. ed. Editorial Limusa Noriega
México D.F., 1990, 508 p.p.

KING M.
Reverse Osmosis Lecture. Transcripts.
Imperial College Lecture.
England, March 1984, p.p. 1-9

HOAG, SELWYN; ALBEM, WILLIAM.
Reverse Osmosis: The Economical Production of Quality Water
Millipore Corporation, N.Y., 1990

BEISENBERG T.N., MIDDLEBROOKS E.J.
Reverse Osmosis. Treatment of Drinking Water.
Butterworth Publishers
U.S.A. 1986, p.p. 133.

LOEB, S. ; S., SOURIJAN.
See Water Desmineralization by Means of an Osmonic Membrane
Advances in Chemistry Series, 38, 1962, p.p. 117.

LOEB, S. ; S., SOURIJAN.

See Water Desmineralization by Means of a Semipermeable Membrane
U.C.L.A. Department of Engineering Report 60-60, 1960.

Selected Papers on Desalination and Ocean Technology

Edited by Sumner N. Levine.

Dover Publication, Inc.

U.S.A. N.Y., 1968,p.p. 393-411.

NKS W., SHARPLES A.

Studies on desalination by reverse osmosis.

I. Structure and asymmetric flow properties of cellulose acetate desalination membranes. J. Appl. Chem. 16 p.p 28-32.

BONILLA DOMINGUEZ, UBALDO

Tratamiento de aguas residuales. Cribado, Igualación y Mezclado.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.

México, D.F. octubre 1983.

MENDOZA GAMEZ, GASTON

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos. Filtración.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.

México, D.F. octubre 1983.

IZURIETA RUIZ, EDMUNDO

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos. Lagunas de estabilización, clasificación y descripción.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.

México, D.F. octubre 1983.

BONILLA DOMINGUEZ, UBALDO

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos. Neutralización.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.

México, D.F. octubre 1983.

JONGUITUD FALCON, VICENTE

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos. Procesos biológicos de tratamiento.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.

México, D.F. octubre 1983.

MENDOZA MARQUEZ, HECTOR

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos.
Tratamiento avanzado de aguas residuales.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.
México, D.F. octubre 1983.

PAZ SANCHEZ, ARNULFO

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos.
Tratamiento utilizando el proceso de lodos activados.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.
México, D.F. octubre 1983.

PAZ SANCHEZ, ARNULFO

Tratamiento de aguas residuales, municipales, industriales y reusos.
Estabilización.

División de Educación Continua Facultad de Ingeniería UNAM.
México, D.F. octubre 1983.

ULTRAPURE WATER:

COLLENTRO, WILLIAM .

Pharmaceutical Water. An overview of USP purified water-Part 1. Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water. Vol. 9 Num.8, U.S.A., Nov 92, p.p.12-20.

.McGARVEY, FRANK X; SHIELDS, RICHARD.

Desmineralization. Efficient operation of ion-exchange plants.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water. Vol. 10 Num.7, U.S.A., Oct 93, p.p. 24-26.

GAGNON, STEVE.

Case study - Reverse osmosis problems.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water. Vol. 10 Num.7, U.S.A., Oct 93, p.p. 33-43.

WINDISCH, PEGGY; CAMPBELL, JEFF; LUCERO, VIC; STANDING-WARRIOR, FLOYD.

Membranes. Iron removal using thin-film ultrafiltration: A case study at Fort St. Vrain nuclear power plant.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water. Vol. 10 Num.7, U.S.A., Oct 93, p.p. 50-56.

SEN GUPTA, SUPRIYA K.; SLADE, JOSEPH A.

Membrane treatment of radioactive waste liquids.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 10 Num.8, U.S.A., Nov 93, p.p. 12-22.

HARFST, WILLIAM F.

Back to Basics. Using reverse osmosis to pretreat demineralizer feedwater.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 11 Num.3, U.S.A., Apr 94, p.p. 45-47.

NICKERSON, GLEN; McCLAIN, BILL; BUKAY, MICHAEL

Semiconductors. Investigation of severe flux decline in a two-pass CA/Thin-Film composite membrane RO system.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 11 Num.4, U.S.A., May/June 94, p.p. 26-37.

GAGNON, STEVE; LESICZKA, RICHARD

Membranes. AT&T technologies-RO system case study.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 11 Num.4, U.S.A., May/June 94, p.p. 45-53

HERNON, BRIAN P.; ZANAPALIDOU, R. HILDA; ZHANG, LI; SIWAK, LINDA

Power. Electrodeionization in power plant application.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 11 Num.5, U.S.A., Jul/Aug 94, p.p. 33-41.

KAAKINEN, JOHN; MOODY, CHARLES; FRANKLIN, JOHN; AMMERLAAN, ANTON

Instruments. SDI instrumentation to estimate RO feedwater fouling potential.

Ultrapure Water. The Definitive Journal for Users of High-Purity Water.
Vol. 11 Num.5, U.S.A., Jul/Aug 94, p.p. 42-54

WATER CONDITIONING & PURIFICATION:

MORSE PETER

Selecting Proper Filter Media & Filter Housings.

Water Conditioning & Purification. Vol. 36 Num. 4, May 94, p.p.62-65

SCHLEICHER, CARL L.

Small Scale Ozonation System and Applications.

Water Conditioning & Purification. Vol. 36 Num. 4, May 94, p.p.66-69

IVUSICH, WAYNE

Using Chlorine To Treat Pools & Spas.

Water Conditioning & Purification. Vol. 36 Num. 5, Jun 94, p.p.70-78

WATER TECHNOLOGY:

PAUL, DAVID H.

Three Feedwater Factors That Affect RO.

Water Technology. Vol. 16 Num. 9, Sep 93 p.p.53-54

WILLIAMSON, JIM

Understanding Crossflow Filtration.

Water Technology. Vol. 16 Num. 9, Sep 93 p.p.55-57

HUNTER, JOE

Desinfect It With Chlorine.

Water Technology. Vol. 16 Num. 9, Sep 93 p.p.58-59

RICH, TED

Using Ozone For Pools, Spas.

Water Technology. Vol. 17 Num. 7, Jul 94 p.p.24-27

JOULAKIAN, MIKE O.

Why Won't My RO Work?

Water Technology. Vol. 17 Num. 8, Aug 94 p.p.70

REID, ROGER

Choose RO Prefiltration Based on Needs.

Water Technology. Vol. 17 Num. 8, Aug 94 p.p.72-74

MORELLI C.D.

Water Manual. Beverage World.

2th.ed. Keller International Publishing Co.

U.S.A., N.Y. 1990, p.p. 637.

H.J. BRANDS, E. TRIPKE

Water Manual.

Babcock Anfacen AG in Oberhausen; Vulkan-Verlag, Essen, in Germany, 1982
p.p. 87-140