

110  
2 es°

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXÁMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

MANUAL DE DISEÑO POR COMPUTADORA DE PLANTAS  
DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
ALFREDO ZARATE MOLINA

México, D.F. 1989

TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN



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.

## INDICE

	PAGINA
I. INTRODUCCION	I
1. SUMINISTRO DE AGUA INDUSTRIAL	1
2. IMPUREZAS DEL AGUA	5
3. TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS	13
4. ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA INDUSTRIAL	21
5. PROCESOS DE TRATAMIENTO EXTERNO DEL AGUA	49
6. REJILLAS	55
7. AERACION	59
8. ADSORCION	71
9. CLORACION	77
10. COAGULACION	87
11. FLOCULACION	101
12. SEDIMENTACION	113
13. CLARIFICACION	123
14. CAL SODADA EN FRIO	137
15. CAL SODADA EN CALIENTE	159
16. FILTRACION	173
17. INTERCAMBIO IONICO	195
18. DESAERACION	245
19. EVAPORACION	255
20. OSMOSIS INVERSA	269
21. ULTRAFILTRACION	283
22. ELECTRODIALISIS	289
23. COSTOS (1989)	301
24. EVALUACION DE UN PROYECTO	319
CONCLUSIONES	335
BIBLIOGRAFIA	337
APENDICE	341

Desde los tiempos más remotos, los hombres se han establecido junto a las riberas de ríos y lagos con objeto de disponer de agua potable para sus hogares y sus industrias.

En la actualidad, el público en general, comienza a darse cuenta de la importancia del agua, a medida que los encabezados de la prensa señalan que la calidad y la disponibilidad de este líquido constituyen cada día un problema más grave. La industria en expansión debe examinar con sumo cuidado las limitaciones que puedan imponerle el agua: ¿Con qué cantidad de agua cruda se contará dentro de diez años? ¿Se puede reducir el consumo recirculando el suministro? ¿Qué calidad de agua se requerirá en nuevas aplicaciones? ¿Cómo puede lograrse económicamente esta calidad, en vista de que la concentración de impurezas en los abastecimientos de agua cruda aumentan en forma constante?

Para analizar estos problemas en su debida perspectiva, en este volúmen, que estudia los usos industriales del agua, se establecen los principios y técnicas generales sin ocuparse de los detalles específicos relacionados con el uso del agua en cada industria.

Hay pocas aplicaciones importantes del agua que son exclusivas de una sola industria. Las principales -generación de vapor, enfriamiento y procesamiento- son comunes a todas las industrias. Los diferentes procesos en que interviene el agua tales como el transporte y lavado, pueden aplicarse en muy diversas industrias, que no tienen ninguna otra relación entre sí.

El agua es esencial prácticamente en todas las operaciones industriales, pero sólo en raras ocasiones es posible utilizarla tal y como se extrae de una corriente, un lago o un pozo. Si no se toman las precauciones necesarias, las impurezas que contiene a causa de la contaminación natural o artificial pueden afectar gravemente tanto a los equipos como a los productos.

## II INTRODUCCION

El agua absolutamente pura es una rareza de laboratorio. Incluso cuando no está contaminada con aguas negras o desechos industriales, el agua cruda, tal como se encuentra en la naturaleza siempre lleva sustancias extrañas. Las impurezas más comunes son gases disueltos, como dióxido de carbono y oxígeno, y materia mineral soluble, incluyendo iones metálicos tales como los de calcio, magnesio, hierro y sodio que se mantienen en equilibrio químico con aniones del tipo del sulfato, bicarbonato, carbonato, oxhidrilo, cloruro y otros. Estas sustancias van disolviéndose conforme el agua fluye sobre la tierra o se filtra a través de ella.

Además de los materiales disueltos, muchas aguas superficiales transportan sólidos que van desde arena que es pesada y se asienta con rapidez, hasta partículas dispersas en forma coloidal que son indefinidamente estables en suspensión. Dependiendo de su origen, el agua cruda también contiene cantidades variables de materia orgánica disuelta o dispersa.

La acumulación natural de impurezas en el agua es el resultado de los procesos químicos y físicos que se llevan a cabo en forma espontánea y no se puede hacer mucho por evitarla. Por lo contrario, la contaminación proveniente de las descargas de desechos municipales e industriales sí pueden controlarse.

La purificación del agua para uso industrial puede ser muy compleja o relativamente simple, dependiendo de las propiedades del agua cruda y el grado de pureza requerido. Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos, pero todos abarcan tres procesos básicos: tratamiento físico, químico y fisicoquímico.

En este volumen se analizan los métodos de tratamiento de aguas industriales, estudiando algunos de los problemas técnicos que se presentan y los principios en que se basan.

## 1.1 CICLO DEL AGUA EN LA NATURALEZA

El agua en la naturaleza se encuentra en forma sólida (grandes casquetes de hielo o inlandsis), en forma gaseosa (vapor de agua de la atmósfera) y en forma líquida (océanos, ríos y lagos). El agua puede pasar de un estado a otro de los mencionados siguiendo un camino cíclico que se repite de una manera indefinida.

Bajo la acción del calor solar las aguas oceánicas, y en general todas las aguas superficiales, se evaporan convirtiéndose en vapor de agua, que va a la atmósfera hasta una altura que depende de la temperatura y el grado de saturación de aquélla. Dicho vapor de agua se condensa en forma de nubes y vuelve a la superficie de la corteza terrestre como lluvia, nieve o granizo.

Una parte de las precipitaciones (lluvia o nieve) regresa a los océanos, ríos o lagos, con el que termina el ciclo, al volver el agua a su punto de partida. Sin embargo, si el agua cae sobre el suelo puede seguir otros caminos: a) Una parte se evapora inmediatamente y vuelve a la fase precedente. b) Otra parte circula por la superficie del terreno en forma arroyada, hasta ir a parar a lagos, ríos y océanos; cierta proporción de esta agua vuelve a la atmósfera por evaporación. c) Una tercera parte de las aguas de precipitaciones penetra en el suelo por medio de capilares, diaclasas, etc., y a veces se establece una verdadera circulación subterránea que da lugar a manantiales o desemboca en lagos, ríos o mares, volviendo así el inicio del ciclo. Parte de esta agua que se infiltra vuelve a la atmósfera por evaporación durante los períodos secos, o por la transpiración de los seres vivos. d) Una última parte del agua atmosférica retorna a la superficie de la corteza terrestre en forma de nieve y se acumula, si la temperatura es suficientemente fría, en forma de inlandsis o de glaciares.

## 2 SUMINISTROS DE AGUA INDUSTRIAL

Esquemáticamente, el ciclo del agua comprende las siguientes etapas: 1) evaporación; 2) circulación atmosférica, que depende de la meteorología; 3) precipitación; 4) circulación superficial y subterránea.

### 1.2 AGUAS SUPERFICIALES Y AGUAS SUBTERRANEAS

Básicamente los suministros de agua pueden dividirse en dos grandes grupos:

1.- Aguas superficiales.

2.- Aguas subterráneas.

Cuando la lluvia, o el agua formada por la fusión de la nieve o el hielo se ponen en contacto con el suelo, una parte de ella se evapora, parte se colecta y fluye por la superficie, y otra se sumerge en el suelo. Las aguas que se colectan o fluyen por la superficie para formar lagos, lagunas, ríos, arroyos o canales, se llaman aguas superficiales. Las aguas que se sumergen por la tierra y que se emergen en forma de manantiales o que se sacan mediante pozos, tiros o galerías filtrantes, se llaman aguas subterráneas.

#### 1.2.1 AGUAS SUPERFICIALES

El vapor de agua en las nubes es muy puro, sin embargo, a medida que el agua cae en forma de lluvia, a través de la atmósfera, se contamina con polvos y gases. Cuando alcanza la tierra, también capta impurezas en el terreno. Las aguas superficiales contienen materiales en suspensión producidos por erosionar los cauces de los ríos, lo que da lugar a lodos y turbiedad. En adición, contienen sustancias minerales disueltas las cuales son captadas de los terrenos por los que pasa, así como materia orgánica y color originados por desechos y vegetación en descomposición.

### 1.2.2 AGUAS SUBTERRANEAS

Las aguas subterráneas, por efecto de la filtración natural que sufren a través de terreno, en términos generales se encuentra libre de materia orgánica y turbiedad, pero debido a la presencia de gases y su mayor tiempo de contacto con el terreno y las rocas contienen más sólidos disueltos que las aguas superficiales. La naturaleza de las substancias disueltas depende de la composición de las rocas encontradas en su trayecto.

A pesar de su posible mayor contenido de materiales disueltos el agua de pozo tiene la ventaja de ser más clara y así como de estar libre de contaminación bacteriológica, lo que la hace más atractiva, sobre todo para uso como agua potable. Por otro lado, normalmente su temperatura es más baja, haciéndola también preferible para los servicios de enfriamiento. Su composición química es más estable que las aguas superficiales.



## 2.1 IMPUREZAS DEL AGUA

Las impurezas del agua se pueden clasificar en: (1) sustancia mineral disuelta; (2) gases disueltos; (3) turbidez y sedimentos; (4) color y materia orgánica; (5) sabores y olores; (6) microorganismos.

### 2.1.1 SUSTANCIA MINERAL DISUELTA

#### COMPUESTOS DE CALCIO

##### 1.- BICARBONATO DE CALCIO $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

Este compuesto existe únicamente en solución y se forma por la acción del agua que contiene  $\text{CO}_2$  sobre la piedra caliza, marmol, calcita, dolomita y otros minerales que contienen carbonato de calcio. En las calderas se descompone en un 100% en carbonato de calcio y  $\text{CO}_2$ . El  $\text{CO}_2$  es extremadamente corrosivo y el carbonato de calcio arriba de 5 ppm produce incrustación.

##### 2.- HIDROXIDO DE CALCIO $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Normalmente proviene del tratamiento de cal en frío o caliente cuando se pasa a la caldera forma incrustación como tal y se combina con la sílice formándose silicato de calcio ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) Xonitile, solubilidad 130 ppm.

##### 3.- SULFATO DE CALCIO $\text{CaSO}_4$

Es la única sal incrustante en la dureza no-carbonatada, cuando existe arriba de 50 ppm anhidrita. Los cloruros, nitratos de calcio y magnesio no incrustan por su alta solubilidad (superior a 350 000 ppm).

##### 4.- FOSFATO TRICALCICO $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Se forma al reaccionar los iones calcio con los fosfatos en pH alcalino y si no se agrega un acondicionador de lodos cuando es alta dureza forma incrustaciones de hidróxiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ).

COMPUESTOS DE MAGNESIO

1.- BICARBONATO DE MAGNESIO  $Mg(MCO_3)_2$

Este compuesto sólo existe en solución y se forma por la acción del agua que contiene bióxido de carbono libre sobre la magnetita, dolomita, piedra caliza dolomítica y otros minerales que contengan carbonato de magnesio. En las calderas se descompone un 80% en  $Mg(OH)_2$  y  $CO_2$  formandose incrustaciones de brucita  $Mg(OH)_2$  ya que la solubilidad es de 50 ppm, esta forma silicato de magnesio  $3MgOSiO_2 \cdot 2H_2O$ , con la sílice.

2.- SULFATO DE MAGNESIO  $MgSO_4$

El sulfato de magnesio es una sal muy soluble, teniendo una solubilidad de 170 000 ppm a 0°C, y de 356 000 ppm a 100°C. En las calderas de vapor es corrosivo.

3.- CLORURO DE MAGNESIO  $MgCl_2$

Se encuentra en agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos, etc. El cloruro de magnesio es delicuescente y muy soluble 362 000 ppm a 0°C y 443 000 ppm a 100°C. Es muy corrosivo en las calderas de vapor, y reacciona con el agua a dichas temperaturas para formar ácido clorhídrico e hidróxido de magnesio.

COMPUESTOS DE SODIO

1.- BICARBONATO DE SODIO  $NaHCO_3$

Su solubilidad en agua a 0°C es de 38 700 ppm, esta solubilidad aumenta al subir la temperatura, pero a los 37°C empieza a perder bióxido de carbono y a los 100°C se descompone en bióxido de carbono, agua y carbonato de sodio altamente soluble. En las calderas reacciona con el agua de manera que la mayor parte de él se convierte en bióxido de carbono e hidróxido de sodio.

2.- SULFATO DE SODIO  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

Al igual que las otras sales de sodio, el sulfato es muy soluble en agua y no forma depósitos.

3.- CLORURO DE SODIO  $\text{NaCl}$

Es el principal constituyente mineral del agua de mar (2.7%  $\text{NaCl}$ ), se encuentra también en depósitos salinos, lagos salados, salmueras naturales, etc. Igual que las otras sales de sodio encontradas en las aguas naturales y tratadas, tiene una alta solubilidad y no forman depósitos.

4.- HIDROXIDO DE SODIO  $\text{NaOH}$

No existe en forma natural en el agua y se produce en las calderas por descomposición de los carbonatos; se agrega para mantener la alcalinidad dentro de los límites así como el carbonato de sodio y ambos sirven para ablandar el agua de la caldera.

5.- FOSFATO DE SODIO

Se utiliza en tratamiento interno para evitar incrustaciones.

COMPUESTOS DE POTASIO

Al igual que los de sodio son de alta solubilidad y se utilizan para suplir a estos en las calderas de alta presión para evitar la fragilidad cáustica.

COMPUESTOS DE HIDROGENO

La acidez mineral se encuentra en muchas aguas de mina y en algunas aguas superficiales que han sido contaminadas por aguas de proceso o de drenajes de minas. Estas aguas son corrosivas.

## 8 IMPUREZAS DEL AGUA

### COMPUESTOS DE ALUMINIO

Existen en las aguas naturales de 0.5 a 8 ppm y debido a su carácter anfóterico es soluble en aguas ácidas como sulfato de aluminio o en las alcalinas en forma compleja. El aluminio en calderas de alta presión es de cuidado ya que forma incrustaciones muy duras con la sílice y el sodio.

### COMPUESTOS DE FIERRO

El hierro se encuentra presente en muchos suministros de agua en cantidades pequeñas, si se encuentra presente de 0.1 ppm o menos puede ser considerado como despreciable para muchos usos industriales. Si se presenta en cantidades mayores de 0.2 o 0.3 ppm, generalmente es muy objetable. Algunas de sus sales forman en las calderas incrustaciones de  $Fe_3O_4$ .

### COMPUESTOS DE MANGANESO

El manganeso es un constituyente raro del agua, pero es más dañino que el hierro y sus tolerancias para usos especiales son menores que para el hierro.

### COMPUESTOS DE COBRE

Existen en muy pequeñas cantidades en las incrustaciones de las calderas como  $Cu$ ,  $Cu_2O$  (cuprita) ó  $CuO$  (tenorita) y son producto del ataque por sus sales amoniacales a las válvulas del equipo.

### COMPUESTOS DE SILICE

Se les encuentra prácticamente en todas las aguas naturales y pueden estar presentes en cantidades que varían de 1 ppm o menos hasta más de 100 ppm. En las calderas de alta presión en presencia del aluminio forma incrustaciones de analcita ( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ )

y con el hierro acnita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ ).

### 2.1.2 GASES DISUELTOS

#### 1.- BIOXIDO DE CARBONO $\text{CO}_2$

El bióxido de carbono se encuentra en aguas que han estado en contacto con materiales carbonaceos en descomposición ó materia orgánica. Las cantidades usualmente son altas en aguas crudas las cuales no han estado en contacto con la atmósfera donde el bióxido de carbono puede ser desprendido. En suministros superficiales, abiertos al aire, contienen pequeñas cantidades al menos que el suministro este contaminado con desechos industriales.

#### 2.- OXIGENO $\text{O}_2$

El oxígeno es un elemento extremadamente activo que se combina con un sinnúmero de otros materiales. Una solución de oxígeno en agua es muy corrosiva hacia aquellos metales -hierro, acero, hierro galvanizado y latón- que son ampliamente usados para hacer recipientes que conduzcan o almacenen el agua. Los valores bajos de pH aceleran la velocidad de esta corrosión por oxígeno disuelto, mientras que los valores altos de pH tienden a retardarla.

#### 3.- NITROGENO $\text{N}_2$

Al analizar aguas, el nitrógeno prácticamente nunca se determina, puesto que es inerte, relativamente no tiene ninguna importancia por lo que se refiere al tratamiento del agua.

#### 4.- SULFURO DE HIDROGENO $\text{H}_2\text{S}$

Sus propiedades más prominentes son su olor ofensivo a huevos podridos y su marcada corrosividad. Es un gas muy tóxico.

#### 5.- METANO $\text{CH}_4$

El metano, en cantidades suficientes para ser un peligro de fuego o explosión, se ha encontrado en un número comparativamente

## 10 IMPUREZAS DEL AGUA

pequeños de agua subterráneas. El metano comúnmente se desprende en aguas estancadas y pantanosas donde se lleva a efecto procesos de putrefacción.

### 2.1.3 TURBIDEZ Y SEDIMENTO

Cualquier impureza insoluble finamente dividida, cualquiera que sea su naturaleza, que pueda ser suspendida en el agua y disminuir su claridad, se le conoce colectivamente como "turbidez". Estas impurezas suspendidas pueden ser de origen orgánico, tales como las arcillas, limos, carbonato de calcio, sílica, hidróxido férrico, azufre, etc., o pueden ser de naturaleza orgánica, tales como materia vegetal finamente dividida, aceites, grasas, microorganismos, etc. La turbidez puede deberse a una sustancia simple o más comúnmente a una mezcla de sustancias.

En cuanto al tamaño, estas impurezas suspendidas pueden variar desde las formas coloidales a las muy gruesas. El material que debido a su tamaño se asienta rápidamente se le llama "sedimento".

### 2.1.4 COLOR Y MATERIA ORGANICA

El color de las aguas naturales es de naturaleza orgánica, aumentado muchas veces por hierro o manganeso orgánico en estado coloidal. Los colores notados en el agua usualmente varían desde el amarillo muy pálido al café amarillento y hasta el café oscuro.

El color verdadero del agua deberá considerarse como aquél, que es debido únicamente a sustancias en solución, esto es, es el color del agua después de que la materia suspendida ha sido removida

### 2.1.5 SABORES Y OLORES

Prácticamente todos los olores en los suministros de agua natural, con excepción del sulfuro de hidrógeno, son de origen orgánico. Aún los olores y sabores detectables en muchas aguas clorinadas rara vez se deben al cloro, sino más bien a los compuestos formados por la acción del cloro sobre la materia orgánica del agua.

### 2.1.6 MICROORGANISMOS

Los microorganismos se presentan comúnmente en las aguas superficiales, mientras que en las aguas de pozo profundo o están ausentes o se presentan en pequeñas cantidades. Es evidente que las tolerancias para microorganismos diferirán de acuerdo con los tipos y números presentes y el uso a que se destinará el agua en la industria. El agua que se use para beber, deberá por supuesto, cumplir con los requisitos de las autoridades de sanidad pública.

**TABLA 2-1**  
**PRINCIPALES IMPUREZAS EN EL AGUA**

IONICAS		NO IONICAS	GASEOSAS
CATIONICAS	ANIONICAS		
Ca <sup>++</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TURBIDEZ Y POLVO	CO <sub>2</sub>
Mg <sup>++</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	MATERIA SUSPENDIDA	O <sub>2</sub>
Na <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	COLOR	NH <sub>4</sub>
K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-4</sup>	MATERIA ORGANICA	CH <sub>4</sub>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SILICE COLOIDAL	H <sub>2</sub> S
Fe <sup>++</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	MICROORGANISMOS	N <sub>2</sub>
Mn <sup>++</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	BACTERIAS	
Al <sup>+++</sup>	(HSiO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	ACEITE	
H <sup>+</sup>	HPO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	CONDENSADO	
Ba <sup>++</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		
Fe <sup>+++</sup>	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>		
Cu <sup>++</sup>	S <sup>-2</sup>		
	(SiO <sub>2</sub> )		



CAPITULO 3

TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p>ACEITES Y GRASAS. Existen solamente por contaminación.</p>	<p>1.- Causan corrosión al descomponerse en la caldera en glicerina y en ácidos grasos. 2.- Originan arrastres en el agua de calderas. 3.- Forman películas aislantes que impiden la transferencia de calor.</p>	<p>1.- Por coagulación con yeso y coagulantes, y después por filtración.</p>
<p>ACIDEZ O BAJO pH. Solamente existe en aguas industriales o de minas.</p>	<p>1.- No adecuada para la bebida. 2.- Causa corrosión.</p>	<p>1.- Por neutralización con cal-soda o carbonato de sodio. 2.- Según la cantidad de los demás constituyentes se podrá o no usar en procesos industriales y utilizar el método número 1.</p>
<p>ACIDO SULPHIDRICO. Da olor de "huevos podridos" al agua.</p>	<p>1.- Aparte del olor, da mal sabor al agua arriba de 0.5 ppm. 2.- Causa corrosión.</p>	<p>1.- Por aereación (con gran tiempo de contacto). 2.- Por desgasificación, cuando contiene arriba de 10 ppm. 3.- Con purificador de carbón activo. 4.- Con zeolita de manganeso para volúmenes pequeños de agua que contengan 2 ó menos ppm.</p>

## CAPITULO 3

## TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p><b>AGUAS, MATERIA ORGANICA.</b> El color es debido a la materia orgánica disuelta o suspendida y se encuentra en aguas superficiales y aguas de pozos poco profundos.</p>	<p>1.- Origina mal aspecto y sabor al agua arriba de 20 ppm (de color). 2.- Arriba de 5 ppm (de color) afecta el acabado del papel. 3.- Como máximo de materia orgánica se admite 3 ppm en el agua potable.</p>	<p>1.- Por precipitación con cal, coagulante y arcilla. 2.- Por cloración y purificación con carbón activado. 3.- Con sulfato de cobre. Nota: Para aguas negras se siguen procedimientos especiales de lodos activados o biooxidación.</p>
<p><b>ALCALINIDAD.</b> CO<sup>-2</sup><sub>3</sub> HCO<sup>-</sup><sub>3</sub> OH<sup>-</sup></p>	<p>1.- Espuma en calderas. 2.- Formación de CO<sub>2</sub> en el vapor lo que causa corrosión en las líneas. 3.- Arriba de 500-700 ppm en agua de calderas de baja presión origina: a) Acarreo de sólidos. b) Condensados corrosivos. c) Fragilidad caústica. 4.- Mal sabor en el agua potable arriba de 400 ppm.</p>	<p>1.- Por tratamiento con cal y coagulante. 2.- Por intercambio iónico con resina catiónica ciclo hidrógeno y una aniónica ciclo sosa que elimina la alcalinidad (desmineralización). 3.- Por intercambio iónico con una resina catiónica ciclo ácido con neutralización con agua suave o sosa. 4.- Inyección con ácidos.</p>
<p><b>ALUMINIO.</b> Se encuentra en aguas naturales en forma soluble.</p>	<p>1.- Forma parte de la dureza. 2.- Muy perjudicial para calderas de alta presión, por formar con la sílice incrustaciones de silicoaluminatos de calcio.</p>	<p>1.- Por coagulación ayudando a la misma. 2.- Por suavización con resinas catiónicas ciclo sodio.</p>

CAPITULO 3

TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p><b>BROMO Y YODO.</b> Se encuentra en cantidades despreciables en el agua de mar y aguas fósiles en forma de sales.</p>	<p>1.- No tienen importancia.</p>	<p>1.- Métodos de extracción especiales a partir del agua de mar.</p>
<p><b>CLORO.</b> Solamente existe cuando es adicionado para eliminar materia orgánica del agua.</p>	<p>1.- Causa trastornos intestinales arriba de 2 ppm y da mal sabor al agua. 2.- Causa corrosión arriba de 6 ppm.</p>	<p>1.- Se elimina con purificadores de carbón activado. 2.- También se elimina con sulfito de sodio por reacción química.</p>
<p><b>DIOXIDO DE CARBONO.</b> Origina bajo pH y proviene ya sea de la atmósfera, materia orgánica en descomposición, fuentes subterráneas y también se desprende en el tratamiento externo al adicionar ácido o coagulante, y en el agua de calderas al descomponerse los bicarbonatos en carbonatos y oxhidrilos por cambio de presión y temperatura.</p>	<p>1.- Causa corrosión, sobre todo en las líneas condensadas.</p>	<p>1.- Por aereación natural en torres o aereadores. 2.- Por aereación artificial por medio de un desgasificador. 3.- Dosificando aminas neutralizantes en los condensados. 4.- Alimentando silicatos de sodio que recubre las tuberías, solo permitiendo éste en equipos de muy baja presión.</p>

## TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSA	TRATAMIENTO
<p><b>DUREZA.</b>            Dada por iones de calcio, magnesio y a veces por fierro y aluminio en forma de bicarbonatos y carbonatos (dureza carbonatada o temporal) y por sulfatos cloruros, nitratos, (dureza no carbonatada o permanente).</p>	<p>1.- Mal sabor al agua arriba de 300 ppm.            2.- Destruye el jabón.            3.- Causa incrustaciones en los equipos de alta temperatura (arriba de 60-80°C) como calderas, calentadores, chaquetas de enfriamiento, etc.</p>	<p>1.- Por suavización con resinas ciclo sodio.            2.- Por precipitación con cal y coagulantes, bajando la dureza carbonatada y usando carbonato de sodio baja la dureza no-carbonatada.            3.- Con tratamiento de cal en caliente.            4.- Con una unidad catiónica ciclo ácido.</p>
<p><b>FLUOROS.</b>            Se encuentran de 0.1 a 8 ppm.</p>	<p>1.- Arriba de 1 ppm causa manchas en los dientes por experimentación han encontrado que trazas de fluoros evitan las caries.            2.- No afectan a los procesos industriales.</p>	<p>1.- Por el tratamiento de precipitación de cal-coagulante en frío.</p>
<p><b>FIERRO.</b>            Existen en tres formas de 0.1 a 50 ppm ó más:            a) Disuelto en forma de bicarbonato (incoloro) que con el contacto del aire se</p>	<p>1.- Arriba de 0.3 ppm le da al agua sabor estringente.            2.- En las tuberías el fierro orgánico causa obstrucciones.            3.- Afecta a las industrias del papel, tintorerías, etc.            4.- En las calderas causa deposiciones o incrustaciones.</p>	<p>A) Fierro soluble;            1.- Con suavizadores hasta 50 ppm si el agua es clara y no aerada.            2.- Por aereación y precipitación con cal y coagulante. Si se precipita por si solo se anula la cal.</p>

CAPITULO 3

TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p>transforma en hidróxido férrico de color café-rojizo.</p> <p>b) En forma coloidal u orgánica (bacteria scirenothrix o Gallionella).</p> <p>c) En forma suspendida como hidróxido férrico.</p>		<p>3.- Para gastos pequeños con zeolitas de manganeso hasta 2 ppm.</p> <p>B) Hierro coloidal u orgánico.</p> <p>1.- Unicamente por coagulación, asentamiento y filtración.</p> <p>C) Hierro suspendido.</p> <p>1.- Por filtración.</p>
<p><b>MANGANESO.</b></p> <p>Existe de 0.1 a 10 ppm y en formas semejantes al fierro.</p>	<p>1.- Mal sabor al agua arriba de 0.3 ppm.</p> <p>2.- Da color negro o gris a todo con lo que tiene contacto.</p> <p>3.- Causa obstrucciones en las tuberías.</p> <p>4.- Depositiones o incrustaciones en las calderas.</p>	<p>1.- Igual tratamiento que para el fierro.</p>
<p><b>NITRATOS.</b></p> <p>Existen hasta 40 ppm pero es rara su presencia.</p>	<p>1.- Causa daño en la sangre arriba de 10 a 20 ppm a los niños.</p> <p>2.- No causa daño a la industria.</p> <p>3.- En las calderas previene la fragilidad cáustica.</p>	<p>1.- Unicamente por medio de un intercambiador aniónico.</p>

## TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p><b>NITRITOS.</b> La presencia de trazas indica contaminación del agua, ya que es un paso del ciclo vital del nitrógeno, también se encuentra en plantas de tratamiento por la acción de las cloraminas, o cuando se usa como inhibidor de la corrosión.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- En pequeñas cantidades afecta la potabilidad del agua.</li> <li>2.- El producto en sí es venenoso.</li> <li>3.- En cantidades mínimas no afecta a las industrias.</li> <li>4.- En dosificaciones de 500 ppm ayuda o evita la corrosión en sistemas de enfriamiento.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Por oxidación a nitritos y después por medio de un intercambiador aniónico.</li> </ol>
<p><b>RADIOACTIVIDAD.</b> Algunos elementos y gases radioactivos se la dan al agua de lluvia y superficial.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Se supone que en cantidades apreciables puede causar cáncer.</li> <li>2.- En cantidades mínimas se consideran aguas medicinales.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Muy poca o nula experimentación al respecto.</li> </ol>
<p><b>SILICE.</b> Se encuentra en forma soluble de 0.1 a 110 ppm.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Arriba de 120 ppm ocasiona incrustaciones de silicato de calcio en calderas de baja presión.</li> <li>2.- No afecta a la mayoría de los procesos industriales.</li> <li>3.- Afecta a la manufactura de productos eléctricos, espejos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Tratamiento de cal en caliente usando cal dolomítica u óxido de magnesio.</li> <li>2.- Tratamiento de cal en frío usando cal dolomítica u óxido de magnesio.</li> <li>3.- Tratamiento de cal en frío usando sulfato ferroso como</li> </ol>

## CAPITULO 3

## TRATAMIENTO DEL AGUA POR SUS IMPUREZAS

IMPUREZAS	PROBLEMA QUE CAUSAN	TRATAMIENTO
<p><b>SODIO Y POTASIO.</b> Existen en combinación con los bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, etc., dándole salinidad al agua, y alcalinidad.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Afectan al agua potable de 250 ppm.</li> <li>2.- Debido a su gran solubilidad no afectan a los equipos industriales.</li> <li>3.- Afecta al proceso de varias industrias especializadas.</li> </ol>	<p>coagulantes.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4.- Por intercambio iónico por medio de una resina fuertemente básica.</li> <li>1.- Únicamente usando una unidad catiónica ciclo sodio.</li> </ol>
<p><b>SULFATOS Y CLORURO.</b> Existen en combinación con el calcio, magnesio, sodio y potasio.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Afectan al agua potable arriba de 250 ppm.</li> <li>2.- Limitan las concentraciones de un agua de caldera.</li> <li>3.- Aumenta los lodos de una caldera.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- El único tratamiento para eliminarlos completamente es por medio de una unidad aniónica.</li> <li>2.- El tratamiento con bario baja los sulfatos a aproximadamente 20 ppm.</li> </ol>
<p><b>TURBIEDAD.</b> Da da por lodo, arena, etc., suspendidos así como materia orgánica. Se encuentra en aguas superficiales y a veces en pozos poco profundos por infiltraciones.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- El agua potable no debe tener arriba de 10 ppm.</li> <li>2.- Afecta el terminado de muchos productos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Por filtración abajo de 10 ppm.</li> <li>2.- Por precipitación con cal, coagulante y filtración, arriba de 10 ppm.</li> </ol>

#### 4.1 USOS DE AGUA INDUSTRIAL

Las industrias establecen calidades de aguas para sus diferentes aplicaciones, y estas son mucho más estrictas que las establecidas por la municipalidad.

Las aguas usadas en plantas industriales pueden clasificarse brevemente como sigue:

1. Agua de alimentación de calderas.
2. Agua de enfriamiento.
3. Agua de proceso.
4. Agua para propósitos generales.

Cuando se requiere un tratamiento para ajustar el agua a uno de los usos, el tipo de tratamiento depende de cierto número de factores, los cuales los más importantes son: la composición del agua cruda y la calidad del efluente requerido.

##### 4.1.1 AGUA DE ALIMENTACION DE CALDERAS

Si se trata de calderas que operan a baja presión, es suficientemente remover la dureza, lo que puede ser efectuado usando un intercambiador catiónico de sodio. Para calderas que operen a una presión un poco más alta, la remoción de la dureza y reducción en la alcalinidad y sólidos totales, puede ser requerida, y esto se efectúa ya sea por un proceso en caliente o por un tratamiento en dos pasos, cal en frío o intercambio catiónico, o por intercambio catiónico en ciclo hidrógeno seguido por neutralización con sosa cáustica, o más comúnmente con el efluente de un proceso de intercambio catiónico en ciclo sódico. Para calderas que operan a presiones aún más altas, puede requerirse no solamente la remoción de la dureza y la reducción de los sólidos totales y alcalinidad, sino que también se requiere una marcada reducción en el contenido de sílice, y esto se puede efectuar en un proceso simple usando ablandadores en caliente, haciendo uso del principio de los lodos suspendidos, o mejor, usando un proceso de dos pasos utilizando el ablandador anterior en el primer paso seguido de un intercambiador catiónico o un tratamiento por fosfatos en el segundo paso. Las calderas que operen a presiones muy altas, pueden requerir la remoción prácticamente completa de todas las impurezas.



lo que puede efectuarse por una desmineralización por intercambio iónico o por destilación. También, debe añadirse que el grado de desaireación requerido por todas las calderas, excepto por las que operan a baja presión, es tan alto que demanda prácticamente la remoción completa de todos los gases disueltos (para oxígeno disuelto, menos de 0.005 ml/l).

#### 4.1.2 AGUA DE ENFRIAMIENTO

En la industria se usan diferentes sistemas de enfriamiento y dependiendo del sistema usado, se establecen las normas del agua, con el fin de evitar incrustaciones y corrosión en el sistema de enfriamiento. La única especificación es que el agua no debe formar depósitos aislantes al calor, ya sea de origen orgánico o inorgánico.

Los tratamientos de aguas de enfriamiento, también difieren con la composición del agua cruda desde el descubrimiento de los procesos de desmineralización por y de su uso, como sigue: (1) un paso y al drenaje; (2) un paso y luego usadas para otros propósitos; (3) recirculadas en un sistema abierto (con torres enfriadoras); (4) recirculadas en sistemas cerrados. Para (1) con algunas aguas, posiblemente no se requiere tratamiento, o únicamente clorinación, mientras que para otras, la posible reducción de la dureza de bicarbonato puede ser necesaria para tratamiento ácido. Para (2) el agua puede ser tratada de manera de hacerla útil para propósito de enfriamiento y otros usos posteriores como por ejemplo, reducción de la dureza de bicarbonato por el proceso de cal en frío, o su completo ablandamiento por intercambio catiónico o por el proceso en dos pasos, cal en frío e intercambio catiónico en ciclo sódico. Para (3) puede posiblemente requerirse un tratamiento de cal en frío más una pequeña dosis de ácido, y para (4) el posible tratamiento por proceso de intercambio catiónico ciclo sódico, o en algunos casos, desmineralización por proceso de intercambio iónico.

#### 4.1.3 AGUA DE PROCESO

La calidad de agua requerida para diferentes procesos varía en un amplio rango. Algunas aguas pueden no requerir ningún tratamiento o posiblemente sólo clorinación para ser usadas en ciertos procesos. Otras pueden requerir únicamente una reducción en la dureza del bicarbonato. Por otra parte, otros muchos procesos requieren un agua que estén prácticamente libre de dureza y el tratamiento que usualmente se emplea será el del proceso de intercambio catiónico ciclo sódico, o en algunos casos, un proceso en dos pasos, cal en frío e intercambio catiónico ciclo sódico. El único método disponible para la producción de agua de tan alta calidad, es el proceso relativamente caro de la destilación.

#### 4.1.4 AGUAS PARA USOS GENERALES

Este término se usa para cubrir el agua empleada en otros usos además del de alimentación de calderas, enfriamiento y proceso húmedo. Obviamente, el agua que se suministra para uso personal, debe cumplir con calidad bacteriológica y deberá también estar libre de olores y sabores objetables. Por lo que respecta al agua para lavaderos, regaderas, etc., no debe ser muy dura. El agua requerida para limpieza de suelos, no requiere tratamiento.

TABLA 4-1

SUSTANCIAS QUIMICAS QUE INFLUYEN SOBRE LA POTABILIDAD DEL AGUA

(33)

SUSTANCIA	Normas OPS (1971)		Normas USPHS (1962)	
	máxima recomendable	máxima permisible	máxima recomendable	máxima permisible
<b>1.- SUSTANCIAS TOXICAS</b>				
• Arsénico (como As)mg/l	-	0.05	0.01	0.05
• Bario (como Ba)mg/l (a)	-	-	-	1.0
• Cadmio (como Cd)mg/l	-	0.01	-	0.01
• Cromo Hexavalente (Cr <sup>6+</sup> ), mg/l (a)	-	-	-	0.05
• Cianuro (como CN), mg/l	-	0.05	0.01	0.2
• Plata (como Ag), mg/l (a)	-	-	-	0.05
• Plomo (como Pb), mg/l	-	0.1	-	0.05
• Mercurio (como Hg)mg/l	-	0.001	-	-
• Selenio (como Se)mg/l	-	0.01	-	0.01
• Cobre (como Cu)mg/l	0.05	1.5	1.0	-
<b>2. - COMPUESTOS ORGANICOS</b>				
• Hidrocarburos polinucleares aromáticos, mg/l (b)	-	0.2	-	-
• Compuestos fenólicos orgánicos como fenoles mg/l (c)	-	-	0.001	-
• Extracto en carbón clorofomizado (ECC) mg/l (d)	-	-	0.2	-
<b>3.- SALES</b>				
• Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )mg/l (e)	200	600	250	-
• Fluoruros (como F <sup>-</sup> ) mg/l (f)	0.6-1.7	-	0.6-1.7	1.4-2.4
• Nitratos (como NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (g)	-	45	45	-
• Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ), (e)	200	400	250	-

TABLA 4-1

NORMAS DE CALIDAD FISICO-QUIMICA DEL AGUA PARA USO DOMESTICO

(Continuación)

24

SUSTANCIA	Normas OPS (1971)		Normas USPHS (1962)	
	máxima recomendable	máxima permisible	máxima recomendable	máxima permisible
<b>1. CARACTERISTICAS FISICAS</b>				
• Turbiedad U.J. (a)	5 U.J.	25 U.J.	5	-
• Color - Unidades	5	50 U.J.	15	-
• Olor y sabor. N. Incipiente	Ninguno	Ninguno	1	-
• Sólidos totales-mg/l	500	1,500	-	-
<b>2. CARACTERISTICAS QUIMICAS</b>				
<b>a) Generales</b>				
• rango de pH	7.0-8.5	6.5-9.0	-	-
• dureza total, mg/l	100	500	-	-
<b>b) Metales.</b>				
• Calcio (como Ca), mg/l	75	200	-	-
• Hierro (total como Fe)mg/l	0.1	1.0	0.1	-
• Manganeso (como Mn), mg/l	0.05	0.5	0.05	-
• Magnesio (como Mg), mg/l (b)	30	150	-	-
• Zinc (como Zn), mg/l	5.0	15.0	5.0	-
• Boro (como B) (c)	-	-	-	-

TABLA 4-1 (Continuación)

NORMAS DE CALIDAD RADIOACTIVAS DEL AGUA PARA USO DOMESTICO

	NORMAS OMS (1961)	NORMAS OMS (1963)	NORMAS USPHS (1962)	NORMAS AWWA (1968)
Radio 226 (Ra <sup>226</sup> )	-	10	3	
Estroncio 90 (Sr <sup>90</sup> )	-	30	10	
Actividad Beta	10	1000	1000	100
Emisiones Alfa	1		-	

CARACTERISTICAS BIOLOGICAS DEL AGUA PARA USO DOMESTICO

- El agua potable estará libre de gérmenes patógenos procedentes de contaminación fecal humana.
- Menos de 20 microorganismos de los grupos coli y coliforme por cada ml de muestra.
- Menos de 200 colonias bacterianas por cada ml de muestra en la placa de agar incubada a 37°C cada 24 hrs.
- Ausencia de colonias bacterianas licuantes de gelatina cromógenas o fétidas, en la siembra de 1 ml de muestra en gelatina incubada a 20°C cada 48 hrs.

TOLERANCIA DE PESTICIDAS PRESENTES EN EL AGUA PARA USO DOMESTICO (mg/l)

• Aldrina	0.017	• Clorán	0.003
• Dieldrina	0.017	• Endrina	0.001
• DDT	0.042	• Heptacoloro	0.018
• Heptacoloro	0.018	• Lindano	0.056
• spóxido		• 2,4-D	
• Metaxicloro	0.035	• 2,4,5 T	0.1
• Toxafeno	0.005	• 2,4,5 TP	

26  
**TABLA 4-2 (38)**  
**CALIDAD DE AGUA DE ALIMENTACION DESEADA EN CALDERAS**

IMPUREZAS (p.p.m.)	CALIDAD DESEADA				
	PRESION DE OPERACION (PSIG)				
	150	400	1000	3200	SEMICON- DUCTORES
PH	8.0	9.0	9.0	9.0	7.5
TSD	500	100	0.5	0.05	1
Cl <sup>-</sup>	---	---	---	---	---
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	---	---	---	---	---
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	5	0	0	---
SiO <sub>2</sub>	40	0.5	0.01	0.01	---
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	---	---	---	---	---
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> (DUREZA COMO CaCO <sub>3</sub> )	40	10	0	0	---
Fe <sup>2+</sup> + Al <sup>3+</sup>	5	0.05	---	---	---
Cu <sup>2+</sup>	---	---	0.01	0.005	---
Mn <sup>2+</sup>	---	---	---	---	---
CONDUCTIVIDAD (MICRONHOSI)	---	---	1	0.	2.00
MATERIA SUSPENDIDA	20	5	---	---	TRAZAS

**TABLA 4-3 (38)**  
**CALIDAD DE AGUA RECOMENDADA POR BABCOCK Y**  
**WILCOX PARA CALDERAS DE 2000 PSIG**

AGUA DE ALIMENTACION		AGUA DE CALDERAS	
IMPUREZA	MAX. TOLERABLE (p.p.m.)	IMPUREZA	MAX. TOLERABLE (p.p.m.)
OXIGENO	0.007	TOTAL SOLIDOS	15
FIERRO	0.010	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3 - 10
CUBRE	0.005	PH	1
DUREZA	0	PH	9.0 - 10.0
CO <sub>2</sub>	0	SiO <sub>2</sub>	0.3 - 1.1
MAT. ORGANICA D			
PH	6.5 - 9.2		

TABLA 4-4 (33)  
 TOLERANCIA DE SILICE EN EL AGUA DE ALIMENTACION  
 PARA CALDERAS, PRODUCIENDO VAPOR QUE CONTIENE  
 MENOS DE 0.02 PPM DE  $SiO_2$

PRESION DE OPERACION (psig)	$SiO_2$ EN EL AGUA DE CALDERA (p.p.m.)	$SiO_2$ EN EL AGUA DE ALIMENTACION BASADA EN EL 5% DE PURGAS 120 CONCENTRACIONES (p.p.m.)
600	35 - 50	1.7 - 2.5
800	15 - 20	0.8 - 1.0
1000	5 - 8	0.3 - 0.4
1500	2 - 3	0.1 - 0.15
2000	0.8 - 1.2	0.04 - 0.06
2500	0.2 - 0.4	0.01 - 0.04
3000	0.1 - 0.2	0.005 - 0.01

TABLA 4-5 (38)  
 LIMITES DE CONCENTRACION RECOMENDADOS DEL TOTAL DE  
 SOLIDOS, ALCALINIDAD Y SILICE, EN EL AGUA DE CALDERAS

PRESION DE OPERACION (psig)	TOTAL DE SOLIDO (p.p.m.)	ALCALINIDAD COMO $CaCO_3$ (p.p.m.)	SILICE COMO $SiO_2$ (p.p.m.)
0 - 300	3500	700	50 - 75
301 - 450	3000	600	40 - 50
451 - 600	2500	500	35 - 45
601 - 750	2000	400	25 - 35
751 - 900	1500	300	8 - 20
901 - 1000	1250	250	5 - 10
1001 - 1500	1000	200	2 - 5
1501 - 2000	750	150	0.8 - 3
2001	500	100	0.1 - 1.2

TABLA 4-6 (38)  
 LÍMITES DE SÓLIDOS Y OTRAS CARACTERÍSTICAS  
 RECOMENDABLES EN EL AGUA DE CALDERAS

CONCEPTO (ppp)	PRESION OP.	Mascas					
	(psig)	301-450	451-600	601-750	751-900	901-1000	1000 y
	300						
Sólidos totales		3500	3000	2500	2000	1500	1000
Sólidos disueltos		2500	2300	2100	1900	1400	900
Sólidos suspendidos		1000	700	400	100	70	25
Alcalinidad a la (amoníaco) (Ca)		500	400	340	240	180	80
Alcalinidad al amoníaco de nitró		400	500	400	300	220	100
Ferrocianos como $Fe_2$		100	60	60	40	20	5
Sulfatos como $SO_4$		80	60	40	30	20	5

FIG. 4-1 (38)  
 RELACION DE DISTRIBUCION

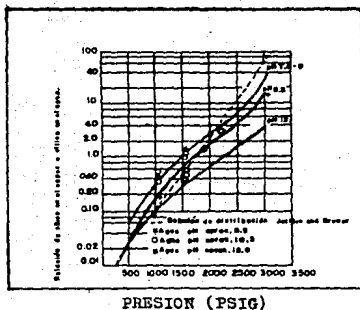


TABLA 4-7 (38)  
 LIMITE DE CONCENTRACION RECOMENDADOS PARA DETERMINAR CICLOS DE  
 CONCENTRACION ACEPTABLES EN TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

Parámetro	Límites		Comentarios
	Mínimo	Máximo	
Índice de Langliez	+ 0.5	+ 1.5	Sin programa de caudales
Índice de Ryznar	+ 0.5	+ 7.5	Sin programa de caudales
pH	6.0	8.0	
Ca <sup>2+</sup> ppm. como CaCO <sub>3</sub>	10-50	300	Sin programa de caudales
		400	Programa de caudales
Total de Fe <sup>2+</sup> ppm.		0.5	
Manganeso ppm.		0.5	
Cobalt ppm.		0.02	
Aluminio ppm.		1.0	
Silica ppm.	150		Para pH < 7.5
	100		Para pH > 7.5
[Ca].[SO <sub>4</sub> ] producto	5000000		Expresado como CaCO <sub>3</sub>
[TSD] ppm.	1500		
Cond. micromhos/cm	4000		
Sólidos susp. ppm.	100-150		



TABLA 4-8 (4)

REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE AGUA EN VARIAS INDUSTRIAS (ppm)										
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
1) Bebidas Carbonatadas.	250	50	0.2	0.2	0-2	5-10	10	6-11	850	
Lavado de Hotelaria.	0									
2) Cervecías (K).	100	75-100	0.1	0.1	5-10	5-10	10		500-1000	7.0
	CaSO <sub>4</sub>								NaCl	
									275	
3) Cerámicas.			0.1	0.1	Clara	5-10	10		Baja	
4) Destilerías.									5-10	
5) Electroplanta.	0		Baja	Baja	Baja				Baja	
6) Procesamiento de Alimentos.			Ver calidad de agua potable.							
Hornada.			0.2	0.2	5-10	5-10				
Carne.	25-50	25-50	0.2	0.2	10					
Buleón.			0.2	0.2					100	7.0
Carnes en conserva.	0									
Productos Almidonados.	0	0.1	0.1							
7) Hielo.	70	50	0.2	0.2	5	5	10		170	
8) Lavanderías.	0		0.1	0.1	0.1					
9) Curtiderías.	50-135	0.2	0.2	20	10-100					
10) Espejes y Plateado.	0				2	5			5-10	
11) Papel y Pulpa:										
Papel Fino.	50	75	0.1	0.05	5	5		20	200	
Kraft Blanco.	100	75	0.2	0.1	5	5	0-8		300	6.8-7.3
Kraft Grudo.	200	150	0.5	0.3	25	80	0-12		500	6.5-8.0
Groundwood.	200	150	1.0	0.5	50	30			300	
Aplicación de Soda y Sulfito a la Pulpa.	100	75	0.1	0.05	25	5			600	
Rayón (Pulpa)	8	50			5	5			100	
12) Productos Farmacéuticos.			Ver calidad de agua para farmacia.							
13) Textil:										
General.	0-75	70-100	0.1	0.1	5	20			200	

TABLA 4-8 (Continuación)

REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE AGUA EN VARIAS INDUSTRIAS (ppm)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
Algodón.	10-15	75-100	0.01- 0.05	0.01- 0.05	1.5	5			200	
Rayón (Viscoso).	10	75	0.05	0.02	1.0	5			200	
Lana.	0	70	0.1	0.1	5	20			200	
14) Plásticos.			0.02	0.02	2	2	10		200	

(a) Ca y Mg como  $\text{CaCO}_3$ .

(b)  $\text{HCO}_3$  como  $\text{CaCO}_3$ .

(c) Fe como Fe.

(d) Mn. como Mn.

(e) Turbidez.

(f) Color.

(g) Materia Orgánica como  $\text{O}_2$ .

(h) Cloro libre como Cl.

(i) Total de Sólidos.

(j) pH.

(\*) Deseable para Fermentación.

TABLA 4-9 (A)  
NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA PARA USO INDUSTRIAL (ppm)

	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Acidez Mineral ( $\text{CaCO}_3$ )					
Acido Sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )					
Alcalinidad ( $\text{CaCO}_3$ )		400			500
Aluminio (Al)					
Amonio ( $\text{NH}_4$ )					
Bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ )	480				600
Calcio (Ca)	75		20	20	200
Cloruro (Cl)	300	250	200	200	500
Cobre (Cu)					
Color	25		30	10	500
Dureza ( $\text{CaCO}_3$ )	350		100	100	1000
Dureza no Carbonatada ( $\text{CaCO}_3$ )	70				
Hierro (Fe)	1	25	1.0	0.1	5
Fluoruro (F)	1.2				
Magnesio (Mg)	30		12	12	100
Manganeso (Mn)		0.5	0.5	0.05	2
Nitrato ( $\text{NO}_3$ )	8				
Olor					
Oxígeno Disuelto ( $\text{O}_2$ )					
pH	6-9	6.5-8.5	6-10	6-10	5.5-9
Silice ( $\text{SiO}_2$ )		35	50	50	
Sodio y Potasio (Na y K)	230				
Sólidos Disueltos	1000	600			2500
Sólidos Suspendidos	10	500	10	10	10000
Sulfato ( $\text{SO}_4$ )	570	250			850
Zinc (Zn)					

- (A) INDUSTRIA DEL PETROLEO.  
 (B) INDUSTRIA DEL CEMENTO.  
 (C) INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL (CRUDO)  
 (D) INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL (BLANQUEADO).  
 (E) INDUSTRIAS QUIMICAS.

TABLA 4-9 (Continuación)

NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA PARA USO INDUSTRIAL

	(F)	(G)	(H)
Acidez Mineral ( $\text{CaCO}_3$ )	75		
Acido Sulfhidrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )			
Alcalinidad ( $\text{CaCO}_3$ )	200	200	150
Aluminio (Al)			
Amonio ( $\text{NH}_3$ )			
Bicarbonato ( $\text{CaCO}_3$ )			
Calcio (Ca)		100	80
Cloruro (Cl)	500	500	
Cobre (Cu)			
Color		20	20
Dureza ( $\text{CaCO}_3$ )	1000	900	350
Dureza no Carbonatada ( $\text{CaCO}_3$ )			
Hierro (Fe)		0.3	0.1
Fluoruro (F)			
Magnesio (Mg)			36
Manganeso (Mn)		0.2	0.1
Nitrato ( $\text{NO}_3$ )			
Clor			
Oxígeno Disuelto ( $\text{O}_2$ )			
pH	3-9	6.5-8	6.2-8.3
Silice ( $\text{SiO}_2$ )		50	
Sodio y Potasio (Na y K)			
Sólidos Disueltos	1500		
Sólidos Suspendidos	3000	30	5
Sulfato ( $\text{SO}_4$ )		1000	
Zinc (Zn)			

(F) INDUSTRIA DE METALES PRIM.  
 (G) INDUSTRIA DE LA GOMA Y LA MADERA.  
 (H) INDUSTRIA DEL CAUCHO SINTETICO.

TABLA 4-10 (4)

REQUERIMIENTO DE CALIDAD DE AGUA ULTRAPURA EN ALGUNAS APLICACIONES (ppm)								
TOLERANCIA								
	Fe como Fe	Cu como Cu	M. Orgánica como O <sub>2</sub> consumido	Cl libre como Cl	Total de sólidos	Resistencia específica Mohm-cm	pH	Tamaño de partícula de materia
Semiconductores.	0.005	0.005	1.0	0	Traza	18	7.0	menos de 0.5 $\mu$
Tubos para Televisión.	0.005	0.005	0.5	0	Traza	2-5	7.0	
Agua de Alimentación para calderas.	0.005	0.005	0.01 Si como SiO <sub>2</sub>	0	0.05	10	9.3	

TABLE 4-11  
 CALIDAD DE AGUA PARA USO FARMACEUTICO (4)

SUBSTANCIAS QUIMICAS (ppm):

Arsénico	0.05
Bario	1.00
Cadmio	0.01
Cianuro	0.2
Cobre	1.0
Cromo	0.05
Fierro	0.3
Fluoruro	0.7-1.2
Manganeso	0.05
Nitrato	45.0
Plata	0.05
Plomo	0.05
Selenio	0.01
Zinc	5.0

PESTICIDAS (ug/l):

Aldrina	17.0
Clordán	3.0
DDT	42.0
Dieldrina	17.0
Endrina	1.0
Heptacloro	18.0
H. epóxido	18.0
Lindano	56.0
Metoxicloro	35.0
Toxafeno	5.0

SUBSTANCIAS RADIOACTIVAS (uc/l):

Estroncio 90	10.0
Radio 226	3.0

MICROORGANISMOS (Veer calidad USPHS para uso doméstico).

Color, Sabor y Olor (No debe existir).	
Disolventes Orgánicos (No recomendables).	
Disolventes Inorgánicos (mg/l)	500.0
pH	6.0-8.5

TABLA 4-12  
NORMAS DE CALIDAD DE AGUA PARA VARIOS USOS (4)

	MUNICIPAL	RECREACIONAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA
<b>BIODEGRADABLES</b>				
Demanda Bioquímica de Oxígeno (ppm BOD)	1-3		10	10
Cianuro (ppm CN)	1-0.2	0.02	0.2	0
Oxígeno Disuelto (ppm DO)	4-7	4-7	1-2	0.2
<b>BACTERIAS</b>				
Organismos Coliformes (MPN/100 ml)	1-50	1000-5000	5000	5000
<b>TERMICA</b>				
Temperatura (°F)	50	32-93	55-90	60
<b>NUTRICIONAL</b>				
Algas (std. unidades/ml)	100	Ausencia de Algas Tóxicas	1000	Ausencia de Algas Tóxi.
Amoniaco (ppm Amoniaco)	0.1	1-2		
Nitrato (ppm Nitrato)	1.45	44		
Nitrógeno Total (ppm N <sub>2</sub> )	5-10	10		
Fosfatos (ppm PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	10	10		
<b>SUSTANCIAS QUIMICAS</b>				
Alcalinidad (ppm CaCO <sub>3</sub> )	120		50-150	
Arsenico (ppm As)	0.01-0.05	1	0.01-0.05	1-5
Bario (ppm Ba)	0.5-1.0	0.5-1.0		
Bicarbonato (ppm CaCO <sub>3</sub> )	120		3-100	
Boro (ppm B)	1			0.2-0.5
Cadmio (ppm Cd)	0.01	0.1	0.01	
Calcio (ppm Ca)				40

**TABLA 4-12 (Continuación)**  
**NORMAS DE CALIDAD DE AGUA PARA VARIOS USOS**

	MUNICIPAL	RECREACIONAL	INDUSTRIAL	AGRICOLA
Carbonatos (ppm $\text{CaCO}_3$ )	120		200-400	10
Dióxido de Carbono (ppm $\text{CO}_2$ )		30		20-40
Cloruros (ppm Cl)	250	50	50-250	100
Cromo (ppm Cr)	0.01-0.05	1	0.05	0
Color (unidades)	15	30	50	
Cobre (ppm Cu)	1	0.2		0.2
Fluoruro (ppm F)	1.4-2.4	5	1.5	
Dureza (ppm $\text{CaCO}_3$ )	80		50-400	
Hidrocarburos Halogenados (ppm)	0.006	0.01		
pH	6.5-8.5	6.5-9.0	6.0-9.5	6.0-9.5
Hierro (ppm Fe)	0.3		0.5	
Plomo (ppm Pb)	0.05	0.1		
Magnesio (ppm Mg)	125			20
Manganeso (ppm Mn)	0.01-0.05		0.5	
Compuestos Fenólicos (ppm)	0.0005-0.001	0.2-1.0	0.001-0.01	0.005-0.02
Emissiones Beta (uuc/l)	1000			
Radio (uuc/l)	3			
Estroncio 90 (uuc/l)	10			
Selenio (ppm Se)	0.01			
Silice (ppm $\text{SiO}_2$ )	10		40	
Plata (ppm Ag)	0.02-0.05	0.01		
Sodio (ppm Na)	0-10		50	30-60
Sulfato (ppm $\text{SO}_4^{-2}$ )	250		100-250	190
Sabor	0			
Total de Sales Disueltas (ppm)	500	1000		1000
Zinc (ppm Zn)	1-5	0.1-3.0		
SEDIMENTOS				
Turbidez (unidades Jackson)	1-25	10-25	250	
Total de Sólidos Disueltos (ppm)	500	3000	100-1000	
Acfitos (ppm)	0	0.3	0	37



38 LISTA DE USUARIOS DE EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA (13)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Abrasivos (Fabricantes)	X		X	X	X				X	X	X
Acidos (Plantas)	X	X	X	X	X					X	X
Adhesivos (Fabricantes)	X			X	X						
Aviones (Plantas)	X	X		X	X			X	X	X	
Aeropuertos	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
Aire (Derivados de)	X	X	X	X	X	X			X	X	X
Alcohol (Destilerías)	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Alcalis	X	X	X	X	X				X	X	X
Aluminio (Fabricantes)	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Amonio (Plantas)	X	X	X	X	X				X	X	X
Anilinas	X	X	X	X	X	X				X	X
Arsenales	X				X					X	X
Asbestos (Minas y Plantas)	X	X		X	X						
Asfalto (Productores)	X	X		X	X			X		X	
Asilos	X			X	X					X	X
Automóviles (Industria de)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acumuladores	X		X	X	X				X		
Azul Añil (Fabricantes)	X		X	X	X						
Alfombras (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Aspiradoras (Fábricas)	X			X	X						
Algodón (Despepitadoras, Blanqueadoras)	X		X	X	X	X				X	X
Algodón (Linters)	X		X	X	X			X	X	X	X
Acabados Textiles	X		X	X	X					X	X
Armas de fuego (Fábricas)	X			X	X						
Agua Oxigenada (Fábricas)	X	X	X	X	X			X	X	X	X
Aislantes	X	X	X	X	X					X	X
Aserraderos	X				X			X			
Aceite Comestible (Refinerías)	X		X	X	X	X		X	X	X	X
Agua Negra (Plantas de)	X				X					X	X
Almidón (Fábricas)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acerías	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Almacenes de Depósitos	X				X						
Albercas	X			X	X					X	X
Almacenes	X				X						
Alambres (Fábricas)	X				X					X	X
Bolsas (Fábricas)	X	X	X	X	X	X		X		X	X
Bastimentos (Ejército)	X	X	X	X	X					X	
Básculas (Fábricas)	X				X						
Bancos	X			X	X					X	
Bario	X								X		
Blanqueadores (Fabricantes)	X	X		X	X					X	X
Barcos (Talleres)			X	X	X						
Barcos de Vapor		X	X	X	X					X	X
Boráx (Productores de)		X	X	X	X			X	X	X	

TABLA 4-13 (Continuación)

Usuarios: Lista Clasificada

39

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Botones (Fábricas)	X	X	X		X						
Bujías (Fábricas)	X		X		X				X		
Barniz (Fábricas)	X	X	X		X				X		
Cobertores (Fábricas)	X	X	X		X					X	X
Calderas (Fábricas)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cajas (Fabricantes)			X		X		X			X	
Cereales Empacados (Fábricas)	X	X	X		X		X			X	X
Cervecerías	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Constructoras			X		X	X				X	X
Cables (Compañías)		X	X		X	X				X	X
Cafeterías		X			X					X	X
Campos (Varios)		X	X		X					X	X
Carbón (Productores)	X	X	X	X	X		X	X		X	X
Catalíticos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Celofán	X	X	X		X						
Celuloide	X		X		X					X	
Celulosa (Alfa)	X	X	X		X		X		X		
Celulosa (Esteres)	X	X	X		X					X	
Cemento			X		X		X			X	
Cerámica	X	X	X		X			X	X	X	X
Cereales (Molinos)	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Cadenas (Fábricas)			X		X						
Cámara de Comercio			X	X	X						X
Cigarros y Tabacos (Fábricas)		X	X		X					X	X
Cítricos (Empacadoras)	X	X	X		X					X	X
Carbón (Minas e Industrias)	X	X	X	X	X			X	X	X	X
Café Soluble (Fábricas)	X	X	X		X					X	
Colegios		X	X		X	X	X	X	X	X	X
Compresoras (Fábricas)		X	X	X	X						
Compresoras (Estaciones)		X	X	X	X		X		X	X	
Compañías Constructoras			X	X	X					X	X
Cooperativas			X		X						
Cobre (Minas y Refinerías)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cordelerías	X	X	X		X					X	
Corcho (Fábricas)		X	X		X			X		X	
Cosméticos (Fábricas)	X	X	X		X				X	X	
Crecotadoras	X				X						
Cubiertos (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Cremerías	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Clínicas	X				X					X	X
Cola (Fabricantes)	X	X	X	X	X					X	X
Calefacción (Compañías)	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Casas (Residencias, Fraternidades, etc.)	X			X	X			X		X	X
Cueros (Tenerías)	X		X	X	X	X				X	X

TABLA 4-13 (Continuación)

40 Usuarios; Lista Clasificada

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Cal. (Productores)	X			X			X		X	
Correos (Oficinas)	X		X	X					X	X
Cerillos (Fábricas)	X	X	X	X			X		X	X
Ciudades (Plantas de Tratamiento)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Canteras	X			X			X		X	
Compañías Azufreras	X	X	X	X		X	X		X	
Carros de Ferrocarril (Armadoras)	X			X						
Carpinterías	X			X			X			
Dulces (Fábricas)	X	X	X	X					X	
Dielectricos (Fábricas)	X	X	X	X	X			X	X	X
Diesel (Plantas)		X		X				X	X	
Desinfectantes (Fábricas)	X			X	X				X	
Destilerías	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Droguerías	X	X	X	X	X			X	X	X
Deportes Utensilios (Fábricas)	X		X	X	X			X	X	X
Detergentes (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Energía Atómica (Plantas)	X	X	X	X	X			X	X	
Ejército	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Embotelladoras	X		X	X	X	X		X	X	X
Edificios (Públicos, Privados, Oficinas)	X		X	X				X	X	
Empacadoras (Legumbres, Frutas, Carnes)	X	X	X	X	X	X			X	X
Excavadoras (Compañías)	X			X					X	
Elastómeros	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Equipo Eléctrico	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Electrodeposición (Plantas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Elevadores (Fábricas)	X	X		X					X	
Elevador s (Granos)	X	X		X						
Esmaltes (Fábricas)	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Explosivos (Fábricas)	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Extractos (Fábricas)	X	X	X	X	X			X	X	X
Estaciones Abastecedoras (Varios)			X	X					X	
Empaques (Fábricas)	X	X	X	X	X			X	X	X
Engranes (Talleres)	X			X						
Empacadoras de Carne	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Espejos (Fábricas)	X		X	X	X				X	X
Equipo Optico (Fábricas)	X	X	X	X	X			X	X	
Estudios Cinematográficos		X	X	X	X				X	X
Estampador (Textiles)	X	X	X	X	X				X	X
Editoras	X		X	X	X				X	X
Estaciones de Bombeo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Exhibición (Fabricantes de cajas de)	X			X						
Estufas (Fábricas)	X			X						
Estudios Fotográficos		X	X	X					X	X
Extractos de Madera (Fábricas)	X	X	X	X	X		X		X	

TABLA 4-13 (Continuación)

Usuarios: Lista Clasificada

41

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Estambres (Fábricas)	X		X	X	X	X	X			X	X
Equipo Rayos X (Fábricas)	X				X						
Fajas (Fábricas)	X		X		X					X	X
Fotografía (Artículos)	X		X	X	X			X	X	X	X
Fuerza (Centrales de)	X	X		X	X	X	X	X		X	X
Frigoríficos	X	X	X	X	X					X	X
Fieltro (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Fertilizantes (Fábricas)	X	X	X	X	X					X	X
Filtración (Plantas)	X			X	X		X	X	X	X	X
Forja (Trabajo de)	X			X	X					X	X
Frutas (Empacadoras y Enlatadoras)	X		X	X	X				X	X	X
Fierro (minas y Fundiciones)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Farmacéuticos (Productos)	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Fotografías (Revelado)	X			X	X					X	X
Fosfatos (Minas)	X		X		X			X	X	X	X
Fotografía (Material para)	X		X	X	X		X	X	X	X	X
Ferrocarriles	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Fundidoras (Varios)	X	X		X	X	X	X	X		X	X
Grasas para Zapatos (Fábricas)	X	X	X		X				X	X	X
Gas (Plantas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gases Comprimidos y Líquidos (Fábr.)	X	X	X	X	X		X		X	X	X
Gasa (Quirúrgica (Fábricas))	X		X	X	X					X	X
Germicidas (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Gelatina (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Guantes (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Glucosa (Fábricas)	X	X	X	X	X		X	X		X	X
Gobierno (Oficinas)	X			X	X					X	X
Hojalata (Envases)	X			X	X					X	X
Hielo Seco (Fábricas)	X	X			X		X		X	X	X
Haciendas y Plantaciones	X	X	X	X	X					X	X
Hornos (Fábricas)	X			X	X					X	X
Hospitales	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Hoteles	X			X	X					X	X
Hidrogenadoras (Plantas)	X			X	X				X		
Hielo (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Hielados (Fábricas)	X	X	X	X	X		X			X	X
Hule (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Herramientas (Máquinas)	X				X						
Hilo (Fábricas)	X		X	X	X			X		X	
Herramientas (Fábricas)	X				X						
Hiluzas (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Iglesias y Conventos	X				X					X	X
Industrias Alimenticias	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Insecticidas (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	

42 Usuarios: Lista Clasificada

TABLA 4-13 (Continuación)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Instituciones (Varias)	X			X	X			X	X	X	X
Instrumentos (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Imprentas (Fábricas)	X			X	X					X	X
Impermeabilizantes (Fábricas)	X	X		X	X					X	
Ingenios Azucareros	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Jamón (Fábricas)	X			X	X						
Jabón (Fábricas)	X		X	X	X	X		X	X	X	
Jarabes (Fábricas)	X		X	X	X		Y	X		X	
Latón (Fundiciones)	X	X		X	X	X				X	
Ladrilleras	X			X	X		X			X	X
Limpiadores y Tintes (Fábricas)	X		Y	Y	X					X	X
Laboratorios Dentales	X			X	X	X					
Laboratorios (Varios)	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Lacas (Fábricas)	X			X	X						
Lámparas y Bulbos (Fábricas)	X		X	X	X			X	X	X	X
Lavanderías	X		X	X	X					X	X
Lino (Telares)	X		X	X	X					X	X
Linoleums (Fábricas)	X			X	X					X	X
Locomotoras (Talleres de)	X			Y	X			X		X	X
Lubricantes (Fábricas)	X	X		X	X		X		X	X	X
Litografía de Metales	X		X	X	X		X	X	X	X	X
Lápices (Fábricas)	X			X	X				X		
Laminadoras	X	X		X	X		X			X	
Laminadoras de Metal	X			X	X					X	
Laminadoras de Tubería	X			X	X		X			X	
Llantas de Hule (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	Y	Y	X	X	X
Levadura (Fábricas)	X			X	X	X					
Máquinas Registradoras (Fábricas)	X			X	X					X	X
Maíz (Productos de)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Molinos de Alimentos (Ganado)	X	X		X	X	X				Y	X
Molinos de Trigo	X	Y		Y	X	X				X	X
Muebles (Fábricas)	X			X	X					X	X
Máquinas de Gas (Fábricas)	X	X		X	X		X	X	X	X	
Máquina de Gas (Plantas de Fuerza)	X	X		X	X	Y	X		X	X	X
Medias y Calcetines (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Madera (Aserraderos)	X			X	X			X		X	
Maquinaria Agrícola (Fábricas)	X	X		X	X			X	X	X	X
Magnesio	X	X	X	X	X		X	Y		X	Y
Marina (Campos, barracas, hospitales)	X			X	X			X		X	
Molinos (Varios)	X	Y		X	X	Y	Y	Y		X	X
Minas (Varios)	X	X	X	X	X	X	Y	X	X	X	X
Hoteles	X			X	X					X	X
Motores Eléctricos (Fábricas)	X	X		X	X			X	X	X	X
Máquinas de Escribir (Fábricas)	X		Y	Y	Y				X		

TABLA 4-13 (Continuación)

Usuarios: Lista Clasificada

43

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Masonite (Fábricas)	X				X				X	X	
Máquinas Lavadoras (Fábricas)	X				X			X	X		
Níquel (Refinerías y Productores)	X			X	X		X	X	X	X	
Nitrato (Minas y Fábricas)	X				X						
Oro (Minas)	X	X	X		X					X	
Obras Hidráulicas	X			X	X	X	X			X	X
Panaderías	X		X	X	X			X		X	X
Polvos de Hornear (Fábricas)	X	X	X	X	X					X	X
Pastelerías	X		X	X	X					X	X
Plantas Químicas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Perforadoras Pozos (Cías.)	X				X					X	
Plantas Eléctricas	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Plantas Electroquímicas	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Películas Fotográficas (Fábricas)	X		X	X	X		X	X	X	X	X
Pescaderías	X		X	X	X					X	X
Plomo (Minas, Fundiciones y Refinerías)	X		X	X	X				X	X	X
Plantas Mercerizadoras	X		X	X	X					X	X
Pozos Petroleros (Perforación, Presurización)	X				X		X			X	X
Pinturas y Pigmentos (Fábricas)	X		X	X	X		X		X	X	X
Papel (Fábricas)	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Pectina (Fábricas)	X				X						
Penitenciarías	X			X	X	X				X	X
Petroquímica (Plantas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pianos (Fábricas)	X				X						
Plásticos (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Porcelana (Fábricas)	X		X		X				X	X	X
Productos (Plantas)	X				X						
Pulpa (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Petróleo (Refinerías)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pailería	X				X						
Pez Líquida (Fábricas)	X	X			X			X		X	
Preparación para Sanitarios (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Papel Tapiz (Fábricas)	X				X						
Queso (Fábricas)	X			X	X					X	X
Radiodifusoras	X	X		X	X		X		X		
Relojes (Fábricas)	X			X	X					X	X
Ropa (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Radiadores	X			X	X					X	
Radio (Fábricas, Estaciones)	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Rayón (Fábricas)	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Reformatorios	X			X	X					X	X
Refractarios (Fábricas)	X			X	X					X	X
Refrigeración (Plantas)	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Refrigeradores (Fábricas)	X			X	X			X		X	

44 Usuarios: Lista Clasificada

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Restaurantes	X			X	X					X	X
Rastros (Mataderos)	X			X	X					X	
Relojes (Fábricas)	X	X		X	X		X				
Salas de Belleza y Peluquerías	X			X	X				X		X
Sombreros (Fábricas)	X		X	X	X					X	
Servicios Públicos	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Sal (Productores)	X		X	X	X		X	X		X	X
Separadores (Fábricas)	X		X	X	X					X	
Señales (Equipo de)	X			X	X						
Seda (Telares)	X			X	X					X	X
Soda (Fábricas)	X		X	X	X			X		X	
Solventes (Fábricas)	X	X		X	X		X	X	X	X	X
Soya (Productos)	X		X	X	X	X	X	X		X	
Tintorerías	X		X	X	X			X		X	X
Telas (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Tintorerías (Varios)	X		X	X	X				X	X	X
Tintas (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Tejidos de Punto (Telares)	X		X	X	X					X	X
Talleres Mecánicos	X	X		X	X			X	X	X	X
Tubos (Fábricas)	X	X		X	X			X		X	X
Tiendas (Varios)	X		X	X	X			X			
Tenerías	X		X	X	X	X				X	X
Taninos	X		X	X	X	X					
Teléfonos y Telégrafos (Cías.)	X	X		X	X			X		X	
Televisión (Estaciones, etc.)	X	X	X	X	X				X	X	X
Textiles (Varios)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Teatros y Auditorios	X			X	X						
Tejas (Fábricas)	X			X	X						
Titanio (Fábricas)	X			X	X	X	X			X	
Tabaco (Elaboradores)	X				X	X				X	
Trementina (Campos)	X			X	X						
Termos (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	
Utensilios de Plata (Fábricas)	X		X	X	X				X	X	X
Universidades	X			X	X	X	X		X	X	X
Uranio (Refinerías)	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
Velas (Fábricas)	X			X	X					X	X
Viscosa (Productos de)	X		X	X	X	X		X		X	X
Ventiladores (Fábricas)	X		X	X	X					X	X
Vidrio (Fábricas)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Vacunas (Fábricas)	X			X	X						
Vanadio (Cías.)	X			X	X				X		
Viscosa (Plantas)	X		X	X	X			X	X	X	X
Yeso (Fábricas)	X		X	X	X	X	X	X		X	X
Yute (Telares)	X		X	X	X					X	X

TABLA 4-13 (Continuación)

Usuarios: Lista Clasificada

45

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Y.M.C.A. y Y.W.C.A.	X			X	X					X	X
Zapatos (Fábricas)	X		X	X	X					X	
Zeolitas (Fábricas)	X		X	X	X			X	X	X	X
Zinc (Minas y Refinerías)	X			X	X	X		X		X	

NOTA: Los encabezados para usos y equipos son como sigue: los primeros cuatro para usos, los restantes siete para procesos y equipos usados para efectuar esos procesos;

- (A) Calderas: uso de agua para alimento de calderas.
- (B) Enfriamiento: uso de agua para propósitos de enfriamiento.
- (C) Procesos: uso de agua para trabajos de proceso.
- (D) General: uso de agua para beber y otros usos generales.
- (E) Int. Cat. Na: intercambio catiónico ciclo sodico.
- (F) Int. Cat. H.: intercambio catiónico ciclo hidrógeno.
- (G) Cal en frío: cualquier proceso de cal en frío, cal-sodada en frío o procesos en dos pasos de cal e intercambio catiónico ciclo sodico.
- (H) Cal sodada en caliente: cualquier proceso de cal sodada en caliente o procesos en dos pasos e intercambio catiónico ciclo sodico, y proceso en dos pasos cal sodada en caliente y fosfato sodico.
- (I) Demi.: cualquier proceso de desmineralización por intercambio iónico.
- (J) Filtr.: proceso de coagulación, sedimentación y/o filtración.
- (K) Fe-Mn: cualquier proceso de remoción de hierro y/o manganeso.



**TABLA 4-14 REQUERIMIENTOS DE AGUA: CANTIDADES PARA VARIOS USOS**  
 (13)

Usuario o Producto	Unidades	Lt Agua/Unidad
Aceites Comestibles	Por lt	22
Alcohol	Por lt	100
Aluminio	Por k	1330
Aceero:		
Terminado	Por ton	240000
Aceero rolado:		
Cinta rolada en frío alisa en carbón	Por ton	230000
Cinta rolada en frío	Por ton	22500
Placa rolada en caliente	Por ton neta	55000
Aceero rolado	Por ton	300000
Aceero rolado	Por ton neta	410000
Hojalata	Por ton	48000
Butadieno	Por kilo	
Cerzas:	Por cada 100 cerdos	
Empacadora		2100
Rastro		2100
Corrales	por 4 000 m <sup>2</sup>	600
Calderas	Por HP caldera	16
Campos Petroleros	Por bbl crudo	684
Caballos	Por día/cabeza	45
Caballos muy trabajados	Por día/cabeza	80
Cervecerías	Por bbl	1800
Cemento	Por ton	2800
Coque	Por ton	13600
Condensadores	Por k vapor condensado	14-54
Cremerías y productos lácteos	Por tonelada	
Estación de recolección		1520
Embotelladora		2100
Quesería		1700
Cremería		670
Condensación de leche		1280
Leche en polvo (fábrica)		1260
Usos generales		2860
Destileras	Por c/36 lt grano fermentado	2300
Destiladoras	Por c/100 lt alcohol grado 100	8400
Destiladoras (agua enfriamiento)	Por c/100 lt alcohol grado 100	120000

**TABLA 4-14 REQUERIMIENTOS DE AGUA: CANTIDADES PARA VARIOS USOS (Continuación)**

Usuario o Producto	Unidades	Lt Agua/Unidad
Empacadoras:	Por c/100 cjs.	
Alubias		94000
Betabel, maíz, chícharo		4000
Calabacitas		9000
Chabecanos		30000
Duraznos, peras		25000
Espárragos		26000
Espinacas		80000
Ejotes		13000
Sauerkraut		1100
Succotash		47000
Tomate (productos de)		26000
Tomate entero		2800
Uva (jugo de)		2000
Uva picada		21000
Explosivos	Por kilo	750
Gasolina	Por litro	7-10
Gasado	Por cabeza/día	44
Gasado, vacas lecheras	Por cama/día	75-94
Hospitales	Por cabeza/día	500-1300
Hoteles	Por pers./cuarto/día	1320-2000
Jabón (fábricas)	Por ton	2000
Lavanderías:		
Comerciales	Por kilo	32-45
Institucionales		23
Miscelánea:		
Baños	Por baño	120
Duchas		8-40
Fregaderos de cocina		8-32
Fluómetro, nuevo		15
Fluómetro, viejo		18.8
Caja agua baños		28
Grifos de lavadero		16-40
Lavabos		4-20
Municipalidades	Por habitante/día	
Perfido, Refinerías	Por bbl de crudo	2500
Usuario o Producto	Litros de Agua por Tonelada	
	(Máx.)	(Mín.) (Prom.)
Pulpa de papel:		
Pulpa mecánica-perifódicos	49000	12500
Pulpa mecánica-especial	190000	19000

**TABLA 4-14 REQUERIMIENTOS DE AGUA: CANTIDADES PARA VARIOS USOS (Continuación)**

Usuario o Producto	Litros de Agua por Tonelada		
	(Máx.)	(Mín.)	(Prom.)
<b>Pulpa al sulfita:</b>			
-sin blanquear	210000	100000	183000
-blanqueada	230000	160000	190000
-totalmente blanqueada	350000	190000	285000
-periódicos, s/blanq.	500000	260000	350000
-libros, bond, catálogos,			
-sin blanquear	220000	110000	145000
-blanqueada	155000	145000	150000
-totalmente blanqueada	310000	260000	260000
<b>Pulpa a la soda:</b>			
-sin blanquear	127000	75000	105000
-blanqueada	150000	48000	99000
-totalmente blanqueada	300000	135000	218000
<b>Pulpa Kraft</b>			
-sin blanquear	214000	44000	130000
-blanqueada	250000	20000	135000
-totalmente blanqueada	350000	340000	345000
<b>Papel:</b>			
tapiz	45000	3300	24000
artículos de oficina	160000	24000	35000
empaques kraft	80000	7500	34000
cartulinas	114000	25000	65000
cordelería			376000
papel bond	640000	46000	180000
papel libro	340000	20000	105000
papel kraft	320000	55000	135000
papel tela (papeles finos)	640000	105000	320000
papel sisú	187000	30000	110000
papel periódico	125000	35000	83000
<b>Usuario o Producto</b>	<b>Unidades</b>	<b>L. Agua/Unidad</b>	
Pólvora sin humo	Por tonelada	180000	
Residencias	Por persona/día	120-200	
Restaurantes (uso general)	Por comida	18.5	
Transportes (Ferrocarril)	Por ton/kilómetro	2	

**TABLA 4-14 REQUERIMIENTOS DE AGUA: CANTIDADES PARA VARIOS USOS (Continuación)**

<b>Tenencias:</b>	<b>Por 50 kg cuero crudo</b>	
taninos		3000
crómico		3000
<b>Textiles:</b>	<b>Por ton procesada</b>	
algodón-encolado		6200
algodón-desencolado		132000
algodón-remojo		9000
algodón-blanqueo		2400
algodón-maceración		2400
algodón-mercerizado		224000
Impresión		120000
rayón		1200
tejido de punto rayón		67000
tejido medias de seda		28
lana-blanqueo	Por kilo	160
lana-acabado	Por kilo	525
tejido-básico	Por tonelada	135500
tejido-directo		48000
tejido-en cuba		142000
tejido-sulfurado		41000
tejido-desarrollado		108000
tejido-naftal		34000

### 5.1 ADSORCION

La adsorción es la adhesión física de moléculas o coloides a la superficie de un sólido, un adsorbente, sin que se lleve a cabo una reacción química. La adsorción se usa para eliminar sílice, óxidos insolubles y compuestos orgánicos, ya que son las sustancias que producen el color, el sabor y el olor.

### 5.2 AERACION

Se utiliza para eliminar gases indeceables y las impurezas volátiles (sulfuro de hidrógeno, bióxido de carbono y materia orgánica volátil). La aereación se usa ampliamente para la oxidación de impurezas inorgánicas como, por ej., hierro, manganeso, y la remoción u oxidación de impurezas volátiles causantes del olor y mal sabor.

### 5.3 CLARIFICACION

Se utiliza para eliminar gran parte de la turbiedad y sedimentos encontrados en las aguas superficiales. Normalmente éste es un primer paso en el tratamiento, ya que la mayoría de las aplicaciones requiere de un agua clara. El empleo de coagulantes y ayuda de los mismos acelera el proceso de asentamiento de las partículas.

### 5.4 CLORACION

Es la aplicación de cloro al agua, generalmente con fines de desinfección. El proceso será tan efectivo como lo sea el abastecimiento de cloro, para que produzca una desinfección eficaz. La desinfección significa una disminución en la población de bacterias hasta una concentración inofensiva, en contraste con la esterilización en la cual se efectúa una destrucción total de la población bacteriana.

### 5.5 COAGULACION

La coagulación es un proceso para atrapar la turbidez y color del agua dentro de un flóculo. Esto incrementa el tamaño de los sólidos suspendidos en el agua hasta un punto en que estos puedan sedimentarse.

### 5.6 DEALCALINIZADOR

Elimina la alcalinidad presente en el agua cruda. Esta impureza puede ser reducida por una serie de métodos por intercambio iónico. El grupo iónico responsable de la alcalinidad es el radical bicarbonato, así como carbonatos, hidróxidos, silicatos, boratos y fosfatos.

### 5.7 DES-SILIZADOR

Si la aplicación requiere de agua de mayor pureza, la remoción de sílice y bióxido de carbono es factor primordial. En este proceso se emplean resinas de intercambio iónico.

### 5.8 DESMINERALIZACION

Remueve del agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, 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.

### 5.9 DESAERACION

Los desaeradores se usan frecuentemente para reducir el contenido de los gases a un mínimo. Esto se aplica generalmente al agua de alimentación a calderas donde se requiere que el contenido de oxígeno sea mínimo con la intención de reducir la corrosión en la caldera misma y en las líneas de retorno de condensados cuando este se recupere.

### 5.10 DESTILACION

Consiste en transmitir energía suficiente para que el agua a purificar sea evaporada y posteriormente condensada, quedando libre de impurezas, que se quedan en el fondo del recipiente. Es un método que tiene la desventaja de altos costos de operación y mantenimiento.

### 5.11 ELECTRODIALISIS

La electrodiálisis se emplea en la producción de agua a partir de agua salobre. La fuerza impulsora es de carácter eléctrico. La magnitud de la fuerza impulsora o de corriente eléctrica aplicada, determina la cantidad de sal (cationes más aniones) removidos del agua.

### 5.12 FILTRACION

La filtración es una operación unitaria utilizada para separar partículas sólidas contenidas en un fluido por su paso a través de un medio, ya sea poroso, fibroso o granular en el cual, quedan retenidas las partículas.

### 5.13 FLOCULACION

La floculación consiste en agitar suavemente el agua tratada con coagulante hasta alcanzar condiciones que permitan que el material floculento se junte y adhiera formando grandes masas.

### 5.14 OSMOSIS INVERSA

En la osmosis inversa, una fuerza impulsora, la presión diferencial a través de la membrana, hace que el agua fluya de la solución más fuerte a la más débil. El flujo osmótico, directo o inverso, depende de la propiedad selectiva de algunas membranas para permitir el paso de ciertos componentes de la solución, usualmente el solvente se pasa a través de la membrana. El flujo se hace por difusión, del lado de concentración más alta al de menor concentración,

debido a diferencias de potencial químico.

### 5.15 SEDIMENTACION

Un sedimentador es una estructura a través de la cual fluye el agua a tan baja velocidad que el material suspendido caerá depositándose en el fondo del tanque, saliendo de este agua relativamente clara. La cantidad de materia removida en un tanque sedimentador es función directa del tiempo de retención.

### 5.16 SUAVIZACION CICLO SODIO

La suavización por medio de resinas consiste en pasar el agua a través de un lecho de material que posee la propiedad de eliminar calcio y magnesio del agua y de reemplazar estos iones con sodio y potasio. El intercambio tiene lugar rápidamente, de tal manera que el agua cruda, a su paso por el lecho de resinas, pueda ser ablandada casi completamente.

### 5.17 SUAVIZACION CAL-SODADA EN FRIO

En este proceso se precipitan las sales incrustantes de calcio y magnesio. Reduce la dureza, la alcalinidad y elimina la turbiedad.

### 5.18 SUAVIZACION CAL-SODADA EN CALIENTE

El procedimiento de ablandar el agua en caliente, difiere de que es llevado a efecto a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Debido a estas elevadas temperaturas, los procesos en caliente usualmente se limitan a tratamiento de aguas para calderas. Además, cualquier cantidad de dureza eliminará cierta cantidad de sílice.

### 5.19 ULTRAFILTRACION

Al igual que la ósmosis inversa, la ultrafiltración por membrana depende de una fuerza impulsora, presión y una membrana que es permeable a algunos de los componentes de una disolución líquida o mezcla e impermeable a otros. La ultrafiltración no está controlada por la presión osmótica.

### 5.20 ZEBOLITA DE MANGANESO

Estructura química compleja que puede considerarse como un silicoaluminante de sodio, que tiene la propiedad de quitar la dureza al agua que se hace pasar a través de una capa de ella.





### 6.1 REJILLAS

Indistintamente de que las rejillas sean de operación manual o mecánica, rectas o curvas, el fin primordial de éstas es no permitir el paso de sólidos gruesos flotantes, o en suspensión, evitando así la obstrucción de los equipos de tratamiento.

Una rejilla de barras o rastrillo está formado por barras paralelas y con espacios variables dependiendo del material flotante que lleve el agua por atrapar, siendo su construcción con barras rectas o curvas.

Rejilla de tela metálica con alambrado de fábrica, éstas se usan generalmente para retener partículas muy pequeñas que se logran pasar en las rejillas de barras.

Rejillas de banda consiste en una banda o sinfín perforada, que pasa sobre dos cilindros una superior y una inferior, eliminándose partículas muy pequeñas.

Rejillas de alas éstas tienen aberturas radiales, espaciadas uniformemente, que giran sobre un eje horizontal.

Todas las rejillas o cribas se pueden clasificar en fijas o móviles. Las fijas siempre se encuentran en una posición permanente y tienen que limpiarse haciendo uso de rastrillos con dientes que se hacen pasar entre las barras, siendo esta limpieza manual o mecánica.

Las rejillas móviles son estacionarias mientras están en servicio pero pueden desmontar sacándolas de las aguas residuales para su limpieza.

Los detalles fundamentales que deben tomarse en cuenta para proyectar una rejilla son:

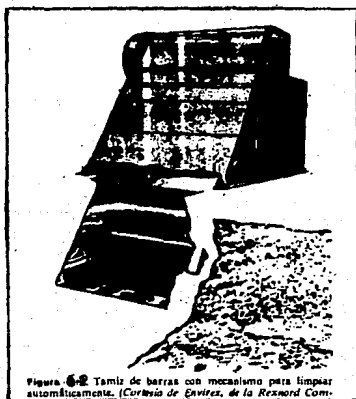
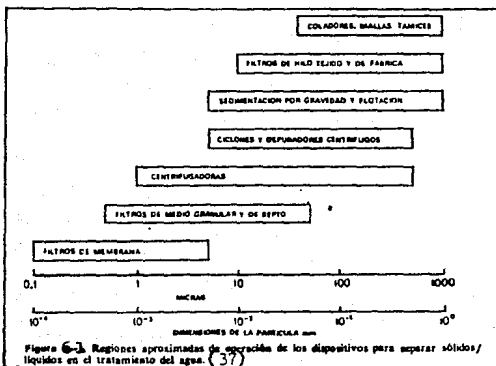
- a. Las aberturas entre barras deben ser de 2.5 a 5 cm en rejillas manuales.
- b. Las rejillas que se limpian mecánicamente pueden ser ten

- reducidas como 1.5 cm.
- c. En caso de rejillas que se limpien a mano deben colocarse de modo que proporcionen una velocidad de puso a través de ésta de 30 cm/seg.
  - d. Velocidad máxima, durante el período de tiempo de lluvia no debe exceder de 75 cm/seg para rejillas con limpieza mecánica.
  - e. Las rejillas que se tengan que limpiar a mano, deben colocarse con una pendiente que formen un ángulo de 30 a 45° con la horizontal.
  - f. Las rejillas grandes se construyen con aberturas de las de 3.7 a 7.5 cm.
  - g. Las cribas que son construídas con orificios pequeños para retener material pequeño, como sólidos pequeños, arenas, etc., tienen aberturas en forma de ranuras de 1.6 a 6 mm de ancho y de 6 a 15 mm de longitud.
  - h. La velocidad horizontal a través de la cámara de una rejilla debe ser menor de 60 cm/seg para otros tipos de aguas residuales que no traigan arena.

Las micro rejillas se construyen con tela metálica muy fina, este tipo de rejillas se han usado algunas veces en sustitución de los tanques de sedimentación, para eliminar los sólidos sedimentables de los líquidos residuales del tratamiento.

## 6.2 DESMENUZADORES

Los desmenuzadores son aparatos que actúan como cortadores y como cribadores. Su propósito es desmenuzar los sólidos (madera, plásticos, etc.) y sacarlos del agua cruda.



## 7.1 AERACION

La aeración es el proceso mecánico por el cual se procura un contacto íntimo con el agua. Aplicada al tratamiento de agua, la reacción transfiere moléculas gaseosas, principalmente oxígeno, de aire (fase gaseosa) al agua (fase líquida). Aunque a menudo la meta es disolver oxígeno en agua, la aeración incluye también la remoción del agua de gases indeseables, como  $\text{CO}_2$  y metano; este proceso se cita algunas veces como desgasificación.

La aeración está casi acompañada de otros procesos o reacciones, que pueden ser de naturaleza física, química o bioquímica. Con mucho, el mayor uso del equipo de aeración se encuentra en el campo de la oxidación bioquímica de desechos orgánicos, domésticos e industriales. Pero la aeración también se usa ampliamente para la oxidación de impurezas inorgánicas como, por ej., hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno, y para la remoción u oxidación de impurezas volátiles causantes del olor o mal sabor. La aeración cuyo objetivo es aumentar sólo el contenido de oxígeno en el agua se lleva a cabo algunas veces en el último paso en una planta de tratamiento de agua o de desecho.

## 7.2 AERADORES

Los tipos de aeradores dependen de cierto número de factores, entre los que citaremos (1) contenido de bióxido de carbono del agua, (2) grado de remoción requerido, (3) si se requiere o no la eliminación de hierro y/o manganeso, y (4) volumen de agua involucrado.

Básicamente, los aeradores pueden dividirse en tres clases principales como sigue (1) aeradores en los cuales el agua fluye o cae a través del aire; (2) aeradores en los cuales el aire se burbujea en el agua en un tanque abierto; (3) aeradores en los cuales

el aire se bombea al agua y se disuelve bajo la presión en un tanque cerrado.

La clase (1) cubre la gran mayoría de los aeradores e incluye los de escalones, cono estriado, charolas, charolas con coque, charolas construidas con tiras de madera, con boquillas de aspersión y aeradores de tiro forzado. Por lo que respecta al aire disuelto en el agua, casi cualquiera de éstos prácticamente satura el agua con aire, pero para eliminar los olores volátiles o gases, hay una gran diferencia en la operación de cada uno de ellos. De una manera breve, entre más delgada sea la película de agua o más pequeñas las gotas, será mejor el contacto entre el agua y el aire y aproximándose más al verdadero flujo a contracorriente, se obtienen los mejores resultados.

Debido a la acción del aire de mezclar inmediatamente el agua que entra al desareador con aquéllas más o menos desareadas del tanque, los aeradores de la clase (2) son generalmente más ineficientes cuando se trabajan continuamente, no siendo así cuando se hacen trabajos por lotes o intermitentes.

El aire puede disolverse fácilmente en el agua por el método (3). De hecho, se disolverá demasiado aire a menos de que la aereación se efectúe sólo en una parte del agua. En casos en los que el hierro deba eliminarse del agua baja en bióxido de carbono libre y que tenga un pH favorable, la aereación por presión es a menudo empleada para eliminar la aereación abierta y el bombeo. Cuando deben eliminarse altos contenidos de bióxido de carbono libre, la aereación por presión es de poco valor, aun cuando los equipos tengan aditamentos de venteo.

### 7.2.1 AERADORES DE ESCALONES

Estos aeradores consisten de una serie de escalones por los que el agua fluye en cascada. Usualmente estos escalones se hacen de concreto y terminan en un recipiente del mismo material; ocasionalmente se pueden hacer de madera. El número de escalones usualmente no es menor de tres y pocas veces mayor de 10. Para introducir aire al agua, este aerador es satisfactorio, pero para limitaciones de espacio no es tan eficiente como los aeradores de bandejas con coque, de aspersión, o de tiro forzado.

### 7.2.2 AERADORES DE CONO ESTRIADO

Estos aeradores se emplean a menudo en pozos de flujo libre con poca carga. Usualmente se construyen de madera en forma cónica o piramidal, alrededor de la boca del pozo, y su altura total es de un metro y medio. Se les añaden estrías para crear turbulencias. La arista inferior del cono deberá estar sobre el nivel del agua del recipiente que lo colecta, de manera que el agua tenga una caída a través del aire, a menudo la arista del cono se sumerge hasta la altura del agua en el recipiente inferior. Este aerador no es eficiente debido al grueso de la película de agua que fluye sobre él, a la pequeña área del cono y a la insuficiente turbulencia.

### 7.2.3 AERADORES DE CHAROLAS

El aerador de charolas consiste de cuatro o cinco platos circulares de diferente diámetro montados uno sobre el otro, el más pequeño en la parte superior y el más grande en la inferior. Es más eficiente que el aerador de cono estriado por las caídas del agua de plato a plato, su eficiencia, por supuesto, depende del grosor de la película en las orillas de los platos.

## 7.2.4 AERADORES DE CHAROLAS CON COQUE

Este tipo de aeradores es ampliamente usado y muy estimado en la eliminación de hierro y manganeso de las aguas. Se puede hacer en forma rectangular o cilíndrica, usualmente se equipa con tres charolas, pero ocasionalmente se usan cuatro. El flujo para estos aeradores, ya sean de tres o cuatro charolas, es de 10 gpm/pie<sup>2</sup>, que es un dato de trabajo máximo. Estos aeradores emplean deflectores para disminuir las pérdidas por arrastre de viento y están equipados con una válvula de flotador para evitar que se inunden.

El agua entra al aerador por la charola superior y escurre hacia abajo a través de las restantes charolas y sus espacios de aire, hasta llegar al depósito inferior en donde después de un periodo de retención que generalmente es de 15 a 30 minutos pasa a los filtros. La duración de este periodo está limitada por la consideración de si el asentamiento es o no necesario. Si la cantidad de hierro es muy pequeña, el asentamiento no se toma en cuenta. Si la presencia de hierro es considerable, se hacen necesarios largos periodos de asentamiento para disminuir la carga a los filtros. En estos casos el depósito inferior debe estar provisto de un sistema para drenar los lodos.

En el caso de eliminación de manganeso, deben darse periodos de retención más largos, debido a que, el manganeso para su oxidación requiere, además del oxígeno, un pH elevado por lo que es necesario adicionar álcali; éste se agrega al agua inmediatamente después de aerearse, de aquí la necesidad de un mayor reposo del agua.

## 7.2.5 AERADORES CON REJILLAS DE MADERA

Estos tipos de aeradores tienen gran aplicación. Se fabrican en sección cuadrangular y la altura tiene variaciones considerables.

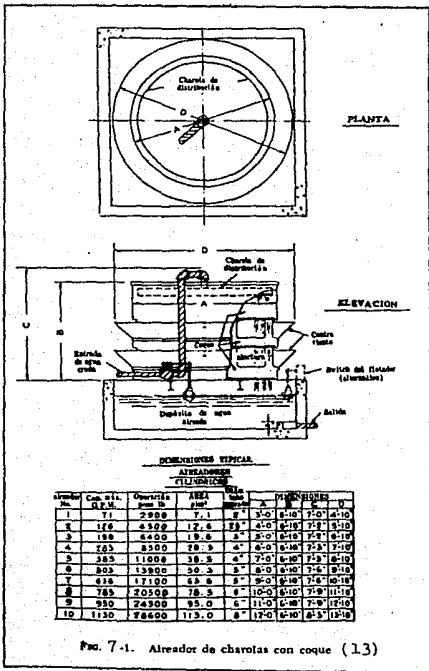
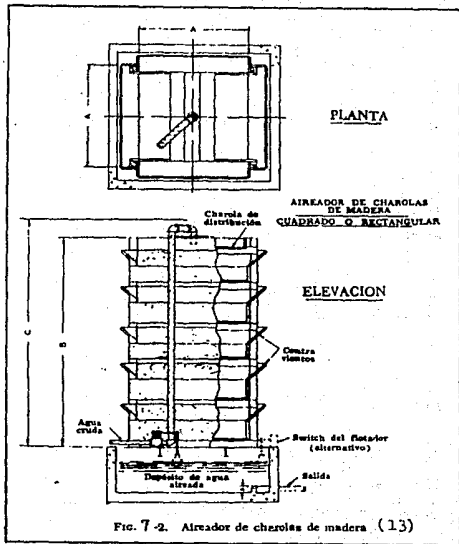


FIG. 7-1. Aireador de charolas con coque (13)





Las rejillas de estos aeradores estan espaciadas de tal manera que el agua de una rejilla cae al centro de la siguiente inferior. Para una aereación completa es muy importante que el agua fluya de charola en charola en forma de película delgada. Una creencia popular es que el agua se aerea mejor cuando cae de suficiente altura para que se divida en sinnúmero de gotitas, aumentando así la eficiencia. Una mejor aereación se obtiene con un número mayor de charolas y con poca altura entre ellas.

El menor número de charolas que se usa es de cuatro, y el mayor es de cerca de 18. El flujo de agua generalmente es de 5 a 10 gpm/ft<sup>2</sup>, correspondiendo los flujos menores con las alturas más reducidas de los aeradores. Los aeradores de madera se usan para la eliminación de gases tales como el metano, bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Tanto el aerador de rejillas de madera como el de charolas con coque, se usan para los mismos propósitos.

#### 7.2.6 AERADORES DE ROCIO

Estos aeradores se prefieren generalmente para las plantas municipales en la eliminación de olores y sabores. El mecanismo de desareación es puramente mecánico, es decir, se efectúa un barrido de los olores y sabores por medio del aire; por lo que una atomización más fina se obtendrá mayor eficiencia. Sin embargo, se ha encontrado en la práctica que los orificios demasiado pequeños tienden a taparse rápidamente, por lo que se recomienda los orificios de 1" a 1 3/8". Los rociadores se colocan generalmente sobre un depósito apuntando directamente hacia arriba de manera que el agua se colecta en el recipiente directamente después de haberse puesto en contacto con el aire. El espaciado de las toberas varía de una cada 5 m<sup>2</sup> a una cada 18 m<sup>2</sup>. La carga de la operación varía de poco menos de 8 pies a un poco más de 25.

## 7.2.7 ARREADORES DE TIRO FORZADO O DESGASIFICADORES

Este tipo de aeradores es una estructura cerrada que contiene un número dado de charolas cercanamente espaciadas, construidas generalmente de madera. El agua entra por la parte superior en la que, por medio de un distribuidor, se reparte sobre toda la superficie del aerador, fluyendo hacia abajo a través de las charolas del aparato, las que están construidas de tal manera que el agua de la gradilla superior cae en el centro de la inferior. En la parte inferior el agua pasa al depósito a través de un sello hidráulico. El aire se proporciona al aerador mediante un abanico cuya entrada se coloca en la parte inferior del aparato, la salida del aire y las sustancias eliminadas se hace por la parte superior descargando directamente a la atmósfera.

La alta eficiencia de estos aparatos se debe a la gran superficie de contacto entre el agua y el aire, además de que se puede tener un control más preciso del aire que se inyecta. La razón de flujo empleada en la práctica es de 22 gpm/pie<sup>2</sup>.

La eliminación del bióxido de carbono es la aplicación más importante de este aerador y sus resultados en la práctica son consistentes ya sea con aguas alcalinas, neutras o ácidas. Es también muy usado en la eliminación de sulfuro de hidrógeno. Como ya se dijo, esta operación se ha efectuado en aeradores de dos cámaras, cuyas cámaras superiores son del tipo de tiro forzado y se usan como lavadores de gases. Los gases eliminan el sulfuro de hidrógeno del agua por disolución del bióxido de carbono y reducción del pH. Las cámaras inferiores son aeradores de tipo abierto de rejillas de madera, que sirven para eliminar el bióxido de carbono libre que antes se había introducido al agua. En otros casos se recurre a burbujear aire, dependiendo de la acción bacteriana en el aerador y el depósito para la eliminación de sulfuro no removido por aeración.

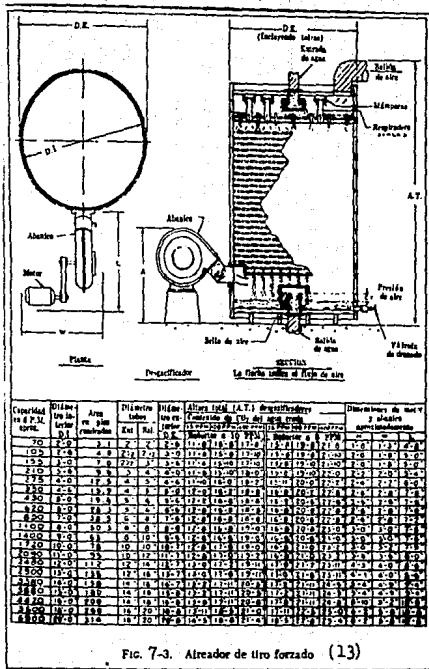


FIG. 7-3. Alfredor de tiro forzado (13)

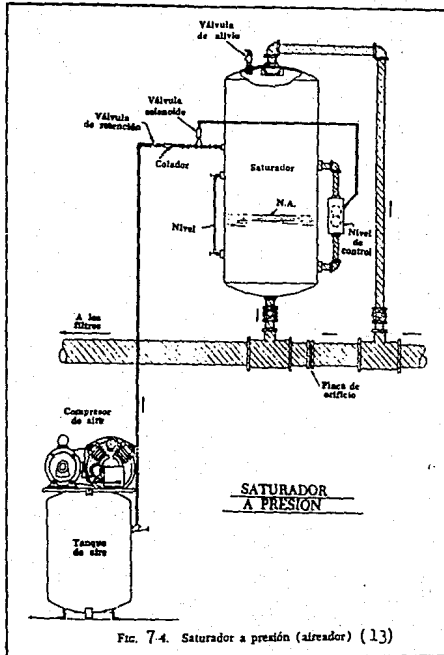


FIG. 7-4. Saturador a presión (alfredor) (13)

Este tipo de aerador casi siempre se construyen de madera y es capaz de manejar todo tipo de aguas. Debido a su habilidad de manejar aguas ácidas, se usan estos equipos en los sistemas de ionización para eliminar el  $\text{CO}_2$  de las celdas catiónicas que contienen apreciables cantidades de ácidos minerales. En algunos casos en lugar de las charolas de madera se pueden empacar con anillos Rasching o similares.

#### 7.2.8 TANQUES DESCARBONADORES

Este tipo de aeradores consisten de un tanque abierto construido casi siempre de madera, que en su fondo tiene colocado un difusor por el que hace burbujear aire en el agua. Estos equipos se usan comúnmente para eliminar el bióxido de carbono del efluente de los intercambiadores de iones que operan en ciclo hidrógeno, por lo que se llaman tanques descarbonadores. En general sólo se usan para manejar volúmenes moderados de agua. La corriente de aire mezcla inmediatamente el agua desaeada con la que recientemente entra en el tanque, por lo que se recomienda el uso de deflectores para eliminar este problema. Estos tanques trabajados en "batch" o por lotes, pueden bajar el contenido de bióxido de carbono tanto como se desea.

#### 7.2.9 AERADORES A PRESION

Estos aeradores o saturadores, se emplean ocasionalmente en la eliminación de hierro o manganeso, en aquellas partes en las que otro tipo de aeradores no son deseados. Ya que la solubilidad del aire en el agua aumenta en razón directa a la presión absoluta, el volumen de aire que se disolvera por ejemplo, a 75 psia es cinco veces mayor que la presión atmosférica. De aquí que si agua saturada con aire a 75 psia se saca por una válvula que descargue a presión ordinaria, salpicará fuertemente debido a que el aire disuelto se escapa rápidamente.

TABLA 7-1

CARACTERISTICAS DE OPERACION COMPARATIVAS EN  
AEREADORES

	AEREADOR DE CHAROLAS	AEREADOR DE REJILLAS DE MADERA	AEREADOR DESGASIFICADOR
a) Capacidad	10 gpm/ft <sup>2</sup>	5-10 gpm/ft <sup>2</sup>	22 gpm/ft <sup>2</sup>
b) Gases disueltos (max)			
CO <sub>2</sub> (ppm)	1700	1700	1700
H <sub>2</sub> S (ppm)	3900	3900	3900
c) Número de charolas	3-4	4-18	
e) Tiempo de retención	15-30 min		15-30 min
f) Características afluente			CO <sub>2</sub> < 10 ppm
g) Flujo (gpm)	140-2400	140-2400	67-7700

TABLA 7-2

SOLUBILIDAD DEL O<sub>2</sub> EN AGUA COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA,  
ELEVACION Y SALINIDAD (SOLIDOS DISUELTOS). (37)

TEMPERATURA °F	°C	ELEVACION, ft				SALINIDAD (mg/l) <sup>a</sup>	
		0	1000	2000	5000	400	2500
32	0	14.6	14.1	13.6	12.1	11.55	14.25
50	10	11.3	10.9	10.5	9.4	11.25	11.00
68	20	9.2	8.8	8.5	7.6	9.16	8.97
86	30	7.6	7.4	7.1	6.4	7.57	7.40

TABLA 7-3

## CRITERIOS DE TIEMPO DE RETENCION

(38)

## 1) ELIMINACION DE FIERRO:

AGUA CRUDA		FIERRO EN AGUA AERADA Y FILTRADA (ppm)			
PH	FIERRO (ppm)	15 min	30 min	60 min	
5.00	10.0	9.0	--	7.5	
5.50	10.0	5.5	4.6	4.0	
5.95	10.0	5.0	4.0	3.5	
6.15	10.0	4.4	3.5	2.5	
6.50	10.0	2.8	1.8	0.3	
6.65	10.0	0.7	0.2	0.1	
6.80	10.0	0.2	0.1	0.1	
7.00	10.0	0.1	0.1	0.1	
7.45	10.0	0.1	0.1	0.1	
8.05	10.0	0.1	0.1	0.1	

## 2) ELIMINACION MANGANESO:

AGUA CRUDA		MANGANESO EN AGUA AERADA Y FILTRADA (ppm)			
PH	MANGANESO (ppm)	15 min	30 min	60 min	
8.5	10.0	-	-	10.0	
9.0	10.0	-	-	9.0	
9.3	10.0	8.5	8.0	7.5	
9.5	10.0	7.5	5.0	3.2	
9.7	10.0	3.0	1.3	0.9	
9.95	10.0	0.9	0.7	0.06	
10.3	10.0	0.02	0.02	0.02	

### 8.1 ADSORCION

La adsorción es la adhesión física de moléculas o coloides a las superficies de un sólido, un adsorbente, sin que se lleve a cabo una reacción química. En algunos aspectos, la adsorción es semejante a la coagulación y a la floculación. Un aspecto distinto es que la adsorción usa en general un sólido adsorbente procesado especialmente para el tratamiento del agua; en la coagulación y la floculación, el adsorbente es producido en el lugar por la reacción química con el agua, tal como el alumbre

### 8.2 COLOIDES

En aguas dulces típicas, el grueso de los constituyentes en una muestra filtrada lo forman los minerales disueltos. Sin embargo, hay cantidades apreciables de materiales no iónicos en forma de coloides. Entre ellos se encuentran sílice, óxidos metálicos insolubles y compuestos orgánicos, como son las sustancias que producen el color, el sabor y el olor.

Los coloides son clasificados en hidrofóbicos e hidrofílicos, reteniéndose los primeros al ser humedecidos por el agua; los segundos son fuertemente atraídos por el agua y, por lo tanto, difíciles de ser adsorbidos. Por ejemplo, los materiales polares como el azúcar y el alcohol no son adsorbidos por el carbón activado.

### 8.3 POLVO O GRANULOS

Los adsorbentes pueden ser materiales en forma de polvo fino, aplicado al agua en un clarificador o antes del filtro, o gránulos de 0.5 a 1.0 mm contenidos en un recipiente semejante a un filtro a presión. El adsorbente más común es el carbón activado, que se utiliza en forma de polvo o gránulos. Otros adsorbentes incluyen diversas arcillas, óxidos de magnesio, carbón de hueso y alúmina activa-

da. También se emplean resinas especiales de intercambio de iones.

Puesto que la adsorción es una reacción de superficie, una medida de la efectividad del adsorbente es el área de la superficie. Para el carbón, el área total de la superficie es de 600 a 1 000 m<sup>2</sup> por gramo. Esta superficie está cargada negativamente. A pesar de esto, la carga negativa de la mayor parte de los coloides en agua no inhiben la adsorción de materiales de peso molecular elevado, puesto que la misma estructura molecular es el factor que controla a medida que aumenta el peso. Los adsorbentes son porosos, y es importante el tamaño de los poros.

#### 8.4 CONTROL DEL SABOR Y DEL OLOR

Algunos sabores y olores son producidos por los constituyentes minerales del agua. Como ejemplo puede mencionarse el sabor salado que se manifiesta cuando los cloruros se hallan presentes por lo menos a 500 mg/l, y el olor a "huevo podrido" producido por el sulfuro de hidrógeno en algunas aguas de pozo. Sin embargo, los sabores y olores que más se rechazan en el agua potable son causados por la actividad biológica. Muchas especies de algas, diatomeas y actinomicetos generan subproductos orgánicos, como los aceites volátiles. La liberación de estos materiales en el agua, en particular cuando mueren grandes poblaciones de organismos, producen olores y sabores desagradables. Los aceites liberados son coloides negativamente cargados. Por lo común, estos efectos son estacionales. Son controlados mediante la adición de carbón activado en polvo, ya sea en el recipiente de coagulación o inmediatamente antes de los filtros en una planta de agua municipal típica. Si el abastecimiento de agua contiene cantidades considerables de materia orgánica, la planta puede necesitar precloración; ya que el cloro oxida al carbón activado, debe tenerse especial cuidado en la selección del mejor pun-



to para la aplicación del carbón. En estos casos lo mejor es aplicar el carbón activado en un punto anterior al de la cloración, dejando, si es posible, de 10 a 15 minutos para que la adsorción se efectúe. Si se aplica antes de los filtros, ya que el carbón está dividido muy finamente, es importante que los filtros se encuentren en buen estado, de manera que el carbón no pueda pasar al efluente. Esta aplicación final del carbón antes de los filtros puede remover el cloro residual, de manera que podría requerirse una cloración final después de los filtros. La dosificación del carbón puede llegar a 50 mg/l si se aplica antes de la clarificación; no debe exceder 5 mg/l si se aplica antes de los filtros.

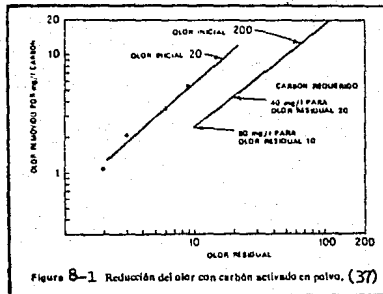
#### 8.5 REMOCION DE LA MATERIA ORGANICA

Si el alto contenido de materia orgánica en el agua, y relativamente constante a través del año, resulta más económico instalar filtros de presión que contengan carbón granular o resina que aplicar continuamente las elevadas dosis de carbón en polvo necesarias para lograr iguales propósitos. El carbón granular típico es alrededor de 8 a 30 mallas, y tiene un tamaño efectivo de 0.9 mm y un coeficiente de uniformidad de 1.8.

El lecho empacado de adsorbente puede recuperarse. Si el material orgánico es volátil, el lecho de carbón puede ser regenerado por un tratamiento al vapor. Sin embargo, es más convencional remover el carbón y volver a procesar el material en un horno. En instalaciones grandes, el horno se instala como parte de la instalación del carbón; en instalaciones más pequeñas, puede desecharse el carbón, o ser removido y devuelto al fabricante para que lo vuelva a procesar.

Ya que las reacciones de adsorción son relativamente lentas, sobre todo en agua fría, los lechos empacados se operan por lo común con flujos más bajos que los filtros y los sistemas de intercambio de iones, de ordinario por debajo de 2 gpm por pie<sup>3</sup>. Es común que la profundidad de los lechos sea mayor de cuatro pies, y el tiempo de retención en el lecho fluctúa entre 10 y 30 minutos.

El filtro de carbón es ideal para remover sabores, olores y para el desclorado. A menudo es más práctico reemplazar el lecho de carbón con material nuevo que regenerarlo. Los filtros de carbón son retrolavados cuando se necesitan, aunque rara vez se practica la regeneración porque es desfavorable económicamente. El agotamiento del carbón puede determinarse midiendo la materia orgánica en el agua tratada.

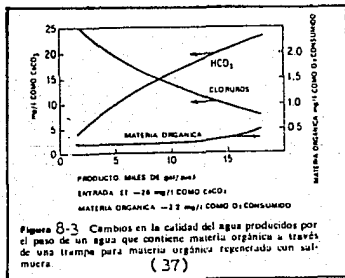
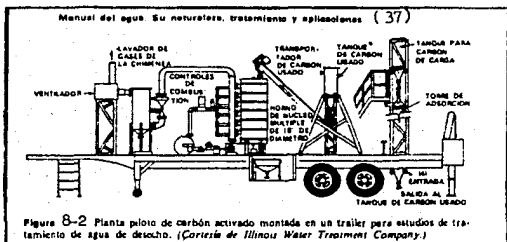


**TABLA 8-1 Fuentes de olores y olores (37)**

Causa	Porcentaje de casos	Tratamiento, % de las plantas informadoras		
		Carbón	Cloración	Aeración
Algas*	87	82	15.5	2.5
Vegetación en putrefacción	67	85	15.8	1.2
Resechos industriales	58	61	55.7	5.3
Otros	25	85	15.2	1.8

\*Frecuencia de ocurrencia:  
*Diatomeas:* Achnanthes, Sirastrum  
*Prasinofitas:* Sirastrum, Desulfobryum  
*Cianofitas:* Anabaena, Aphanizomenon  
*Clorofitas:* Volvox, Staurastrum  
*Hoagos:* Crenotrix

FUENTE: Sigworth, E. A.: Control of Odor and Taste in Water Supplies, JAWWA, Vol. 9, No. 12, Diciembre 1957, pág. 1507.



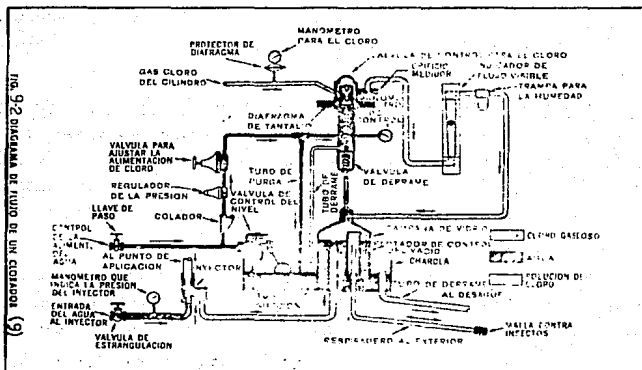
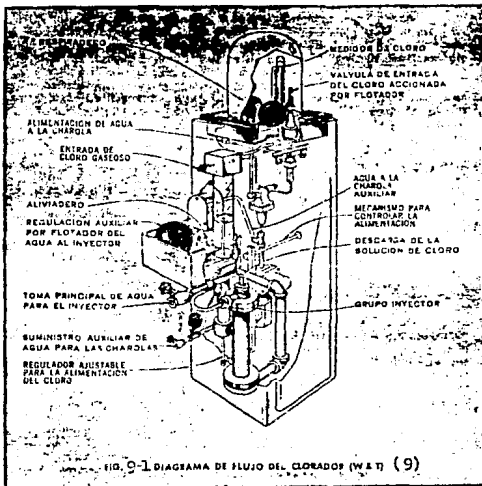
## 9.1 CLORACION

La cloración de los abastecimientos públicos de agua representa el proceso más importante usado en la obtención de agua de calidad sanitaria adecuada. El proceso será tan efectivo como lo sea el abastecimiento de cloro continuamente, y en una cantidad proporcional al gasto, para que produzca una desinfección eficaz. La desinfección significa una disminución en la población de bacterias hasta una concentración inocua, en contraste con la esterilización en la cual se efectúa una destrucción total de la población bacteriana. Por lo tanto, debe prestarse primordial atención a la cuidadosa selección y operación del equipo clorador.

Aunque en el pasado se han ensayado otros desinfectantes, que en muy pocas ocasiones se usan hoy día, se han obtenido los mejores resultados con el uso del cloro, ya que en forma de gas o de alguno de los diversos compuestos que lo contienen, como el cloruro de cal, el hipoclorito de sodio, etc. En todos los casos el cloro es el desinfectante activo. Debido a su costo, confiabilidad, eficiencia y facilidad de manejo, el cloro es el que prácticamente se usa siempre. Debe mencionarse que el término "cloración" se usa generalmente como sinónimo de desinfección, en la práctica de trabajos de abastecimiento de agua.

El cloro puede aplicarse como gas o como solución, ya sea solo o junto con otras sustancias químicas. Independientemente de su forma de aplicación, la cantidad o dosificación se regula mediante aparatos especiales llamados cloradores, o, en su caso, hipocloradores. La selección del equipo depende, desde luego, de cada instalación en particular.

En condiciones normales de presión y temperatura, el cloro es un gas. Sin embargo, puede comprimirse fácilmente hasta un punto en que se licúa. Este hecho se aprovecha por sus evidentes ventajas,



pues el cloro puede adquirirse y transportarse en recipientes de acero.

Esencialmente, los cloradores consisten en diversas combinaciones de válvulas de reducción de presión que funcionan por medio de diafragmas mecánicos, o flotadores operando hidráulicamente, orificios u otro tipo de medidores, para medir el gasto del cloro gaseoso después de que se ha reducido a una presión uniformemente baja, y dispositivos para hacer una solución acuosa del gas e inyectar esta solución al agua que se vaya a tratar. El tipo descrito es el de uso más general y comúnmente se conoce como clorador de solución.

## 9.2 HIPOCLORACION

Otros compuestos de cloro, como el hipoclorito de sodio o de calcio, tienen también propiedades desinfectantes. Estos hipocloritos se agregan usualmente en forma de solución al agua que se va a tratar, aunque se han desinfectado pozos, tanques, cisternas, líneas de tubería, etc., agregando directamente al agua la cantidad de polvo deseada.

La solución de hipoclorito de sodio se expande bajo diferentes denominaciones comerciales o marcas y puede adquirirse en la mayoría de las ciudades. Estas soluciones varían en concentración desde el 3 hasta el 15 por ciento de cloro disponible, en peso, y son razonablemente estables cuando se guardan en lugares frescos y oscuros.

El hipoclorito de calcio, conocido también como cloruro de cal, también es usado. Como este compuesto es relativamente inestable, puede adquirirse en cortas cantidades conforme se vaya necesitando. Por lo general el producto químico disponible en el comercio contiene de 25 a 37 por ciento de cloro disponible en peso, consistiendo el resto de material inerte. Existen algunos productos disponibles en el comercio de hipoclorito de calcio, tales como HTH, PBR-

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CLORON, CCH, entre otras, que contienen de 65 a 75 por ciento de cloro, en peso. Estos productos son más estables que el cloruro de cal y se deterioran menos rápidamente durante el almacenamiento. Sin embargo, su costo es relativamente mayor.

Aunque una solución de hipoclorito puede agregarse a un abastecimiento de agua mediante dispositivos improvisados, el tipo que se usa más comúnmente es una bomba de diafragma para soluciones, hecha por cualquiera de las empresas que las manufacturan. Hay otros dispositivos disponibles, tales como los tanques de presión en los que se almacenan la solución de hipoclorito, la cual es forzada a salir mediante el bombeo de agua, aire o un aceite inerte. Sin embargo, este último tipo no suele usarse en los trabajos de tratamiento de agua.

### 9.3 LA PRACTICA DE LA CLORACION

Las aguas naturales están formadas de soluciones complejas de muchas sustancias, la mayoría de las cuales pueden ignorarse, pero alguna de ellas influyen sobre la cloración en forma decisiva. Tales sustancias son:

1. Los sólidos suspendidos, los cuales pueden poner una barrera a las bacterias protegiéndolas de la acción destructora del cloro.
2. La materia orgánica, la cual reacciona con el cloro de tal modo que le quita sus propiedades desinfectantes.
3. El amoníaco, que reacciona con el cloro libre para formar un compuesto de cloro y que tiene cualidades desinfectantes, menos eficaces que las del cloro libre mismo.
4. La reacción del agua, indicada por el valor de su pH. Las aguas de baja alcalinidad y pH son más fácilmente desinfectadas; por ejemplo, aguas con un pH menor de 7.2, en comparación con las que tienen un pH mayor de 7.6.



5. Los nitritos, reaccionan con el cloro libre y lo eliminan, y que además pueden producir un color falso cuando se hace la prueba de la ortotolidina (OT)
6. El manganeso, que produce un color falso cuando se usa la prueba de la ortotolidina (OT).
7. El hierro, que cuando está presenta en concentraciones de 1 mg/l o más, causa un error de lectura cuando se usa la prueba de la ortotolidina. El hierro y el manganeso, cuando está en su forma reducida, reaccionan también con el cloro y por lo tanto debe agregarse una cantidad adicional de cloro a la requerida para la desinfección.

La rapidez de la desinfección con el cloro es proporcional a la temperatura del agua, de manera que, suponiendo los otros factores iguales, la cloración es más eficaz a altas temperaturas del agua. Por otro lado, el cloro es más estable en agua fría y permanecerá mayor tiempo en ella. Hasta cierto grado, esto compensa la menor velocidad de desinfección en agua fría.

El tiempo de que pueda disponerse para que el cloro actúe sobre los constituyentes del agua es uno de los aspectos más importantes en la práctica de la cloración. El tiempo mínimo de reacción debe ser de 10 a 15 minutos, pero sería preferible que se dejaran transcurrir varias horas para que se pudiese garantizar una desinfección efectiva sin que el agua llegase al consumidor con una concentración indeseable de cloro residual que podría ser inconveniente debido a la presencia de sabores y olores.

Si se quiere llevar a cabo con éxito una cloración, el cloro debe agregarse de manera que:

1. Se mezcle por igual y completamente con todas las proporciones del agua a tratar.
2. Sea continua.
3. Se aplique en cantidad suficiente para la clase de agua

que se esté tratando según las condiciones prevaletientes y para que se llegue a verificar el grado de tratamiento que se desee.

En el diseño de los sistemas de cloración se prevé el mezclado adecuado y la continuidad de la aplicación. La cantidad de "cloro suficiente" varía en los diferentes abastecimientos de agua.

#### 9.4 REACCIONES DEL CLORO EN EL AGUA

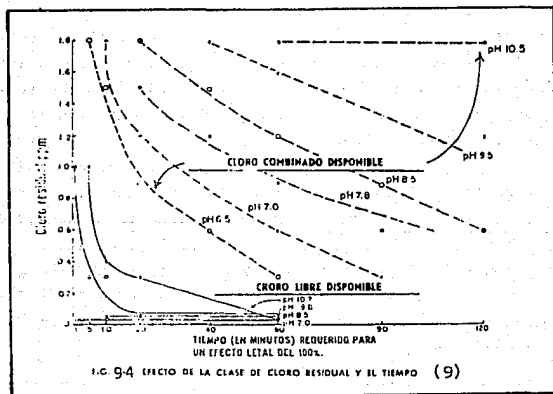
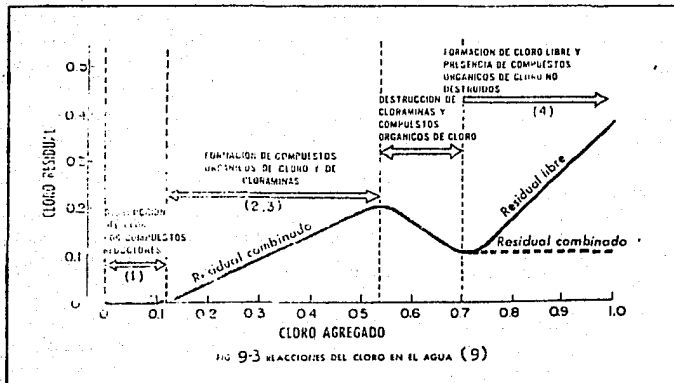
El cloro en el agua es un agente químico muy activo. Si una pequeña cantidad se agrega al agua, reaccionará con la gran cantidad de sustancias disueltas o suspendidas en ella, y entonces su poder como agente desinfectante quedará destruido. Por ejemplo, el cloro reaccionará rápidamente con el ácido sulfhídrico, lo cual da como resultado que no habrá desinfección; el manganeso y el hierro y los nitritos reaccionan en forma similar con el cloro y por ello no se lleva a cabo ninguna desinfección. Si se agrega la cantidad suficiente de cloro para que reaccione con estos compuestos, llamados compuestos reductores, entonces, un poco más de cloro que se agregue reaccionará con cualquier materia orgánica presente, para producir compuestos orgánicos de cloro, los cuales tienen poca o ninguna acción desinfectante y pueden causar sabores y olores. Si se agrega cloro en cantidad suficiente para que reaccione con todas las sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoníaco, un poco más de cloro que se agregue quedará como cloro residual libre disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo.

Cuantitativamente se define la demanda de cloro como la cantidad que se agrega, menos la cantidad que hay después del periodo de reacción seleccionado, generalmente de 10 minutos, según se mida con la prueba de la ortotolidina. La cantidad de cloro que permanece después del periodo de reacción, se define como cloro residual y se expresa en ppm. El cloro residual puede existir como compuestos clo-

rados de materia orgánica y amoníaco, en cuyo caso se conoce como "cloro residual combinado"; puede estar presente como cloro libre y en este caso se conoce como "cloro residual libre"; o puede estar al mismo tiempo como "combinado" y como "cloro residual libre" y en este caso se conoce como "cloro residual total". En consecuencia, "cloro suficiente" es la cantidad requerida para producir un residual deseado, ya sea combinado, libre o total, después de un periodo de contacto definido.

### 9.5 FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE LA DESINFECCION

1. Tiempo y concentración. Estos dos factores deben considerarse como mutuamente ligados, pues, por medio de ambos, se toma en consideración la duración del periodo de reacción disponible para la desinfección, así como la cantidad y clase de cloro residual.
2. Temperatura. La temperatura del agua afecta senciblemente la acción desinfectante del cloro residual. Para lograr la misma acción bactericida con una temperatura de 4.5°C, en comparación con la temperatura de 21°C, siendo iguales todos los demás factores, la concentración de cloro residual combinado debe ser más del doble de la concentración del cloro residual libre.
3. pH. El pH del agua afecta la acción desinfectante del cloro residual combinado. A un pH de 6.5 y una temperatura de 21°C, 0.3 mg/l de cloro residual combinado causan un efecto letal de 100 por ciento en las bacterias. A la misma temperatura, y un pH de 7.0 el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 mg/l, y a un pH de 8.5 debe aumentarse aún más, hasta 1.2 mg/l para lograr el mismo efecto letal sobre las bacterias.



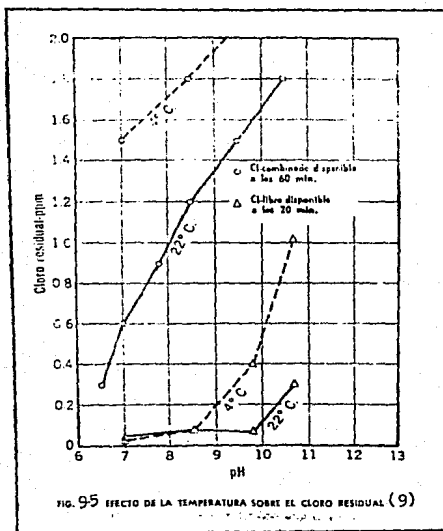


TABLA 9-1

Concentraciones mínimas recomendadas para el cloro residual libre en comparación con las de cloro residual combinado para asegurar una desinfección efectiva

Valor del pH	Concentración mínima de cloro residual LIBRE, en mg/lit con un período de desinfección de 10 minutos cuando menos	Concentración mínima de cloro residual COMBINADO, en mg/lit con un período de desinfección de 60 minutos cuando menos
6.0	0.2	1.0
7.0	0.2	1.5
8.0	0.4	1.8
9.0	0.8	No es practicable
10.0	0.8	No es practicable

## 10.1 COAGULACION

La coagulación se refiere a la formación de flóculos precipitados o incipientes mediante los cambios fisicoquímicos que tienen lugar entre el coagulante soluble y la alcalinidad del agua. Esto incrementa el tamaño de los sólidos suspendidos en el agua hasta un punto en que estos puedan sedimentarse.

El grado de coagulación es controlado por: (a) que tan frecuente el flóculo coalesce consigo mismo; (b) la tendencia de los flóculos a agruparse después de que coalescen. El primer paso es incrementado por una agitación, y la agrupación es incrementada por la adición de coagulantes.

El agua cruda turbia contiene materiales suspendidos, tanto sólidos que pueden asentarse como partículas lo bastante grandes que se asientan en reposo, ó sólidos dispersados que no se asientan con facilidad. Una parte considerable de éstos sólidos que no se asientan pueden ser coloides. Cada partícula se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas, como se repelen mutuamente dos polos magnéticos. Ya que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamados flóculos, las partículas no se asientan. La coagulación desestabiliza estos coloides al neutralizar las fuerzas que ~~estabilizan~~ ~~repelen~~. Esto se logra, ~~que~~ ~~de~~ general, añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado.

## 10.2 COAGULANTES

Los coagulantes más comúnmente usados son el sulfato de aluminio, sulfato férrico, y sulfato ferroso. Estos son ácidos por naturaleza y reaccionan con la alcalinidad natural o agregada al agua para producir sulfato de calcio, magnesio o sodio, y precipitado gelatinoso. Este precipitado consume hidróxido, pero actualmente es una forma compleja que varía en composición. La mayor parte de las

partículas coloidales de turbidez y color llevan una carga negativa, mientras que el hidróxido formado lleva una carga positiva. La neutralización de las partículas iónicas cargadas, así como también la conglomeración mecánica, se lleva a cabo en la coagulación por sales de aluminio y fierro.

Para cada coagulante hay una zona de pH óptima para la mejor coagulación. Es deseable controlar el pH en un punto de máxima precipitación de coagulante, equivalente a la mínima solubilidad del floculo. El mejor pH para la precipitación depende no sólo del coagulante, sino también de las características minerales del agua. Por ejemplo, el hidróxido de aluminio coagulara mejor a un pH entre 5.5 para aguas destiladas. Sin embargo para la mayoría de las aguas naturales el pH ideal es más alto y puede estar entre un rango de 5.7 a 7.8. El rango para el coagulante de fierro es usualmente arriba de un pH de 8.4.

Cuando las sales de aluminio o fierro son agregadas al agua éstas disminuyen el pH. Por lo tanto es necesario elevar el pH a un nivel óptimo introduciendo un álcali, tal como la cal hidratada (hidróxido de calcio), carbonato de sodio o hidróxido de sodio.

La temperatura del agua también afecta el proceso de coagulación, y la temperatura cerca del punto de congelación incrementa el tiempo de mezclado así como también se requiere incrementar la dosificación de coagulante. En general una coagulación exitosa involucra tres factores importantes:

1. La presencia de una cantidad mínima de los iones aluminio y fierro para formar un floculo insoluble.
2. La presencia de aniones fuertes tales como el sulfato y el cloruro.
3. El control del pH dentro de un rango definido.

No es posible predecir de un análisis de agua a tratar cual será el mejor coagulante a usar, las cantidades requeridas, o el pH óptimo para controlar el proceso. Para la mejor coagulación, es necesario que se hagan pruebas de laboratorio con diferentes coagulantes a diferentes concentraciones y diferentes niveles de pH. Teniendo algunas experiencias prácticas previas con agua cruda dada ayuda a seleccionar las dosificaciones de coagulantes y los pH óptimos, para asegurar una consistencia a los resultados requeridos. Además es necesario variar las dosificaciones del coagulante y el control del pH, para compensar las variaciones en las características del agua a diferentes épocas del año, si el suministro de agua es superficial.

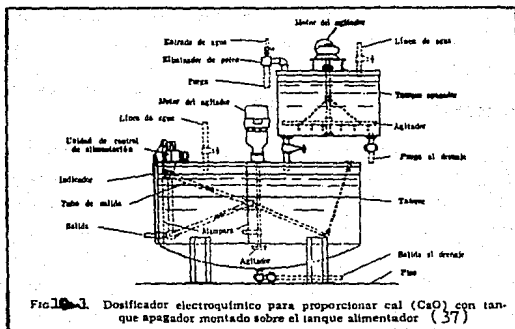
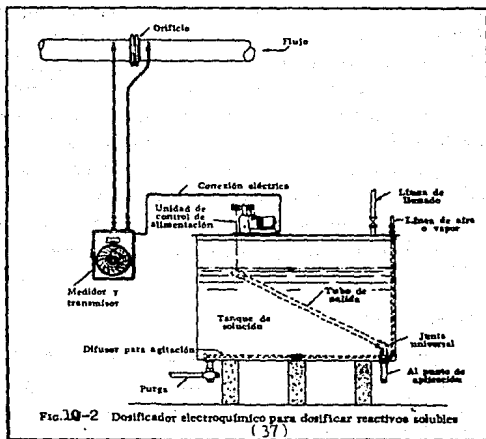
#### 10.2.1 SULFATO DE ALUMINIO

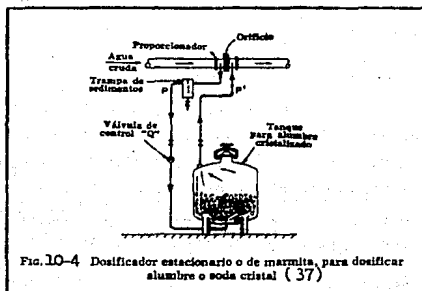
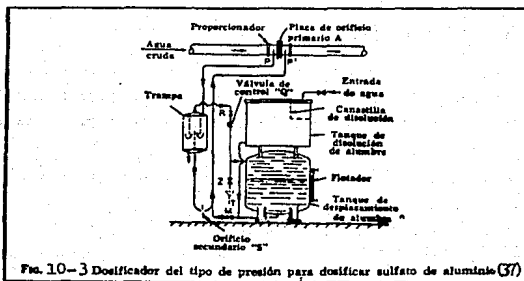
Este tipo de coagulante es el de uso más amplio,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ . En la coagulación del agua no es necesario contar con esta sustancia libre de hierro. Se dispone en forma ácida y básica con contenido de  $Al_2O_3$  de 14.5 a 17.5 %. Se puede comprar en forma granular, cristales, polvo o solución. Al disolver las formas sólidas se recomienda contar con agitación mecánica. Este reactivo se puede dosificar con dosificadores en seco, electroquímicos, de gravedad por orificio, de presión, etc.

#### 10.2.2 SULFATO FÉRRICO. $Fe_2(SO_4)_3$

Se conocen dos formas comerciales, "Ferrisul" y "Ferrifloc", difieren los grados de este producto en su contenido de sulfato férrico que generalmente varía de 70 a 90 %. Algunos tipos tienen cantidades apreciables de sulfato de aluminio. En el mercado se encuentran en forma granular. El sulfato férrico es muy soluble y sus soluciones se preparan fácilmente por agitación con dos partes de agua y una parte de sulfato. La solución concentrada se diluye a la can-







tividad deseada. Las soluciones diluidas se hidrolizan a hidróxido férrico. El pH óptimo para la coagulación debe determinarse por experimentos en el laboratorio.

### 10.2.3 SULFATO FERROSO. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Comúnmente se conoce como coperas. En el mercado se encuentra en forma granular o formando cristales, es fácilmente soluble en agua. Reacciona con la alcalinidad para formar hidróxido ferroso que tiene una solubilidad de 4 ppm como Fe que es muy alta. Debe por lo tanto, oxidarse a la forma férrica  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , que tiene una solubilidad despreciable (menos de 0.01 ppm). A valores de pH arriba de 7, esta oxidación debe llevarse a efecto aereando el agua, o por clorinación a valores de pH mucho más bajos. Teóricamente, cada parte por millón de sulfato ferroso añadido, requiere solamente 0.03 ppm de oxígeno para oxidarse. De manera que si un agua superficial contiene únicamente 6 ppm de oxígeno disuelto, contendrá cerca del doble de la cantidad teórica necesaria para oxidar 104 ppm de sulfato ferroso, siempre que el pH sea alto.

### 10.2.4 COPERAS CLORINADAS

Cuando el ion ferroso de sulfato ferroso se oxida con cloro hasta ion férrico, el tratamiento se llama "clorinación de coperas", la fórmula de esta sustancia química puede ser  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{Cl}_2$ . Sin embargo, en el tratamiento del agua, tanto el sulfato como el cloro se alimentan separadamente. Teóricamente, cada ppm de sulfato ferroso requiere 0.126 ppm de cloro para oxidarse.

### 10.2.5 ALUMINATO DE SODIO

El aluminato de sodio  $-\text{NaAlO}_2$  difiere de los anteriormente descritos, en que tiene carácter alcalino en sus reacciones. Cuando se usa para coagular aguas turbias o coloreadas, usualmente se dosi-

fica junto con sulfato de aluminio. También reaccionan con el  $\text{CO}_2$  libre.

### 10.2.6 ALUMBRE DE POTASIO Y ALUMBRE DE AMONIO

Estos dos coagulantes, ya sea en forma cristalina o en forma de grumos, son los únicos que se pueden usar en los alimentadores de tipo presión de solución. Las fórmulas para estos compuestos son:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ .

### 10.3 AYUDAS PARA LA FLOCULACION

Algunas sustancias se emplean para mejorar las características de los coagulantes ya mencionados, favoreciendo la formación de flóculos más grandes y pesados ayudan a eliminar color, sólidos suspendidos y materia orgánica. Los materiales que se emplean con este propósito pueden ser clasificados como (1) arcillas, (2) sílice activada y (3) pelielectrólitos.

#### 10.3.1 ARCILLAS

Algunas arcillas son muy empleadas como ayuda de la coagulación en la eliminación de color de aguas altamente coloreadas.

El efecto de estas arcillas se describe comúnmente como "acción de peso", esto es, con aguas altas en color pero con muy baja turbidez, el flóculo formado por coagulación consta principalmente de materia orgánica, siendo por esto, demasiado liviano y no se asienta rápidamente; la adición de arcilla aumenta el peso del flóculo, es decir, le da "peso" y se asienta rápidamente. Además de este factor, existe otro, que es la capacidad de absorción de la arcilla. De cualquier forma, se ha encontrado en la práctica que la adición de pequeñas cantidades de arcilla promueve la formación de flóculos que se asientan más fácilmente, cuando se usan junto con coagulantes de aluminio o hierro. Estas arcillas también amplían el

rango del pH en el que la coagulación puede efectuarse. La dosificación requerida para un agua dada debe determinarse de tiempo en tiempo, en el laboratorio, la dosis usual es de 17 a 51 ppm.

### 10.3.2 SILICE ACTIVADA

La sílice activada es una ayuda de coagulación muy efectiva para la eliminación de turbidez, color, materia orgánica u otros suspensiones. La dosis de sílice activada se puede determinar fácilmente en el laboratorio. En general, cuando se emplea junto con un coagulante común, la dosis varía de 1 a 5 ppm. La dosis en los sistemas cal sodada en frío como coagulante es de 2.5 a 4 ppm.

### 10.3.3 POLIELECTROLITOS

Este término se ha adjudicado a ciertos complejos orgánicos de origen natural o sintético, que se emplea como ayuda de la coagulación, ya sea en unión de los coagulantes usuales o en ciertas aplicaciones, solos, como coagulantes. Además, estos materiales se pueden clasificar como catiónicos, aniónicos o no iónicos. Hay algunos que han sido certificados como no tóxicos y pueden emplearse en la coagulación de agua para usos municipales.

El mejoramiento de la formación del floculo, asentamiento y clarificación que se puede efectuar con el uso de estos polielectrolitos, es a menudo sorprendente. La dosificación y el polielectrolito adecuado deben determinarse por pruebas en el laboratorio.

Respecto a la dosis, ésta varía con diferentes aguas y aplicaciones, pero en general, cuando se usa como ayuda para la clarificación en aguas naturales, la dosis es de 0.5 a 1 ppm, reduce la dosis de coagulante y hace al pH menos crítico. Cuando se usa como coagulante en los sistemas en frío, la dosis será de 1 a 2 ppm. En aguas de desperdicio varía de 0.5 a más.

## 10.4 CALCULOS DE LAS DOSIFICACIONES DE REACTIVOS

1. Cuando se va a tratar aguas con turbidez y bajo contenido de color, en la práctica de tratamiento de agua, siempre se parte de la base teórica de dosificar una cantidad mínima de coagulante tal como sulfato de aluminio o sulfato férrico.
2. Si con la dosificación mínima de sulfato de aluminio el cual es de carácter ácido el pH del agua es mayor que 6.8 será necesario dosificar más sulfato de aluminio hasta alcanzar el pH deseado. Si por el contrario con la dosificación mínima de sulfato de aluminio el pH está por debajo de 6.8 será necesario dosificar un álcali para elevar el pH hasta un valor de 6.8.

TABLA 10-1

CAMBIOS EN EL ANALISIS DE AGUA (en p.p.m.) CAUSADO POR LA ADICION DE (p.p.m.) DE COAGULANTES  
(38)

CAMBIO EN EL ANALISIS QUIMICO	Reducción en	Incremento en	Reducción en	Incremento en	Incremento	Incremento	Incremento
	alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> como CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> como CO <sub>2</sub>	en SO <sub>4</sub> como CaCO <sub>3</sub>	en Cl como CaCO <sub>3</sub>	en dureza como CaCO <sub>3</sub>
Sulfato de Aluminio (Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 4 H <sub>2</sub> O)	0.45	-	-	0.4	0.45	-	-
Sulfato Ferroso (FeSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O)	0.36	-	-	0.31	0.36	-	-
Sulfato Férrico (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 7 H <sub>2</sub> O)	0.75	-	-	0.61	0.75	-	-
Cloro (Cl)	1.40	-	-	1.30	-	1.40	-
Cal Hidratada 93% (Ca(OH) <sub>2</sub> )	-	1.26	1.11	-	-	-	1.26
Acido Sulfúrico 93% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.95	-	-	0.84	0.95	-	-

ALCALI (1 ppm)		INCREMENTO ALCALINIDAD (CaCO <sub>3</sub> )	INCREMENTO CALCIO (ppm CaCO <sub>3</sub> )	REDUCCION CO <sub>2</sub> (ppm CO <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>
Soda ash	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.94	-	0.41
Sosa caustica	NaOH	1.23	-	1.08
Cal-hidratada (93%)	Ca(OH) <sub>2</sub>	1.26	1.26	1.11
Cal-viva (90%)	CaO	1.61	1.61	1.41
ACIDOS (1 ppm)		REDUCCION ALCALINIDAD (ppm CaCO <sub>3</sub> )	INCREMENTO SULFATO (ppm CaCO <sub>3</sub> )	INCREMENTO DE CO <sub>2</sub> (ppm CO <sub>2</sub> )
Acido sulfurico (90%)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.00	1.00	0.88
Acido sulfurico (66% "84)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.95	0.95	0.84
Acido sulfurico (60% "84)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.79	0.79	0.70

TABLA 10-2  
(38)

COAGULANTES MAS COMUNES EN FUNCION DEL pH

pH	COAGULANTE
5.5 - 8	Alumina, coagulantes sintaticos
8 - 11	Sulfato ferrico, sulfato ferroso
5 - 6	Sulfato ferrico

TABLA 10-3  
(38)

CARACTERISTICAS DE LOS ADITIVOS QUIMICOS ACIDOS COMUNMENTE UTILIZADOS EN TRATAMIENTO DE AGUA PRIMARIA (COAGULACION)

ADITIVO QUIMICO	ESPECIFICACION	FORMULA	P.M.	PUREZA %	CAMBIO EN CATIONES Y ANIONES (como ppm CaCO <sub>3</sub> )	
					AUMENTO	DISTRIBUCION DE ALCALINIDAD
Sulfato de aluminio	15.3% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 18H <sub>2</sub> O	666	95-99%	Sulfato 0.46	0.45
Alumina de Amonia	-	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 24H <sub>2</sub> O	906	-	Sulfato 0.44	0.33
Alumina de potasio	-	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 24H <sub>2</sub> O	949	-	Sulfato 0.421	0.316
Ferrisol	25.2% Fe <sup>3+</sup>	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	400	94.4%	Sulfato 0.105	0.710
		FeSO <sub>4</sub>	152	0.4%		
Ferrifloc	20.5% Fe <sup>3+</sup> 0.42% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	400	73.4%	Sulfato 0.57	0.47
		FeSO <sub>4</sub>	152	2.04%		
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98	0.42%		
Aciljes (Cu)	19.60% Fe	Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 7H <sub>2</sub> O	278	98%	Sulfato 0.35	0.35
Cloruros	39.62% Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	71	100%	Cloruro 1.41	1.41
Aciljes Clorinados	-	8FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	-	-	Sulfato 0.31	0.47
		+ 1Cl <sub>2</sub> por peso	-	-	Cloruro 0.15	
Cloruro ferrico	60% FeCl <sub>3</sub>	FeCl <sub>3</sub>	162	60%	Cloruro 0.56	0.56



TABLA 10.4 DATOS DE PRODUCTOS QUIMICOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA. (37)

Nombre (Químico, Registrado, Común), Fórmula, Pesa Molecular	Grados usados en el tratamiento de agua	Envases	Densidad (kg/l)	Espesor, mm (mm)	Solubilidad (partes por 100 partes de agua)			
					0°C	10°C	30°C	50°C
Alumbre (alumbre de amonio) $Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$ —208	Cristales o nódulos	Sacos, cajas o berriles	84.88	.80-.83	8.8	8.8	12.1	26.0
Alumbre de potasio $Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O$ —240	Cristales o nódulos	Sacos, cajas o berriles	84.88	.80-.83	2.7	7.6	11.4	16.6
Acido fosfórico $H_3PO_4$ —98	Líquido 75%	Carrambones, carratambones	98.3		Miscible con agua			
Acido sulfúrico $H_2SO_4$ —98.1	Líquido 98%	Carrambones, carratambones	114.8		Miscible con agua en todas proporciones			
Amoníaco $NH_3$ —17.0	Gas licuado	Cilindros de acero de 22.86 o 45.70 cm	117	31 x 125 cm 22 x 140 cm	47.3	60.8	34.8	88.1
Arcillas	Pulvo	Sacos, a granel	20-80	.9 - 1.7	Insoluble			
Bicarbonato de sodio $NaHCO_3$ —84	Pulvo 99%	Sacos	89.82	.86-1.0	6.8	7.8	8.8	10.0
Bisulfito de sodio $NaHSO_3$ —130	Gránulos	Sacos	84.83	.80-.78				
Cal Clorada (cloruro de calcio) $Ca(OCl)_2 + CaCl_2 \cdot 2H_2O$	Pulvo 35% cloro	Tarabores, latas			Muy soluble			
Cal dolomítica $CaO + MgO$ $MgO$ varia	Gránulos o pulvo: 88% $CaO$ y 40% $MgO$	Sacos, a granel	30-88 30-78	.83-1.3 .98-1.34	Se pasa con agua para formar $Ca(OH)_2 + MgO$			
Cal dolomítica (hidratada) $Ca(OH)_2 + MgO$	Pulvo, 82% $Ca(OH)_2$ y 25% $MgO$	Sacos, a granel	58-73	1.8-2.2				
Carbón activado	Pulvo y gránulos	Sacos	13-20 13-20	2.1-4.0 2.0-3.0	Insoluble			
Carbonato de sodio (blanco fino) $Na_2CO_3$ —106	Pulvo	Sacos, a granel	85.72	.78-1.1	0.008	0.008	0.008	

TABLA 10-4 DATOS DE PRODUCTOS QUIMICOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA.

Nombre (Químico, Registrado, Común), Fórmula, Peso Molecular	Grados usados en el tratamiento de agua	Envases	Densidad lb/pla'	Espacio requerido gal/ton	Solubilidad (partes por 100 partes de agua)
Carbonato de calcio (calcita), $CaCO_3$ -100	Polve, pedruzcos	Sacos, a granel	Polve: 149.7 Granel: 150-111	.86-1.2 .9-.9	0.8013
Carbonato de sodio (soda ash), $Na_2CO_3$ -106	Polve: 52% $Na_2O$	Sacos	94-98	1.2-1.2	7.0 12.5 31.5 32.8
Carbonato de sodio (hidratado), $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ -286	Gránulos o cristales	Sacos	80-70	.9-1.2	33.7 36.8 36.0 36.3
Cloro $Cl_2$ -70.9	Gas licuado	Cilindros como 66 y 908 lb	1800 250	25 X 156 cm 70 X 908 cm	1.46 0.908 0.716 0.802
Cloruro de calcio $CaCl_2$ -111	Mezclas: 75% sólido; 25% líquido; 42%	Empaques impermeables	80-80	.87-.94	29.5 28.0 74.5 102.0
Hidruro de sodio $SO_2$ -64.1	Gas licuado	Cilindros de acero	1800 250	21 X 156 cm 70 X 908 cm	12.8 16.2 11.3 7.8
Fosfato sódico $Na_2HPO_4$ -142 $Na_2H_2P_2O_7$ -136-354		Sacos	42-42 42-42	.86-1.2 1.2-1.3	1.7 2.6 7.7 20.2 4.2 2.8 14.3 22.4
Fosfato sódico $NaH_2PO_4$ -120 $NaH_2P_2O_7 \cdot H_2O$ -134		Tambores	22-72	.9-1.1	27.0 22.0 24.5 107 24.2 20.4 22.5 102
Fosfato sódico $Na_2PO_4$ -162 $Na_5P_3O_{10}$ -380		Latas	22-22 22-22	.86-1.1	1.7 4.8 12.3 22.2 3.5 2.5 21.2 22.4
Hidruro de calcio (cal hidratada), $Ca(OH)_2$ -74.1	Polve 85%	Sacos	26-20	1.2-2.4	0.18 0.17 0.36 0.18
Hidruro de sodio (soda cáustica), $NaOH$ -40	Mezclas: sólido; líquido; 45% $Na_2O$	Tambores Tambores Tambores	22 lb 44 lb 260 lb		42.0 21.2 220 112
Hipoclorito de calcio	Polve	Latas y tambores			Muy soluble
Metafosfato sódico $Na_5P_3O_{10}$ -380		Mezclas, Polve	17-17 22-22	1.1-1.2 1.2-1.2	Muy soluble
Oxido de calcio (cal viva), $CaO$ -56.1	Trenos, polve, gránulos	Sacos, a granel	22-22 20-70	.83-1.2 .83-1.2	Se agota con agua para formar hidruro de cal
Oxido de magnesio $MgO$ -40.3	Polve	Sacos	5-20	1.5-7.5	Poco soluble

TABLA 10-4 DATOS DE PRODUCTOS QUIMICOS USADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Nombre (Químico, Registrado, Común), Fórmula, Peso Molecular	Grados usados en el tratamiento de agua	Envases	Densidad lb/gal	Espesor comercial M/100	Solubilidades (partes por 100 partes de agua)			
					0°C	10°C	20°C	30°C
Sulfato de sodio (vidrio soluble) $\text{Na}_2\text{SO}_4$	Solución 40° Bé	Tambores, carro- tanque	88.1		M soluble con agua			
Sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ —398 Grado comercial 148°C	Terrones, cristales, polvo	Sacos, barriles, a granel, solución	Terrones a granel, solución 87-87 Polvo: 38-48	.90 - 1.0	80.8	68.3	71.8	78.3
Sulfato de calcio (yeso) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ —172	Molido	Sacos	99-99	.90 - 1.3	0.18	0.19	0.20	0.21
Sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ —400	Gránulos, Composición de 78-80% sulfato	Sacos, barriles, tambores	80-70	.9 - 1.0	Muy soluble			
Sulfato de sodio (sal seca) $\text{Na}_2\text{SO}_4$ —142	Hojuelas, polvo, de 95-98%	Sacos, tambores	85-98	.83 - .7	8.0	9.0	12.4	40.8
Sulfato de sodio (sal de Glauber) $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ —324	Cristales	Sacos	88-83	.98 - 1.1	11.3	30.4	44.0	82.5
Sulfato de sodio $\text{Na}_2\text{SO}_4$ —142	Cristales Polvo	Sacos	80-81	.88 - .78	14.0	30.0	37.0	38.0
Sulfato ferrico (cometa) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ —278	Cristales, gránulos	Sacos	62-66	.9 - .86	88.7	37.5	48.5	88.2

## 11.1 FLOCULACION

La floculación consiste en agitar suavemente el agua tratada con coagulante, durante un periodo de tiempo apreciable, para completar las reacciones de coagulación, hasta alcanzar condiciones que permitan que el material floculento se junte y adhiera formando grandes masas. Además el material floculante deberá remover el color del agua que es de carácter coloidal.

## 11.2 TIPOS DE FLOCULADORES

La agitación suave, que es indispensable para la floculación, puede lograrse en forma hidráulica y/o mecánica. El grado óptimo de agitación depende de la temperatura y características del agua, así como, del tipo de coagulante usado y de otras condiciones. Los floculadores se pueden clasificar en:

I. Floculadores hidráulicos. Derivan su energía para la agitación de la masa líquida, de la carga de la velocidad que el fluido adquiere, al escurrir por un conducto. Puede ser de tabiques o de concreto. Los más comunes son los de flujo horizontal, los de flujo vertical, y, los de flujo helicoidal.

II. Floculadores mecánicos. Son aquellos que requieren una fuente de energía externa que mueva al agitador en un tanque ó una serie de tanques, en donde el agua permanece un periodo teórico de retención. Según el sentido del movimiento del agitador se clasifican en: (1) giratorios, y (2) reciprocantes.

1. Los giratorios pueden ser de baja velocidad de rotación (paletas) ó de alta velocidad de rotación (turbinas). Puede ser de eje horizontal o de eje vertical.

2. Los floculadores reciprocantes ya sean en parrillas de madera que suban alternativamente ó en sistemas oscilantes como cintas que van y vienen dentro del tanque.

## 102 FLOCULACION

### 11.3 CRITERIOS DE DISEÑO

El gradiente de velocidad (G) para la floculación es determinada por las ecuaciones desarrolladas por Camp y Stein (1943).

$$G = (Qpgh_1/uV)^{1/2} = (pgh_1/ut)^{1/2}$$

Estas ecuaciones son aplicables para la floculación hidráulica.

Para la floculación mecánica se tiene:

$$G = (P/(uV))^{1/2}$$

Donde:

G = gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ).

p = densidad del agua ( $Kg/m^3$ ).

$h_1$  = pérdida de carga (m).

u = viscosidad dinámica ( $Kg/m.s$ )

t = tiempo de retención,  $Q/V$ , (s).

Q = flujo ( $m^3/s$ ).

P = potencia,  $Qpgh$  (watts,  $Kg.m^2/s^3$ ).

V = unidad de volumen ( $m^3$ ).

g = constante gravitacional ( $9.81 m/s^2$ ).

### 11.4 FLOCULADORES HIDRAULICOS

La pérdida de carga en los floculadores hidráulicos es provocada por la turbulencia en la unidad. La potencia requerida es función de la pérdida de carga.

En los sistemas de floculación, el número total de colisiones de partículas, y la formación de flóculos es función del producto del gradiente de velocidad y el tiempo de retención,  $Gt$ .

## 11.4.1 FLOCULADORES DE CANALES

La floculación se lleva a cabo debido al flujo del agua a través de canales formados por baffles en posición horizontal o vertical. Estos sistemas están limitados para plantas cuya capacidad deberá ser menor a 10 000 m<sup>3</sup>/día.

La pérdida de carga ha sido aproximada por la siguiente ec.:

$$h = k(v^2/2g)$$

Donde:

h = pérdida de carga (m).

v = velocidad del fluido (m/s).

g = constante gravitacional (9.81 m/s<sup>2</sup>).

k = constante empírica (varía de 2.5 a 4).

El número de baffles necesarios para el equipo horizontal y vertical puede ser calculado con las siguientes ecuaciones:

$$n = (((2ut)/(p(1.44 + f)))(HLG)/Q)^2)^{1/3}$$

para unidades horizontales, y

$$n = (((2ut)/(p(1.44 + f)))(WLG)/Q)^2)^{1/3}$$

para unidades verticales,

Donde:

n = número de baffles en el estanque.

H = profundidad del agua en el estanque (m).

L = longitud del estanque (m).

G = gradiente de velocidad (s<sup>-1</sup>).

Q = rapidez de flujo (m<sup>3</sup>/s).

t = tiempo de floculación (s).

u = viscosidad dinámica (Kg/m.s).

p = densidad del agua (Kg/m<sup>3</sup>).

f = coeficiente de fricción en los baffles.

W = anchura del estanque (m).

La velocidad del agua en ambas unidades, de flujo horizontal y de flujo vertical, generalmente varía de 0.3 a 0.1 m/seg. El tiempo de retención varía de 15 a 30 min. Y los gradientes para ambos tipos de floculadores varían de 100 a  $10\text{ s}^{-1}$ .

TABLA 11-1. Criterios de diseño.

**1. FLUJO HORIZONTAL**

- a. La distancia entre baffles deberá ser menor de 45 cm, para permitir su limpieza.
- b. La profundidad del agua en el estanque no debe ser menor de 1 m.
- c. Se prefiere la construcción de baffles de madera.
- d. La distancia clara entre el final de cada baffle y la pared del estanque es aproximadamente de  $1\frac{1}{2}$  de la distancia entre baffles. No deberá ser menor de 60 cm.

**2. FLUJO VERTICAL**

- a. La distancia entre baffles deberá ser menor de 45 cm.
- b. La profundidad será de dos o tres tiempos la distancia entre baffles.
- c. Se prefiere la construcción de baffles de madera.
- d. La distancia clara entre la orilla superior del baffle y la superficie del agua, o la orilla inferior del baffle y el fondo del estanque, es aproximadamente de  $1\frac{1}{2}$  de la distancia entre baffles.

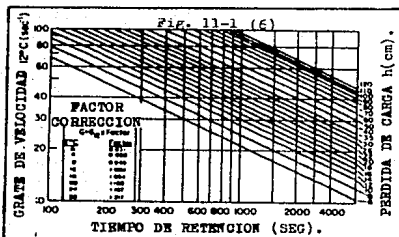


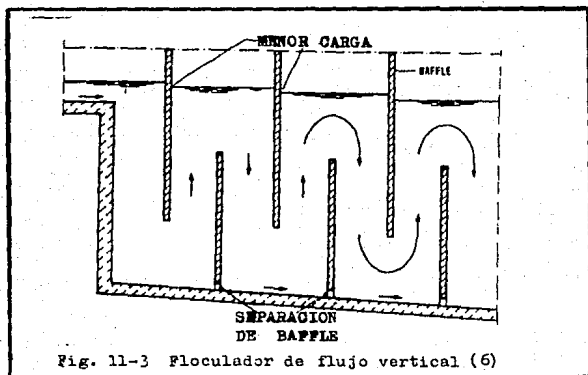
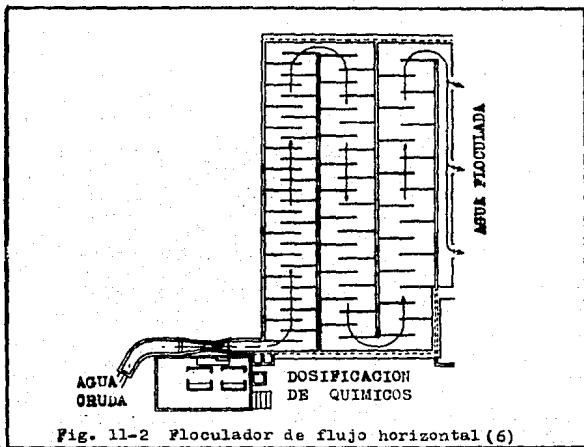
TABLA 11-1 (6)

Temperatura, °C	0	5	10	15	20	25	30
Densidad ( $\rho$ ) $\text{Kg}/\text{m}^3$	999.9	1000	999.7	999.1	998.2	997.1	995.7
Viscosidad dinámica ( $\mu$ ) $\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$	0.0179	0.0152	0.0131	0.0114	0.0101	0.0089	0.0080

Tabla 11-2  
Valores recomendados de  $G$  y  $GT$  para floculadores (6)

Tipo	Gradiente de velocidad ( $\text{s}^{-1}$ )	$GT$
Eliminación de turbidez y color (sin recirculación de sólidos).	20 a 100	20 000 a 150 000
Eliminación de turbidez y color (con recirculación de sólidos).	75 a 175	125 000 a 200 000
Suavización (reactor de sólidos en contacto).	130 a 200	200 000 a 250 000





## 11.4.2 FLOCULADORES DE FLUJO HELICOIDAL

Los floculadores de flujo helicoidal (también llamados de flujo tangencial o flujo en espiral) imparten un movimiento rotacional al agua, por lo que crean una turbulencia y una aglomeración de floculos. La turbulencia es creada por el flujo y gobernada por el número de cambios. Se recomiendan rangos de velocidad de 0.5 a 0.7 m/s para unidades de cinco cambios.

La siguiente fórmula sirve para calcular los gradientes de velocidad:

$$G^2 = (2pkQ^3)/(uL^4h^3)$$

Donde:

G = gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ ).

p = densidad ( $Kg/m^3$ ).

u = viscosidad dinámica ( $Kg/m.s$ ).

g = constante gravitacional ( $9.81 m/s^2$ ).

k = coeficiente de fricción (cerca de 7.5).

Q = flujo volumétrico ( $m^3/s$ ).

L = longitud de cambio (m).

h = pitch (m).

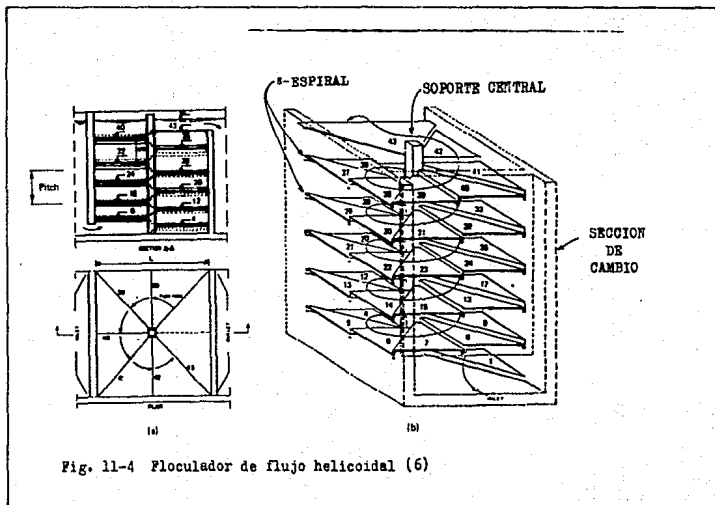


Fig. 11-4 Floculador de flujo helicoidal (6)

## 11.5 FLOCULADORES MECANICOS

### 11.5.1 FLOCULADORES GIRATORIOS

Los floculadores giratorios constan de un sistema de paletas adheridas a un eje horizontal o vertical, el cual gira impulsado por un motor eléctrico desplazando el agua y produciendo un trabajo. Los agitadores pueden tener dos, tres o cuatro brazos, y en cada brazo puede haber dos, tres o más paletas o travesaños unidos por una pieza central al eje.

Pueden colocarse perpendicularmente a la dirección del flujo o paralelo a éste, con el objeto de disminuir los cortocircuitos. Cuando se usan agitadores de eje horizontal, se requiere por lo general un pozo seco al lado del tanque de floculación para acomodar los motores y mecanismos que impulsan el sistema.

Puede evitarse el pozo seco utilizando una correa en "V" y colocando el motor en el borde del tanque. Especial cuidado debe ponerse en este caso para evitar la corrosión.

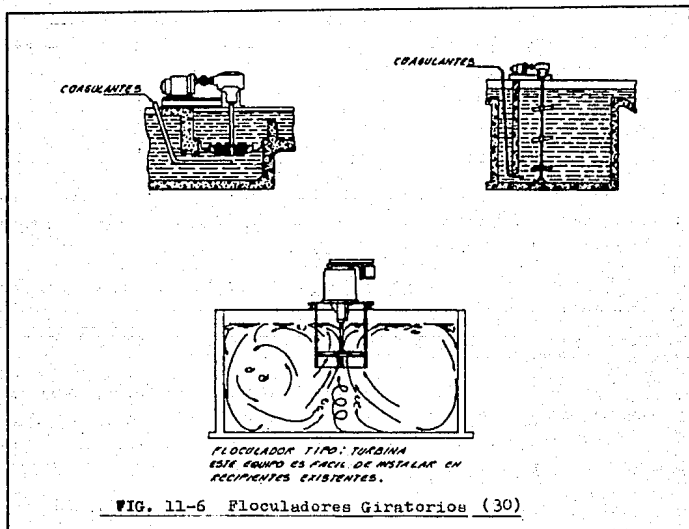
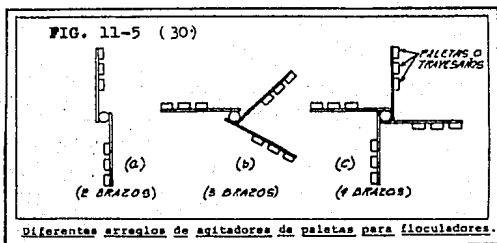
Con agitadores de eje vertical no es necesario el "pozo seco", pero puede inducirse en el agua más fácilmente un movimiento de rotación que estimule los cortocircuitos.

El número de agitadores y de paletas determina la energía comunicada al líquido.

### 11.5.2 FLOCULADORES RECIPROCANTES

Estos tanques pueden ser rectangulares o cuadrados, pero todos operan por el mismo principio de asentar y recolectar los sólidos sedimentados por medio de rastras de movimiento lento que los empujan hacia el sitio de descarga.

En los tanques rectangulares, las rastras se fijan cerca de las orillas a una cadena sin fin que pasa sobre engranes o ruedas



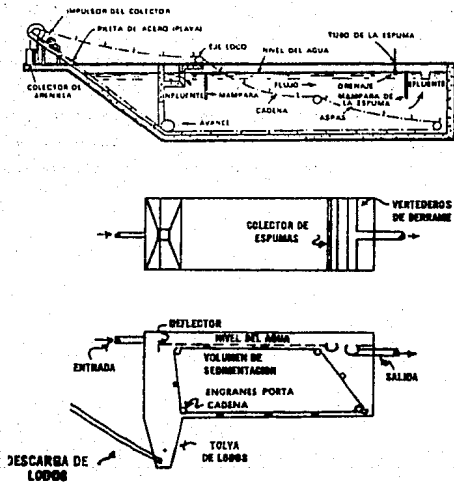


FIG. 11-7 Floculadores Reciprocantes (10)

dentadas, accionados por medio de motores. Las rastras se hacen pasar lentamente rozando el fondo del tanque, empujando los sólidos sedimentados hacia una tolva de lodos localizada en el extremo de entrada del tanque, luego son levantadas por la cadena hacia la superficie del tanque en donde, parcialmente sumergidas, sirven para empujar los sólidos flotantes a un recolector de natas situado en el extremo de salida del tanque. Otro tipo de mecanismo consiste en un puente viajero del mismo ancho del tanque, del cual se suspende una paleta que empuja a los sólidos hacia un punto de descarga. Esta paleta trabaja solamente al moverse el puente en una dirección, quedando suelta cuando se le hace regresar en dirección contraria.

## 12.1 SEDIMENTACION

El proceso de sedimentación es usado para recoger todos los flocúlos pesados que ha atrapado la materia en suspensión. La sedimentación sigue a la coagulación y floculación primeramente para disminuir la carga en los filtros de arena. Normalmente la eliminación que se logra es sólo parcial dependiendo de la naturaleza de la materia que se trate, temperatura del agua y los tiempos de retención usados.

En la naturaleza la sedimentación se presenta normalmente en lagos, estanques, depósitos o tanques cuyo tamaño y periodos de retención pueden variar ampliamente.

## 12.2 TANQUES DE SEDIMENTACION

Por lo general, un tanque de sedimentación es una estructura a través de la cual fluye el agua a tan baja velocidad que el material suspendido caerá depositándose en el fondo del tanque, saliendo de éste un agua relativamente clara. Los factores de operación más importantes de un tanque de sedimentación son: (1) que el agua al entrar en el tanque provoque la mínima turbulencia; (2) el impedir corrientes en circuito o directas entre la entrada y la salida, y (3) que el efluente salga sin provocar disturbios para que arrastre hacia afuera del tanque el material suspendido. Si no es muy grande la cantidad de material suspendido, los tanques de sedimentación pueden limpiarse vaciándolos primero y removiendo después el material del fondo y de los lados por medio de rastrillos y mangueras de presión. Muchos tanques modernos son limpiados por medio de raspadores mecánicos que llevan hacia un extremo el material depositado, o al centro en los tanques circulares, el cual es eliminado después con sólo abrir una válvula de drenaje.

Es conveniente considerar la importancia de que haya 2 ó más tanques de relevo para mantenimiento o reparación. La longitud máxima



de los tanques rectangulares comerciales es de 300 ft. Se considera que un tanque de sedimentación es eficiente cuando mueve del 50 al 65% de los sólidos suspendidos.

Los tanques de sedimentación pueden ser clasificados en intermitentes o continuos. Los tanques de flujo continuo pueden ser divididos en cuatro zonas: (1) Zona de entrada en la cual el flujo influente y la materia suspendida se dispersa sobre una sección en ángulos rectos. (2) Una zona de asentamiento, en el cual las partículas suspendidas se sedimentan. (3) Una zona en el fondo, en el cual sólidos acumulados se remueven y estos son sacados como flujo inferior. (4) Una zona de salida en la cual el flujo y las partículas suspendidas remanentes son llevadas por el tubo de salida.

### 12.3 TIPOS DE SEDIMENTADORES

La clasificación de los sedimentadores es: (1) unidades de flujo horizontal y (2) unidades de flujo vertical. Los factores que involucran estas unidades son: modelo, número de unidades, dimensiones, velocidad y dirección de flujo, tiempo de retención, volumen del tanque, método de eliminación del lodo, arreglos de entrada y salida, y características de alimentación de floculadores.

#### 12.3.1 SEDIMENTADORES DE FLUJO HORIZONTAL

La sedimentación de flujo horizontal es un proceso de separación por gravedad. Puede remover un 95% de la turbidez del agua. La turbidez remanente es removida por filtros. Se usan más a menudo tanques rectangulares debido a su simplicidad y habilidad para adaptarlos a varias condiciones de operación.

Las ventajas del flujo horizontal sobre las de flujo vertical son las siguientes:

1. El proceso es más hidráulico.
2. Costos de operación bajos.

3. Operación y mantenimiento simples.
4. El proceso trabaja perfectamente cuando se utilizan altas cargas.
5. El proceso puede adaptarse a diversas condiciones de operación.

La sedimentación horizontal está gobernada por tres criterios: (1) la cantidad de agua a tratar, (2) selección del tiempo de retención, y (3) la rapidez superficial. La rapidez superficial es definida como la relación entre la rapidez de flujo de entrada y el área superficial de tanque, que puede ser expresada en unidades de rapidez de flujo por unidad de superficie del tanque (e.d.,  $m^3/día/m^2$ ). Esto es equivalente a la velocidad.

Las fórmulas para la sedimentación horizontal son las sig.:

$$t = 24 V/Q$$

$$v_s = 24 R/t$$

$$v_s = Q/WL$$

Donde:

- $v_s$  = rapidez de flujo superficial o velocidad (m/día).  
 $t$  = tiempo de retención (hr).  
 $Q$  = rapidez de flujo ( $m^3/día$ ).  
 $V$  = volumen básico ( $m^3$ )  
 $H, W, L$  = profundidad, anchura y longitud del tanque (m).

Criterios de diseño:

- a. Smerthurs (1983) recomendó rapidez de inundación de 9 a 24  $m/día$  cuando no hay adición de coagulantes y 18 a 36  $m/día$  cuando hay adición de coagulantes.
- b. Una profundidad de 3 m para el tanque.
- c. Una relación ( $L/W$ ) de 3.
- d. Velocidades de flujo entre 4 a 36  $m/hr$ .

El sedimentador horizontal puede ser dividido en 4 zonas:

1. Zona de entrada. El agua floculada entra a esta zona uniformemente sin causar una excesiva turbulencia. Esta zona está formada por paredes de baffles perforados, construidos generalmente de concreto. Hudson (1981) sugirió velocidades, a través de los baffles perforados, de 0.2 a 0.3 m/s.

2. Zona de asentamiento. El agua entra por la parte inferior de la periferia con velocidades extremadamente bajas, permitiendo la sedimentación inmediata de partículas grandes.

3. Zona de platos inclinados y/e arreglos de tubos. Tanto los platos inclinados como los arreglos de tubos, tienen gran importancia en el tratamiento de agua en años recientes. Pueden aumentar la capacidad convencional de clarificación de 50 a 150%. Reduce el área necesaria de uno-seis a uno-cuatro de la requerida por los tanques convencionales.

Las siguientes ecuaciones pueden ser usadas tanto para platos inclinados como para arreglo de tubos:

$$v_{sc} = \frac{k v_o}{\sin \theta + L_u \cos \theta}$$

$$L_R = L/e$$

$$L_u = L_R - 0.013 R_N$$

Donde:

$v_{sc}$  = rapidez superficial crítica, o velocidad de arreglo (m/día).

$k$  = factor de eficiencia (1.0 para platos inclinados; 1.33 para tubos circulares).

$v_o$  = rapidez superficial de arreglo (m/día).

$\theta$  = ángulo de inclinación de arreglo.

$L_R$  = profundidad relativa.

$L$  = longitud de platos o de tubos (m).

$e$  = distancia perpendicular entre platos, o diámetro de tubos (m).

$L_u$  = profundidad relativa efectiva.

$R_N$  = número de Reynolds ( $>280$ ).

4. Zona de salida. Presas o perforaciones son comúnmente usadas para sacar el agua efluente del tanque. Las longitudes de la presa pueden ser seleccionadas para prevenir altas velocidades de turbulencia. La siguiente ecuación es usada para determinar la longitud adecuada de la presa:

$$L = 0.2 Q/H v_s$$

Donde:

$L$  = longitud de la presa (m).

$Q$  = flujo volumétrico ( $m^3/día$ ).

$H$  = profundidad del tanque (m).

$v_s$  = velocidad de arreglo (m/día).

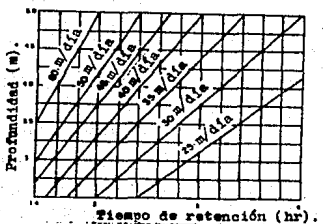


Fig. 12-1 Tiempo de Retención en función de la profundidad (6)

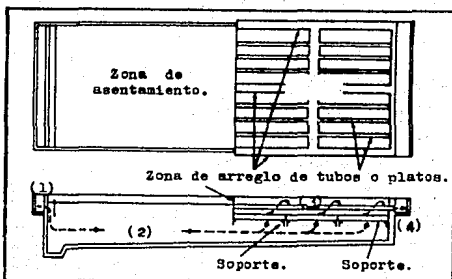


Fig. 12-2 Sedimentador de flujo horizontal (6)

Tabla 12-4 Velocidad de flujo en el Vertedero (6)

	GPD/ft lineal.
Tanques Circulares	70 000
Tanques Rectangulares	215 000

Tabla 12-1 Sedimentadores de flujo horizontal (6)

Velocidad en la zona de asentamiento (m/día).	Velocidad en la zona de platos o tubos (m/día).	Turbidez del efluente (NTU).
(A) Agua cruda con turbidez de 0 a 100 NTU		
120	140	1 a 3
120	170	1 a 5
120	230	3 a 7
170	200	1 a 5
170	230	3 a 7
(B) Agua cruda con turbidez de 100 a 1000 NTU		
120	140	1 a 5
120	170	3 a 7

Tabla 12-2 Tiempo de Residencia en función de la altura del lecho.

Gal/día/ft <sup>2</sup>	Tiempo de Residencia (hr)			
	Altura (fts)			
	7	8	10	12
400	3.2	3.6	4.5	5.4
600	2.1	2.4	3.0	3.4
800	1.6	1.8	2.25	2.7
1000	1.25	1.4	1.80	2.2

Tabla 12-3 Tiempo de Residencia en función de la longitud.

Tiempo de Residencia t(min)	Longitud de Tanques rectangulares (ft).
30	150
45	200
60	225
90	250
120	300

## 12.3.2 SEDIMENTACION DE FLUJO VERTICAL

El principio básico de este tipo de equipo; es que el agua se filtra en flujo ascendente, a través de un lecho de lodos suspendidos; formado por los productos precipitados previamente sedimentados.

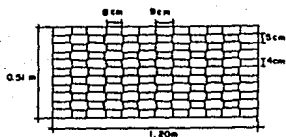
El tanque sedimentador "clarifloculador" es una unidad combinada, consistente de un tanque floculador y un mecanismo de agitación instalado concéntricamente a un tanque clarificador convencional.

En el tanque clarificador, existe una serie de rastrillos, que recolectan los sólidos sedimentados, acarreandolos hacia la parte central, por donde son desalojados.

El mecanismo de agitación en el tanque floculador es producido por baffles movibles, para proporcionar un movimiento suave y controlable.

La alimentación del efluente a este tipo de equipo, se hace por la columna central, que es un tubo concéntrico que va del fondo del tanque; y que a su vez sirve como soporte de la estructura, que se encuentra en la parte superior del tanque clarifloculador. La entrada de agua al tanque floculador es por la parte superior, descargando sobre la superficie del líquido, a través de unas aberturas en dicha columna.

El líquido clarificado es derramado por un vertedero en la periferia del tanque clarificador, el cual es recolectado y bombeado a tanques de almacenamiento.



Material: PVC  
 Gravedad específica: 1.46  
 Color: Negro  
 Dimensiones: 0.51x1.2x0.55  
 Espesor: 1 mm  
 Peso: 28 Kg/m<sup>2</sup>

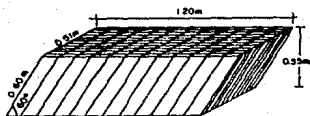


Fig. 12-3 Módulos de tubos de plástico (6)

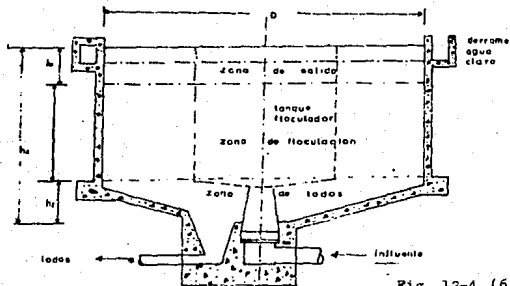


Fig. 12-4 (6)  
 Sedimentador de flujo vertical.



### 13.1 CLARIFICACION

Se utiliza para eliminar gran parte de la turbiedad y sedimentos encontrados en las aguas superficiales. El empleo de coagulantes y ayuda de los mismos acelera el proceso de asentamiento de las partículas.

### 13.2 DISEÑO

El dimensionamiento, propiamente dicho, de una unidad de clarificación se basa fundamentalmente en la determinación de la altura de la zona de sedimentación. Las características propias de los dispositivos de dosificación de químicos, son elegidos dependiendo de las características del efluente como son gasto y contenido de sólidos y de las propiedades deseadas del efluente, así como de un balance económico.

### 13.3 CLARIFICADORES

El equipo utilizado para clarificación puede ser de muchos tipos, pero independientemente de eso debe satisfacer cada una de las etapas: coagulación, floculación y sedimentación.

En los diseños más antiguos de las unidades de clarificación se encuentran el dosificador de agentes químicos, el mezclador, floculador y asentador separadamente. Las unidades modernas contienen todos los pasos y además existen la recirculación de lodos.

Las dimensiones de una unidad básica de clarificación es estándar, está basado en la velocidad de flujo que en promedio es de  $1 \text{ gpm/ft}^2$  (0.5-1.5), con un tiempo de residencia de 90 a 240 min. El agua tratada contiene aproximadamente de 5 a 10 mg/l (ppm) de materia suspendida y cuando se requiere, el color puede reducirse a 5 unidades o menos.

La clave del proceso es la correcta dosificación de químicos en el punto correcto del sistema. Los aditivos químicos incluyen el coagulante en sí, un controlador de pH y frecuentemente aditivos del coagulante que aseguran los resultados.

#### 13.4 TIPOS DE CLARIFICADORES

##### 13.4.1 RECTANGULARES

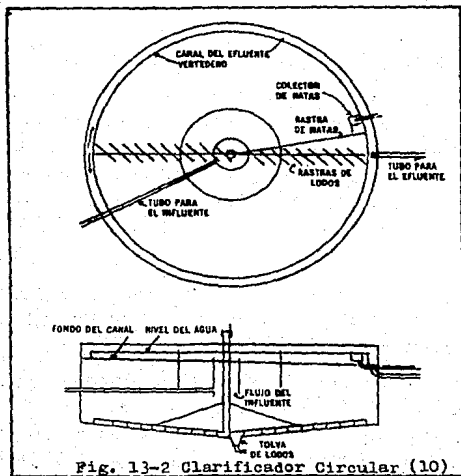
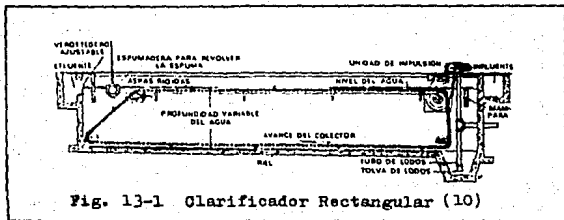
En la remoción de sólidos es el más comúnmente utilizado y consiste de dos cadenas transportadoras sin fin. Ligados a estas cadenas en intervalos aproximadamente 10 fts se encuentran unas piezas de madera de 2 in de espesor y de 6 a 8 in de largo, los cuales extienden la materia sólida. La velocidad común lineal es de 2 a 4 pies/min. Los sólidos asentados son acumulados en pequeños tanques y transportados a otros más grandes, para ser colectados en uno o más receptores de lodos.

Los tanques rectangulares también pueden limpiarse mediante un mecanismo tipo puente que consiste de rieles que se encuentran en la superficie del tanque, arriba y abajo; adaptado a estos rieles se encuentra el mecanismo de barrido o palas que barren los lodos. Los tanques rectangulares múltiples requieren de menor área que los circulares.

Un clarificador rectangular tiene una relación típica de largo a ancho de 4 a 1 (valores promedio). La relación de lodos en un tanque de sedimentación rectangular generalmente está acompañado por un sistema aéreo que tiene la función de remover la materia flotante o superficial y llevarla al lugar de descarga.

##### 13.4.2 TANQUES CIRCULARES

El diseño de tanques circulares ha sido estandarizado. Los tanques de 12 a 30 pies de diámetro tienen el equipo de remoción de



sólidos suspendidos soportados en unas vigas que se encuentran en el tanque. Los tanques son de diámetro mayores a 35 pies, emplean un soporte central donde se encuentra dicho mecanismo el cual está conectado con un puente donde se transportan dichos lodos.

En la mayoría de los diseños el agua cruda se alimenta en el centro del tanque donde hay un distribuidor que impulsa el agua con igual flujo en todas direcciones. La remoción mecánica es mediante un giro lento y puede contener 2 ó 4 brazos que barren lodos. Los brazos también contienen cuchillas que remueven la espuma.

Los tanques múltiples se arreglan por lo general en grupos de 2 ó 4 y el flujo se divide por medio de una cámara localizada entre los tanques.

#### 13.4.3 CLARIFICADORES DE ASENTAMIENTO EN PLANO INCLINADO

Son dos modificaciones similares al diseño estándar de los clarificadores por gravedad los cuales reducen la distancia de caída de las partículas de lodo, aumentando la velocidad efectiva y por consiguiente reducen radicalmente el requerimiento de espacio para el clarificador. Estos son: a) el equipo de asentamiento tubular y, b) el separador laminar clasificado como equipo de asentamiento plano inclinado.

El primero está constituido por una serie de tubos inclinados conectados en una cámara de floculación a la entrada, y a la salida a un medio de filtración.

El ángulo de inclinación varía dependiendo del efluente requerido. El separador laminar es más complicado pero tiene de hecho el mismo principio, en el que las partículas tienen muy pequeñas distancias de asentamiento y los lodos acumulados se envían a un equipo floculador.

#### 13.4.4 CLARIFICADOR TIPO SPAULDING

En esta unidad el agua y los agentes químicos se agregan en la parte central que tiene la forma de cono invertido. En la parte superior el área de flujo es menor y el mezclado el cual es rápido, se lleva a cabo en dicha zona. A medida que el agua baja, su velocidad decrece dando comienzo la floculación. Posteriormente el agua pasa por la parte interior del cono al compartimiento externo donde pasa a un lecho de lodos que se mantiene a nivel constante y donde se realiza la floculación. El agua sigue ascendiendo hasta un nivel donde se decanta.

Si la velocidad de sedimentación es mayor que la del agua, los flóculos, precipitan; si son iguales es posible mantener el nivel constante. El compartimiento externo tiene el área de flujo menor en la parte inferior del equipo, de tal manera que al ir ascendiendo el agua, va disminuyendo su velocidad, cuando ésta es igual a la sedimentación, se tiene el lecho de lodos. Para mantener el nivel de lodos constante es importante eliminar en forma continua; la cantidad eliminada debe ser igual a la floculada.

#### 13.4.5 ACCELERATOR

La unidad de contacto de sólidos reúne en una estructura unificada los procesos de mezcla, coagulación y floculación, acondicionamiento, separación de líquidos y sólidos y remoción automática de lodos. El agua cruda y los agentes químicos son mezclados en presencia de sólidos previamente precipitados que han sido mantenidos en suspensión. Esto acelerará las reacciones químicas, evita la formación de precipitados coloidales a causa de que la precipitación ocurre en la superficie de los flóculos previamente formados, y aumenta el peso de las partículas de flóculos aumentando por consecuencia la velocidad de sedimentación.

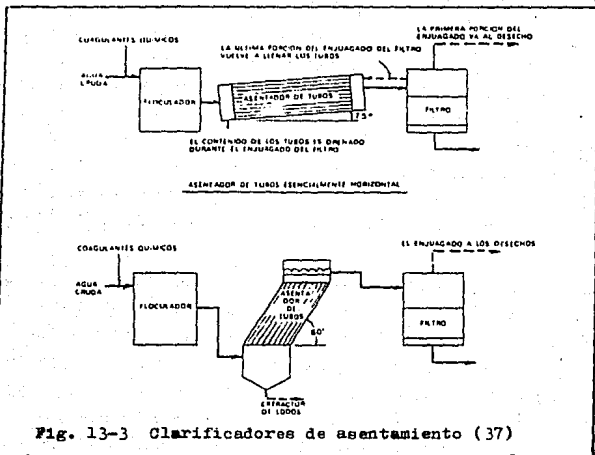


Fig. 13-3 Clarificadores de asentamiento (37)

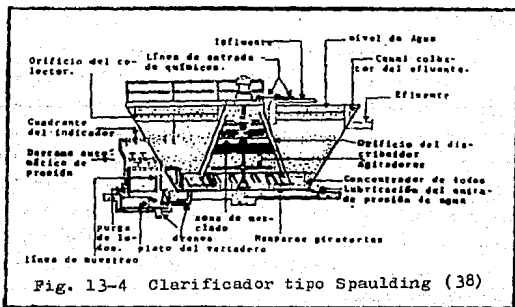


Fig. 13-4 Clarificador tipo Spaulding (38)

Es importante que la mezcla se maneje a velocidades controladas, puesto que pequeñas cantidades de agentes químicos se deben combinar con una gran masa de agua; además de una cierta cantidad de sólidos deben ser mantenidos en suspensión y en contacto con agua cruda.

Las operaciones de mezcla, coagulación y acondicionamiento de flóculos son normalmente afectados en periodos que varían de 15 a 30 min., dependiendo del tratamiento empleado y de la temperatura del agua.

Este periodo puede ser llamado periodo de contacto de sólidos y la acción obtenida durante este tiempo es muy importante para el rendimiento apropiado de una unidad de contacto de sólidos.

En lo que se relaciona al diseño del decantador y sus dimensiones, los dos factores que se tienen en cuenta son:

- 1) El tiempo en la zona de contacto de los sólidos.
- 2) La máxima velocidad del flujo ascendente en la zona de clarificación.

El accelerator comprende:

- 1) Caño de entrada de agua cruda y conducto de distribución.
- 2) Zona de mezcla y reacción primaria.
- 3) Dos tubos de aspiración concéntrica que forma la zona secundaria de mezcla y reacción.
- 4) Un rotor impulsor para mezcla y bombeo accionado por un reductor de velocidades motorizado.
- 5) Un sistema de batea para el líquido efluente.
- 6) Concentraciones para recoger y remover el exceso de sólidos.

Los agentes químicos son comúnmente introducidos en la zona primaria de reacción y mezcla, aunque pueden entrar en la línea de agua cruda o en la zona secundaria de mezcla y reacción.

La reacción ocurre en presencia de un lodo de precipitados previamente formados y el producto resultante, granular o flocculento está casi inmediatamente listo para separación.

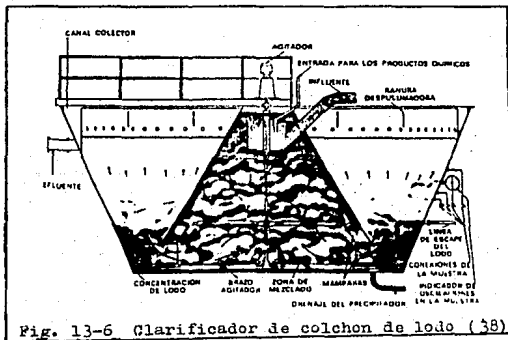
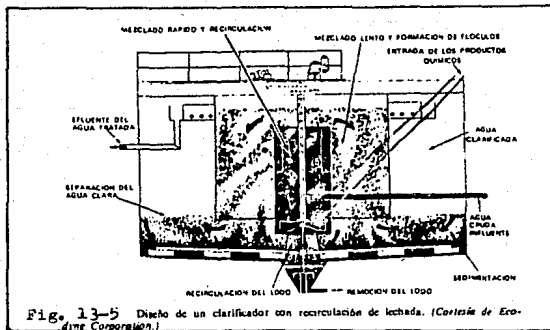
De la zona de reacción primaria el agua cruda, más de 3 a 5 volúmenes de lodo recirculado pasan a la zona de mezcla y reacción. Aquí el contacto continuado con el "slurry" lleva las reacciones del tratamiento o equilibrio antes de su descarga dentro de la parte exterior del decantador para la separación de los sólidos. Al dejar la zona secundaria, o sea el tubo exterior de aspersión, el "lodo" es descargado hacia afuera, hacia abajo y a la superficie del estanque del "lodo".

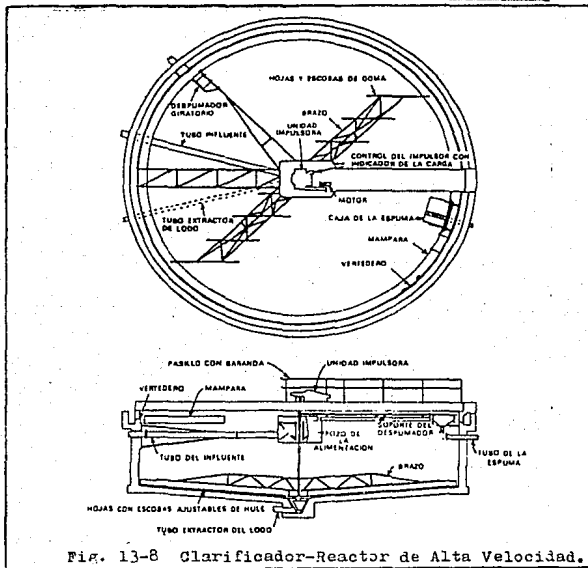
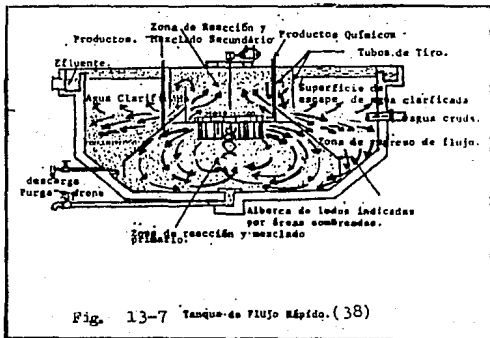
Todo el "lodo" está en movimiento direccional hacia afuera y hacia abajo y de esto un volumen de agua tratada igual al volumen de agua cruda influente es desplazado hacia arriba. Los restantes de 3 a 5 volúmenes de "lodo" circulantes son inducidos devuelta a la zona de reacción primaria por medio del rotor impulsor.

Además la tasa de agua tratada de salida en el accelerator no es controlada por un flujo ascendente a través de una suspensión de lodos que impondría un límite muy definitivo en la máxima velocidad ascensional posible. Puesto que el agua tratada se separa en la superficie de la suspensión de sólidos en movimiento descendente, la máxima velocidad ascensional o tasa de desborde es solamente limitada por la velocidad de sedimentación de la partícula individual bien flocculada. Esta velocidad de sedimentación es siempre apreciablemente mayor que la velocidad de sedimentación de una suspensión espesa de las mismas partículas, con la que se obtiene más rápida separación de líquidos.

El lodo es descargado de los concentradores a través de grandes líneas de extracción provistas con una válvula de descarga que opera en un ciclo ajustable de tiempo.







#### 13.4.6 PULSATOR

El agua se introduce en la parte inferior por medio de una serie de tubos perforados en forma intermitente, pasa por un lecho de lodos, donde debido a la forma de alimentación el volumen aumenta y disminuye alternativamente. En la parte superior se encuentra otra serie de tubos por las que se recoge el agua y donde se evitan irregularidades. En un lado del mismo se encuentra un decantador de fangos.

Para eliminar el agua en forma intermitente en el centro del aparato hay una campana en la que se hace vacío absorbiendo el flujo de agua a tratar; el agua, entonces, pasa por los orificios de los tubos inferiores. Las purgas se efectúan de manera intermitente.

#### 13.4.7 CIRCULATOR

Es un floculador decantador con recirculación de fangos; está constituida por una cuba cilíndrica cónica; el agua se introduce por la parte inferior mediante una tubería a un eyector que realiza la mezcla íntima con los reactivos y la aspiración del lecho de fangos anteriormente floculados que de esta manera se recirculan y entran en contacto con el agua a tratar.

Los reactivos pueden introducirse en la base del difusor o en el agua cruda antes de entrar al clarificador. El equipo puede ser atmosférico o a presión.

TABLA 13-1

## TANQUES DE CLARIFICACION NORMALES (38)

	CILINDRO-CONICO	DE FLUJO HORIZONTAL	
		Sin barrido lodos	Con barrido lodos
Flujo agua cruda	pequeño (50 gpm)	muy grandes	muy grandes
Turbidez del agua cruda	no funciona turbidez alta	no funciona bien con turbidez lenta	turbidez pesado y material pesado que sedimenta rápido.
Variaciones en la carga de agua cruda	-	-	-
Eliminación lodos	Continua	Intermitente	Continuo
Tiempo de retención	1 a 1.5 horas	Floculador: 20-60 min. Sedimentador: 4 horas	Floculador: 20-60 min Sedimentador: 4 horas
Espacio requerido	pequeño	grande	grande
Sistema agitación	-	-	rosquetas o aspas
Materia de construcción	acero, concreto	concreto	concreto

TABLA 13-2

## TANQUES DE CLARIFICACION FLUJO RAPIDO (38)

	LECHO DE LODOS		RECIRCULACION LODOS	
	SPAUDIN	PULSATOR	ACELERATOR	CIRCULATOR
Flujo de agua cruda	50-6040 gpm (comerciales)		250-10 000 gpm (comerciales)	pequeña y media capacidad
Variaciones en la carga de agua cruda	SI	SI	SI	SI
Variaciones en turbidez de agua cruda	SI	SI	SI	SI
Turbidez del efluente	Baja	Baja	Baja (10 ppm)	
Eliminación de lodos	Continua	Continua	Continua	Continua
Tiempo de retención				45 min
Velocidad de agua cruda unitario			2.25-2.50 gpm/ft <sup>2</sup> de separación	
Espacio requerido	pequeño	pequeño	pequeño	pequeño
Sistema agitación		Intermitente		Eyector de agua
Materia construcción	Acero, concreto	Acero y concreto	Acero y concreto	Acero y concreto

TABLA 1.3-3

VELOCIDADES A LAS CUALES LAS PARTICULAS SUMERGEN EN EL (38)  
AGUA (10 °C, 2.65 g/cm<sup>3</sup>)

DIAMETRO DE PARTICULA (mm)	CLASIFICACION	VELOCIDAD DE SUMERSION (m/s)	VELOCIDAD DE FLUJO (gpm/ft <sup>2</sup> )
10.0	grava	1000.0	1475.0
1.0		100.0	148.0
0.6		63.0	93.0
0.4	arena gruesa	42.0	62.0
0.2		21.0	31.0
0.1		8.0	11.8
0.06		3.8	5.6
0.04	arena fina	2.1	3.1
0.02		0.62	0.91
0.01		0.154	0.227
0.004	sedimento	0.0247	0.036

\* se requiere coagulante.

TABLA 1.3-4

GASTO POR AREA DE SISTEMAS TÍPICOS (38)

COAGULANTE	gal/día ft <sup>2</sup>
sin coagulante	600 - 1200
alúmina	500 - 600
hierro	700 - 800
cal	1400 - 1600

Tabla 13-5 GASTOS DE DERRAME EN VERTEDEROS TÍPICOS (30)

Tipo de Servicio.	Gasto de derrame en el vertedero (gpm/pie).
Clarificación de agua.	<35
Tratamiento de aguas:	8-10
• Flóculo ligero de alumbre (agua con baja turbidez).	10-15
• Flóculo pesado de alumbre (agua de alta turbidez).	15-18
• Flóculo pesado de suavización con cal.	

Tabla 13-6 Velocidades de rastras (RPM) (30)

## PARA MECANISMOS SOPORTADOS SOBRE UN PUENTE

TAMAÑO	VELOCIDAD
<u>Diámetro x profundidad</u>	<u>RPM (de las rastras)</u>
De 10' a 16' x 8'	0.50
" 18' a 24' x 8'	0.33
" 26' a 40' x 8'	0.26
" 45' a 55' x 9'	0.145
" 60' a 85' x 11'	0.10
" 90' a 100' x 14'	0.08

## PARA MECANISMOS SOPORTADOS SOBRE COLUMNA CENTRAL

TAMAÑO	VELOCIDAD
<u>Diámetro x profundidad</u>	<u>RPM (de las rastras)</u>
De 75' a 85' x 12'	0.100
" 90' a 100' x 12'	0.080
" 105' a 135' x 14'	0.065
" 140' a 170' x 16'-8"	0.050
" 175' a 200' x 18'-6"	0.040

#### 14.1 CAL SODADA EN FRIO

El arte de ablandar el agua fue implantado por el profesor escocés Thomas Clark, profesor de Química en la Univesidad de Aberdeen. El método de Clark era el de añadir cal al agua, reduciendo la dureza por bicarbonatos por precipitación de la alcalinidad de calcio como carbonato de calcio, y la aloalinidad de magnesio como hidróxido de magnesio. La cal añadida se precipitaba también como carbonato de calcio.

Los precipitados se sedimentaban y el agua asentada se usaba sin tratamiento posterior o se filtraba antes de usarla. El proceso de Clark reduce únicamente la dureza de bicarbonato, pero después John Henderson Porter, además de la cal uso soda ash, reduciendo la dureza de no carbonatos además de la dureza de bicarbonatos. El proceso de ablandar el agua se conoció después como el proceso de Porter-Clark, pero modernamente se le conoce comúnmente como el proceso cal sodada en frío.

#### 14.2 ALCALINIDADES DE CALCIO, MAGNESIO Y SODIO

Aunque las sales en una solución tan diluida como en el agua no existen como tales sino en forma de iones, es conveniente representar el radical bicarbonato como unido primero al calcio y luego al magnesio, ya que éste es el orden en el cual ocurre la precipitación cuando se añade cal al agua que contiene estos carbonatos. Esto es, el carbonato de calcio precipita primero debido a su baja solubilidad; siendo el carbonato de magnesio aproximadamente seis veces más soluble, no precipitará como carbonato excepto por la cantidad que exceda a su solubilidad. Con la adición continuada de cal, precipitará el hidróxido de magnesio debido a su baja solubilidad. Las sales de sodio son extremadamente solubles.

Por esto, al inspeccionar un análisis de agua, la alcalinidad se calcula primero como unida al calcio y se le denomina alcalinidad de calcio. Si hay una alcalinidad sobrante, se calcula como unida al magnesio y se le llama alcalinidad de magnesio. Con un número relativamente pequeño de aguas naturales, puede estar presente un exceso de alcalinidad superior a las alcalinidades de calcio y magnesio. En estos casos, se calcula como unida al sodio y se le llama alcalinidad de sodio. Si la dureza total, dureza de calcio, magnesio, sodio y alcalinidad total (alcalinidad al anaranjado de metilo) se expresan como sus equivalentes en  $\text{CaCO}_3$ , la aplicación de las siguientes reglas mostrará qué alcalinidades están presentes y en qué cantidades:

- (1) Alcalinidad de calcio = a la dureza de calcio o alcalinidad total, cualquiera que sea menor (obviamente, si son iguales, ninguna).
- (2) Alcalinidad de magnesio = a la dureza de magnesio si la alcalinidad total es igual a/o mayor que la dureza total.
- (3) Alcalinidad de magnesio = a la alcalinidad total - dureza de calcio si la alcalinidad total es mayor que la dureza de calcio pero menos que la dureza total.
- (4) Alcalinidad de sodio = alcalinidad total - dureza total.

#### 14.3 DUREZA DE NO CARBONATOS

La dureza de no carbonatos está presente si la dureza total es mayor que la alcalinidad total. Si está presente, se considera primeramente al magnesio, y segundo, al calcio, de manera que si hay cualquiera alcalinidad de magnesio presente no habrá dureza de no carbonatos debido al calcio.



## 14.4 SUSTANCIAS QUIMICAS USADAS

La cal añadida puede ser cal viva, cal hidratada, o para ciertos usos especiales tales como eliminación de sílice, dolomita o cal dolomítica hidratada.

Cal viva. La adición de cal viva (CaO) es mucho más barata, en bases equivalentes, que el hidróxido de calcio o cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>). Sin embargo, la cal viva requiere más cuidado en su almacenaje y manejo y debe ser apagada a Ca(OH)<sub>2</sub> con cantidades limitadas de agua antes de alimentarse.



La cal viva también se conoce como cal quemada. Un buen promedio de pureza en esta cal comercial es de 90% de CaO.

Cal hidratada. La cal hidratada Ca(OH)<sub>2</sub>, es más fácil de manejar que la cal sin apagar, puede almacenarse en almacenes de madera, y no requiere que se apague antes de usarse. La pureza promedio de la cal hidratada comercial es de 93% de Ca(OH)<sub>2</sub>.

Cal dolomítica y cal dolomítica hidratada. Estos reactivos varían algo en las cantidades de magnesio que contienen. Para la eliminación de sílice, la cal dolomítica deberá ser de 58% de CaO y 40% de MgO, la cal dolomítica hidratada deberá tener 62% de Ca(OH)<sub>2</sub> y 32% de MgO.

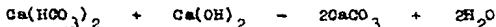
Sosa ash. El grado comercial usado es la soda ash ligera, con 58% de Na<sub>2</sub>O (que es equivalente a 99.2% de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

Coagulantes. El coagulante más usado es el sulfato de aluminio. Fórmula: (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O), otros coagulantes que se pueden emplear son el sulfato férrico (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), que se conoce bajo varios nombres registrados; el sulfato ferroso, (Fe(SO<sub>4</sub>)·7H<sub>2</sub>O), también conocido como coperas (cuando se emplea sulfato ferroso debe estar

presente el aire u otro agente oxidante para obtener una precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , y aluminato de sodio ( $\text{NaAlO}_2$ ), que usualmente contiene cerca de 89% de aluminato de sodio y 10% de hidróxido de sodio y carbonato. Las dosis de coagulantes generalmente usados varían de 20 a 10 ppm para varios coagulantes.

Puesto que el calcio es precipitado como carbonato de calcio y el magnesio como hidróxido, las dosis equivalentes de reactivos requeridos y sus reacciones son las que siguen:

- (1) Un equivalente de alcalinidad de calcio requiere un equivalente de cal hidratada.



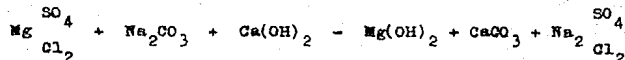
- (2) Un equivalente de alcalinidad de magnesio requiere dos equivalentes de cal hidratada.



- (3) Un equivalente de dureza de no carbonato de calcio requiere un equivalente de soda ash.



- (4) Un equivalente de dureza de no carbonato de magnesio requiere un equivalente de soda ash más un equivalente de cal hidratada.



#### 14.5 TIPOS DE ABLANDADORES

Hay cuatro tipos básicos de ablandadores para el proceso con cal sodada en frío. (1) lecho suspendido, (2) tipo "convencional", (3) tipo "catalítico", (4) intermitente.

Los tres primeros son de tipo continuo; esto es, el agua se trata de acuerdo como pasa por el equipo. El cuarto tipo es uno en el que como su nombre lo indica, el flujo del agua no es continuo, sino intermitente, ya que el agua se trata en lotes separados. De éstos, el de lecho suspendido, debido a su alta eficiencia, menores tiempos de retención, y menor espacio requerido, está desplazando rápidamente al equipo convencional del campo industrial.

##### 14.5.1 EQUIPO DE LECHO SUSPENDIDO

Este tipo de ablandadores se ha fabricado en un número apreciable de diseños diferentes, pero el principio básico en el cual todos difieren del equipo "convencional" antiguo, es que el agua tratada se filtra en flujo ascendente a través de un lecho de lodo suspendido formado de los precipitados previamente sedimentados. Hay varias ventajas obtenidas por este procedimiento. Primero, en la práctica, la cal usada en cualquier tipo de equipo, se dosifica en forma de suspensión. En el tipo de equipo "convencional", algo de esta suspensión se arrastra por los precipitados formados, antes de tener tiempo de disolverse y reaccionar con la dureza del agua, de manera que algo de la cal se desperdicia. En el tipo de equipo de lecho suspendido esto no sucede, debido a la filtración ascendente a través del lecho de precipitados, resultando en una solución completa y un uso total de la cal que se añade.

Segundo, es muy común que con el uso de equipo de tipo "convencional" ocurra "post-precipitaciones" que se presentan en los gránulos del medio filtrante de los filtros, tuberías o sistemas de

distribución. Esto ha conducido a la práctica común de la "recarbonatación" con bióxido de carbono del gas de combustión, esto evita la formación de estos depósitos. La presencia de estos depósitos se ha achacado a la supersaturación o reacción incompleta en el equipo. En el equipo de lecho suspendido, el íntimo contacto del agua tratada con grandes masas en la fase sólida, previenen la supersaturación y la formación de post-precipitaciones.

Tercero, la filtración ascendente y la ausencia de "post-precipitados", conducen a la obtención de efluentes que son suficientemente claros (menores de 10 ppm) para muchas aplicaciones industriales, de manera que a menudo la filtración es innecesaria. Cuarto, en el equipo de tipo "convencional", el periodo de retención es de 2 a 4 o más horas; con el equipo de lecho suspendido, es suficiente un periodo de retención de una hora. Esto hace al equipo más compacto y reduce los requerimientos de espacio. Quinto, en la remoción de sílice, se requiere un contacto íntimo con grandes masas de sólidos reactantes o absorbentes y es obvio que esto se logra mejor en el equipo de lecho suspendido.

**Diseño vertical.** La cámara exterior consiste de una sección cónica en la que su parte mayor está dispuesta hacia arriba, mientras que la cámara interior es una sección piramidal cónica que tiene su base hacia abajo. La cámara exterior puede hacerse ya sea de acero o de concreto, mientras que la interior usualmente se hace de hierro, aunque algunas veces puede también hacerse de concreto. El agua cruda y las sustancias químicas se introducen en la parte superior de la cámara interior donde se mezclan por medio de un agitador mecánico dispuesto en la parte central. Los dosificadores usados pueden ser del tipo seco o húmedo, los de tipo seco generalmente se usan únicamente en instalaciones grandes. En los alimentadores de tipo húmedo, la cal hidratada se alimenta en forma de suspensión a una concentración de 5%. Cuando también se requiere soda ash, usual-

mente se disuelve y se alimenta con la suspensión de cal en lugar de alimentarse separadamente. El coagulante se disuelve y alimenta por medio de un dosificador separado. Cuando se usan alimentadores de tipo seco, se utilizan alimentadores para la cal, sodada ash y coagulantes, separadamente.

El agitador mecánico consiste de una serie de paletas, montadas en una flecha vertical movido por un motor y un reductor de velocidad. Las revoluciones por minuto varían en los diferentes tamaños, pero la velocidad comúnmente usada en estas paletas es de 50 a 150 pies por minuto. A medida que los constituyentes de la dureza del agua reaccionan con las sustancias químicas que se añaden, se producen precipitados que se mantienen en suspensión por el agitador. El agua tratada, con estos precipitados obtenidos, fluye lentamente hacia el fondo de la cámara interior y allí emerge por una serie de rendijas y cambia el sentido del flujo, ampezando a subir lentamente por la cámara exterior. Frecuentemente se usan deflectores en la parte inferior de la cámara interior para romper el movimiento de rotación del agua que desciende.

A medida que el agua asciende por la cámara exterior, su velocidad vertical en la parte inferior es suficiente para mantener los precipitados en suspensión. Debido a este diseño, el área transversal de la cámara exterior aumenta constantemente del fondo a la parte superior. Consecuentemente, la velocidad vertical del agua tratada disminuye constantemente también del fondo a la parte superior. Finalmente se llega a un nivel, en el que un volumen dado de lodos y un gasto dado de agua, son incapaces de expandir el lecho de lodos suspendidos más allá de cierta altura. Esto determina el nivel superior de lodos, y en la práctica hay una clara línea de demarcación entre la parte superior de los lodos y el principio de la zona de aguas claras, las que se colectan en la parte superior y pasan directamente al servicio o a los filtros, según se requiera.

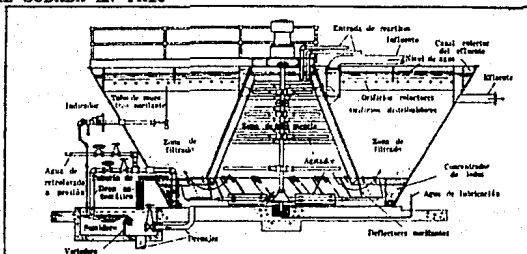


Fig. 14-1 (arriba). Vista transversal de un precipitador vertical. Fig. 14-2 (abajo). Figura que muestra la formación de precipitados y la filtración ascendente a través del lecho suspendido (13)

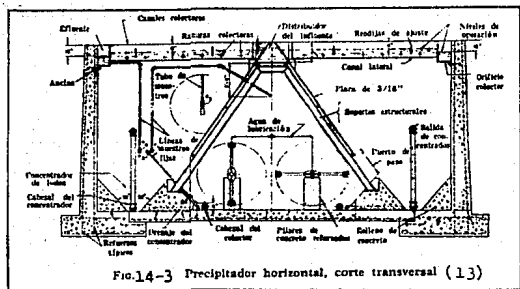
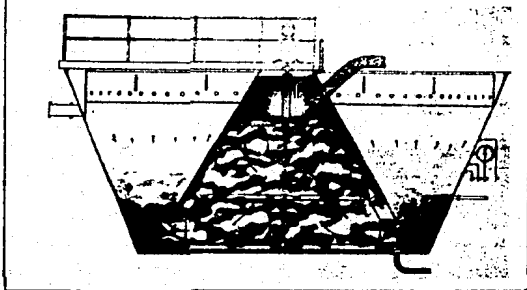


FIG.14-3 Precipitador horizontal, corte transversal (13)

El nivel de lodos se mantiene constante purgando cierta cantidad de ellos equivalente a la velocidad con que se forman; esto se puede hacer automáticamente.

Diseño horizontal. En el diseño horizontal la cámara exterior es de forma rectangular y la cámara interior está compuesta de particiones inclinadas. En las unidades de poca capacidad el material de construcción es acero, en los tamaños grandes las paredes exteriores son de concreto y la armazón interior es de acero. Los agitadores mecánicos están dispuestos horizontalmente, y el mecanismo motor en los tamaños grandes se encuentra colocado en un registro al final de la cámara exterior. Las velocidades de las paletas varían de 40 a 120 pies por minuto. El sistema colector consiste de cabezal y canales laterales.

En este diseño el área transversal creciente se obtiene por medio de las paredes inclinadas que se usan para formar la cámara interior. Como en el diseño vertical, el agua se introduce en la parte superior de la cámara interior, aquí se añaden las sustancias químicas y se mezclan perfectamente con el agitador mecánico; pasa suavemente hacia abajo y de aquí asciende a través del lecho de lodos suspendidos en forma de un líquido prácticamente claro; es colectado por el sistema colector, mandando a los filtros o al servicio. Eficiencias, métodos de operación, etc., son semejantes o iguales a los de diseño vertical.

#### 14.5.2 TIPO "CONVENCIONAL"

Este término se usa comúnmente para designar los ablandadores de agua por el proceso cal sodada en frío, de tipo continuo, que no emplean el principio de lecho suspendido, sino que se permite que todo el lodo formado se deposite en el fondo. Estos ablandadores pueden construirse de acero o de concreto. Los modelos varían, pero

el diseño usual con lámina de acero consiste de un cilindro alto con fondo plano, que contiene un derramadero central cilíndrico que sirve para mezclar y como compartimiento de reacción. En el diseño de concreto, el tanque de sedimentación es generalmente de forma rectangular, con la mayor parte de su altura usualmente bajo tierra; el compartimiento de mezclado y de reacción es frecuentemente un pequeño depósito separado en lugar de un derramadero, como en el diseño en acero. El primer tipo se usa principalmente en la industria, y los de concreto casi por lo general en las plantas municipales.

Diseño en acero. En este tipo de diseño los ablandadores convencionales consisten usualmente de un tanque de acero cilíndrico, alto, de fondo plano, en cuyo centro hay un derramadero también de acero y cilíndrico, la parte final de éste termina a prudente distancia del fondo, de manera que haya espacio para colectar los lodos en el fondo. En el diseño que opera los dosificadores al nivel del suelo, tanto la soda como la cal y los coagulantes se bombean a la parte superior del tanque. Se pueden usar dosificadores de tipo seco o húmedo. Usualmente la cal y la soda se dosifican juntos, y el coagulante se añade separadamente. Los agentes químicos se mezclan con el agua en el derramadero, donde reaccionan con las sales que constituyen la dureza formando precipitados que bajando por este compartimiento se depositan en el fondo. En trabajo industrial, el periodo de retención en climas fríos es de cuatro horas; se pueden usar periodos más largos o más cortos, pero esto es cuestión de un balance económico entre la eficiencia de operación y los costos de operación; deben evitarse periodos demasiados largos.

Diseño en concreto. En este diseño, las plantas "convencionales" cal sodada en frío, el derramadero usualmente se reemplaza por un compartimiento de mezcla al mismo nivel situado a un lado del tanque de sedimentación. El agua cruda y las sustancias químicas se mezclan en esta cámara que usualmente está provista de un agitador



mecánico. De esta cámara de mezcla, con los precipitados ya formados, el agua pasa a los tanques de sedimentación. De aquí, los lodos se eliminan por rastras, ya sea de tipo circular o de desplazamiento horizontal. La concentración de lodos son alrededor de 3 a 7%; generalmente, el lodo se bombea al drenaje. El periodo de retención es de cuatro horas, aunque puede variar. Se pueden usar dosificadores de tipo húmedo o seco.

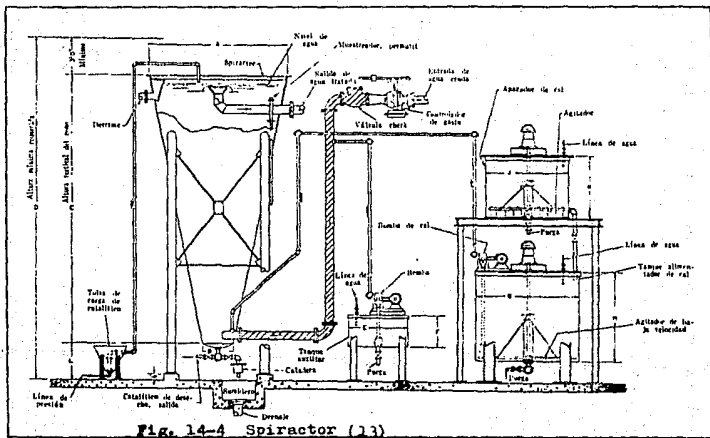
#### 14.5.3 TIPO CATALITICO "SPIRATOR"

En este equipo se puede usar cualquier sustancia mineral insoluble finamente molida (0.3 a 0.6 mm de diámetro), originalmente se usó calcita, pero ahora se usa arena fina.

El Spirator consiste de un tanque cónico, el cual se llena en sus dos terceras partes con el catalítico antes mencionado, el tanque puede estar cerrado para operarse a presión o puede ser del tipo abierto de operación de gravedad, en cualquier caso, el agua cruda y los agentes químicos entran en forma tangencial a través del lecho suspendido de catalítico.

El carbonato de calcio formado por las reacciones se deposita en los granos del catalítico, de manera que estos aumentan de tamaño. El hidróxido de magnesio no forma depósitos adherentes, ni son los coagulantes de valor para hacer que los depósitos de magnesio se adhieran. El proceso con el Spirator se limita a la eliminación de calcio.

El periodo de retención en el Spirator es mucho menor que en cualquier otro equipo, y es únicamente de 8 a 12 min, comparado con cuatro horas para el tipo convencional y una hora para el proceso de lecho suspendido. También es necesario añadir catalítico nuevo de tiempo en tiempo. Aproximadamente, la cantidad de catalítico nuevo que es necesario añadir es de cerca de 0.043 lb/1 000 gls/100 ppm de dureza de calcio eliminada.



#### 14.5.4 PROCESO POR LOTES

La planta consiste generalmente de tres unidades, y la operación se programa de tal manera que mientras el agua y sustancias químicas se mezclan en una unidad, la siguiente está en periodo de sedimentación, y la tercera está filtrando.

El procedimiento usual de operación es (1) llenar el tanque con agua, (2) añadir la cantidad de agentes químicos necesaria y agitar completamente con un tipo mecánico de agitador, (3) dejar sedimentar, (4) filtrar, (5) tirar al drenaje el lodo. Se obtienen excelentes resultados cuando se pone la dosificación correcta y el debido y suficiente tiempo de agitación. Este tipo de equipo prácticamente no se usa debido a su alto costo, espacio requerido y trabajo.

#### 14.6 CALCULO DE LAS DOSIFICACIONES DE REACTIVOS

Las dosis de sustancias químicas que se usan en los diferentes procesos de cal sodada en frío, dependen de (1) composición del agua cruda, (2) calidad requerida del efluente.

Efecto de los coagulantes. Si se usa un coagulante, deben tomarse en cuenta sus efectos en la composición del agua y en las dosis de las sustancias químicas que se usan. Para propósitos de cálculo, es conveniente suponer que el coagulante se añadió antes de las otras sustancias químicas y usar un "análisis corregido por coagulante" como base para todos los cálculos.

Análisis corregido por coagulantes. La presencia o ausencia de los siguientes constituyentes y la cantidad de los presentes, pueden determinarse de acuerdo con las siguientes reglas.

- (1) Alcalinidad de calcio = dureza de calcio o alcalinidad, cualquiera que sea menor (si son iguales, cualquiera).
- (2) (a) Alcalinidad de magnesio = dureza de magnesio si la alcalinidad es igual o mayor que la dureza total, o,

- (b) La alcalinidad de magnesio = alcalinidad - dureza de calcio, si la alcalinidad es mayor que la dureza de calcio, pero menor que la dureza total.
- (3) Alcalinidad de sodio = alcalinidad - dureza total.
- (4) Dureza de calcio no carbonatos = dureza de calcio - alcalinidad de calcio.
- (5) Dureza de magnesio no carbonatos = dureza de magnesio - alcalinidad de magnesio.
- (6) Dureza total no carbonatos = dureza total - alcalinidad.

Símbolos que se usan. Todas las cantidades usadas están en ppm. Todas las abreviaciones se refieren a los constituyentes en el análisis corregido por coagulantes:

DT = dureza total

DNC = dureza no carbonatos

Alc = alcalinidad amarrado de metilo (total)

Ca Alc = alcalinidad de calcio

DCa = dureza de calcio

DCaN = dureza de calcio no carbonatos

Mg Alc = alcalinidad de magnesio

DMg = dureza de magnesio

DMgN = dureza de magnesio no carbonatos

Na Alc = alcalinidad de sodio

#### 14.6.1 REDUCCION DE ALCALINIDAD DE CALCIO

Resultados. Se elimina el  $\text{CO}_2$  libre. La alcalinidad de calcio se reduce a 35 ppm. Cerca del 10% de la dureza de magnesio se elimina. La alcalinidad de carbonato será de 35 ppm. Si hay alcalinidad mayor de 35 ppm, será alcalinidad de bicarbonato. Dependiendo si están presentes o no bicarbonatos, el pH podrá variar de 9.0 a 10.2.

## Composición del efluente;

- (1) Si la Mg Alc es igual o mayor de 10% de DMg,  
dureza de calcio =  $(35 + DCa) - Ca\ Alc.$   
Si la Mg Alc está presente pero es menor que 10% de DMg,  
dureza de calcio =  $(35 + DCa + 10\% DMg) - Alc.$   
Si no hay Mg Alc,  
dureza de calcio =  $(35 + DCa + 10\% DMg) - Ca\ Alc.$
- (2) Puesto que se precipita el 10% de la DMg,  
entonces la dureza de magnesio = a 90% de la DMg.
- (3) Dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio.
- (4) Si la Mg Alc = o mayor de 10% de la DMg,  
la alcalinidad =  $(35 + Alc) - (Ca\ Alc + 10\% DMg).$   
Si la Mg Alc está presente, pero es menor que 10% de la DMg,  
la alcalinidad =  $(35 + Alc) - (Ca\ Alc + Mg\ Alc).$   
Si no hay presente Mg Alc entonces,  
la alcalinidad =  $(35 + Alc) - Ca\ Alc.$

TABLA 14-1 PROCESO CON CAL EN FRIO PARA REDUCCION DE ALCALINIDAD DE CALCIO. DOSIS DE CAL HIDRATADA O CAL VIVA REQUERIDAS

	lb/1 000 gal	
	Cal hidratada o cal viva 83% Ca(OH) <sub>2</sub>	90% CaO
CO <sub>2</sub> , libre (ppm CO <sub>2</sub> )	X0.0151	X0.0118
Ca Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00663	X0.00519
Mg Alc eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.0133	X0.0104
DMgN eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00663	X0.00519

Para convertir lb/1 000 gal a kg/m<sup>3</sup> multiplicar por 0.120.

## 14.6.2 REDUCCION DE ALCALINIDAD DE CALCIO Y MAGNESIO

Resultados. Se elimina el CO<sub>2</sub>. La dureza de calcio se reduce a 35 ppm. La alcalinidad de magnesio puede reducirse a un punto que sea consistente con las características deseadas del efluente y economicidad de tratamiento. Si el tratamiento se efectúa de manera que no haya presente causticidad, la alcalinidad será toda de carbonato y el pH será alrededor de 10.2. Si el tratamiento da causticidad, el

152 CAL SODADA EN FRIO

resto será alcalinidad de carbonato.

Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = 35.
- (2) DMg = cantidad deseada hasta el mínimo.
- (3) DT = dureza de calcio + dureza de magnesio.
- (4) Alcalinidad = (35 + Alc) - (DOa + reducción en DMg).
  - (a) Si DMgN es menor que 80 ppm,
 

	causticidad total por dureza de no
dureza de magnesio -	=
	dureza de magnesio carbonatos.
  - (b) Si DMgN es más de 80 ppm, DMg = DMgN.
  - (c) Si Na Alc está presente en más de 62 ppm, el mínimo de DMg económico es 8 ppm.
  - (d) Si Na Alc es de 62 ppm o menor, el DMg mínimo económico se determina como sigue:
 

Causticidad total para	- DMg final = alcalinidad de so-
dureza de magnesio	dio.

TABLA 14-2 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO PARA REDUCCION DE ALCALINIDADES DE CALCIO Y MAGNESIO; DOSIS DE CAL HIDRATADA O CAL VIVA

	lb/1 000 gal	
	Cal hidratada o cal viva	
	81%	80%
CO <sub>2</sub> libre (ppm CO <sub>2</sub> )	×0.0151	×0.0118
Alc * (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00563	×0.00619
Mg Alc eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00563	×0.00519
Causticidad en el efluente (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00003	×0.00519

\* Si Na Alc está presente y Mg Alc no se reducirá a menos de 80 ppm. la dosis de cal puede reducirse por una cantidad equivalente a Na Alc. lb/1 000 gal × 0.120 = a kg/m<sup>3</sup>.

## 14.6.3 REDUCCION DE Ca Alc Y DCaN

Resultados. Se elimina  $\text{CO}_2$  libre. La alcalinidad de calcio se reduce a 35 ppm y puede efectuarse la remoción de parte o toda la dureza de calcio no carbonato. Se elimina cerca de 10% de dureza de magnesio. La alcalinidad en el efluente es de 35 ppm de alcalinidad de carbonato y el pH es aproximadamente de 10.2.

## Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = cantidad deseada hasta 35 ppm.
- (2) Dureza de magnesio = 90% de DMg.
- (3) Dureza total = DCa + DMg.
- (4) Alcalinidad = 35 ppm.

TABLA 14-3 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO; CLASE I (A); PARA REDUCCION DE ALCALINIDAD DE CALCIO Y DUREZA DE CALCIO NO CARBONATO; DOSIS DE CAL HIDRATADA, CAL VIVA Y SODA ASH REQUERIDA

	(lb/1 000 gal)		
	Cal hidratada 85% Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal viva 90% CaO	Soda ash 88% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
CO <sub>2</sub> libre (ppm CO <sub>2</sub> )	X0.0151	X0.0118	ninguna
Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00863	X0.00519	ninguna
DCaN para ser eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	ninguna	ninguna	X0.00861
10% DMg (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00863	X0.00819	X0.00861

lb/1 000 gal X 0.120 = a kg/m<sup>3</sup>

## 14.6.4 REDUCCION DE Ca Alc, DCaN y DMgN

Resultados. Se elimina el  $\text{CO}_2$ . La dureza de calcio se reduce a 35 ppm. La dureza de magnesio no carbonatado se reduce al límite deseado. La causticidad será la cantidad determinada de la figura 15-5. La alcalinidad restante será alcalinidad de carbonato.

## Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = 35
- (2) Dureza de magnesio = cantidad deseada.
- (3) Dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio.

- (4) Alcalinidad = 35 + causticidad en ppm en el efluente.

TABLA 14-4 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO: CLASE 1 (b): PARA REDUCCION DE ALCALINIDAD Y DUREZA DE NO CARBONATO: DOSIS DE CAL HIDRATADA Y SODA ASH REQUERIDAS

	(lb/1 000 gal)		
	Cal hidratada 93% Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal viva 90% CaO	Soda ash 88% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
CO <sub>2</sub> libre (ppm CO <sub>2</sub> )	×0.0151	×0.0118	ninguna
Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	ninguna
DMgN para ser eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	×0.00901
Causticidad en el efluente (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	×0.00901
DCaN (ppm CaCO <sub>3</sub> )	ninguna	ninguna	×0.00901

lb/1 000 gal × 0.120 = kg/m<sup>3</sup>

## 14.6.5 REDUCCION DE ALCALINIDAD Y DMgN

Resultados. Se elimina el CO<sub>2</sub>. La alcalinidad de calcio se reduce a 35 ppm. La dureza de magnesio puede ser reducida a una cantidad deseada. La causticidad en el efluente puede ser determinada de la Fig. 15-5 y el resto será alcalinidad de carbonato. El pH puede aproximarse de la Fig. 14-5 .

## Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = 35.
- (2) Dureza de magnesio = cantidad deseada.
- (3) Dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio.
- (4) Alcalinidad = 35 + ppm causticidad en el efluente.

TABLA 14-5 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO: CLASE 2: PARA REDUCCION DE ALCALINIDAD Y DUREZA DE MAGNESIO NO CARBONATO: DOSIS DE CAL HIDRATADA Y SODA ASH REQUERIDAS

	(lb/1 000 gal)		
	Cal hidratada 93% Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal viva 90% CaO	Soda ash 88% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Dióxido de carbono libre (ppm CO <sub>2</sub> )	×0.0151	×0.0118	ninguna
Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	ninguna
Mg Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	ninguna
DMgN para ser eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	×0.00901
Aumento de Na Alc (ppm CaCO <sub>3</sub> )	×0.00663	×0.00519	×0.00901

lb/1 000 gal × 0.120 = kg/m<sup>3</sup>



## 14.6.6 REDUCCION DE DCaN

Resultados. Se elimina la acidez mineral. Se elimina  $\text{CO}_2$  libre. Dureza de no carbonato de calcio puede ser reducida a 35 ppm. Se elimina 10% de la dureza de magnesio. La alcalinidad es 35 ppm de alcalinidad de carbonato. pH aproximadamente 10.2.

Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = mínimo 35.
- (2) Dureza de magnesio = 90%  $\text{DMgN}$ .
- (3) Dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio.
- (4) Alcalinidad = 35.

	(lb/1 000 gal)		
	Cal hidratada 33% $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Cal viva 90% $\text{CaO}$	Soda ash 24% $\text{Na}_2\text{CO}_3$
$\text{CO}_2$ libre (ppm $\text{CO}_2$ )	X0.0151	X0.0118	ninguna
Acidez mineral (ppm $\text{CaCO}_3$ )	X0.00663	X0.00519	X0.00901
10% $\text{DMgN}$ (ppm $\text{CaCO}_3$ )	X0.00663	X0.00519	X0.00901
DCaN para ser eliminada (ppm $\text{CaCO}_3$ )	ninguna	ninguna	X0.00901.

lb/1 000 gal X 0.120 = kg/m<sup>3</sup>

14.6.7 REDUCCION DE DCaN Y  $\text{DMgN}$ 

Resultados. La acidez mineral se elimina. El  $\text{CO}_2$  libre se elimina. La dureza de calcio no carbonato se reduce a 35 ppm. La dureza de magnesio no carbonato se reduce a la cantidad deseada. La causticidad puede ser determinada de la Fig. 15-5, y la alcalinidad residual es alcalinidad de carbonato. El pH puede ser determinado de la Fig. 14-5.

Composición del efluente:

- (1) Dureza de calcio = 35.

- (2) Dureza de magnesio = cantidad deseada.  
 (3) Dureza total = dureza de calcio + dureza de magnesio.  
 (4) Alcalinidad = 35 + ppm de causticidad en el efluente.

TABLA 14-7 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO; CLASE 3 (B); PA-  
 RA LA REDUCCION DE DUREZA TOTAL NO CARBONATO; DOSIS DE CAL  
 HIDRATADA Y SODA ASH

	(lb/1000 gal)		
	Cal hidratada 85% Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal viva 90% CaO	Soda ash 96% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
CO <sub>2</sub> libre (ppm CO <sub>2</sub> )	X0.0151	X0.0118	ninguna
Acidez mineral (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00663	X0.00619	X0.00861
DMgN para ser eliminada (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00663	X0.00619	X0.00861
Causticidad en el efluente (ppm CaCO <sub>3</sub> )	X0.00663	X0.00319	X0.00901
DCaN (ppm CaCO <sub>3</sub> )	ninguna	ninguna	X0.00901

lb/1000 gal X 0.120 = kg/m<sup>3</sup>.

TABLA 14-8 SOLUBILIDADES DE BICARBONATOS, CARBONATOS, CLO-  
 RUIROS, HIDROXIDOS Y SULFATOS DE CALCIO, MAGNESIO Y SODIO

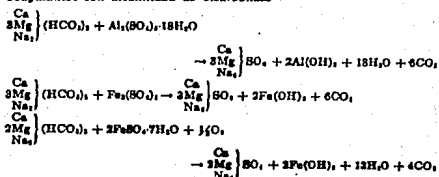
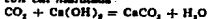
(13)

Nombre	Fórmula	(ppm de CaCO <sub>3</sub> )		(ppm de CaCO <sub>3</sub> )	
		a 32°F	a 212°F	a 32°F	a 212°F
Calcio, bicarbonato de	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1690	Desc.	94.5	Desc.
Calcio, carbonato de	CaCO <sub>3</sub>	15	13	0.9	0.8
Calcio, cloruro de	CaCl <sub>2</sub>	336000	554000	19600	32300
Calcio, hidróxido de	Ca(OH) <sub>2</sub>	2390	888	139	51.8
Calcio, sulfato de	CaSO <sub>4</sub>	1290	1290	75.3	72.9
Magnesio, bicarbonato de	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	37100	Desc.	2170	Desc.
Magnesio, carbonato de	MgCO <sub>3</sub>	101	75	5.9	4.4
Magnesio, cloruro de	MgCl <sub>2</sub>	362000	443000	21100	25600
Magnesio, hidróxido de	Mg(OH) <sub>2</sub>	17	8	1.0	0.5
Magnesio, sulfato de	MgSO <sub>4</sub>	170000	356000	9920	20800
Sodio, bicarbonato de	NaHCO <sub>3</sub>	38700	Desc.	2260	Desc.
Sodio, carbonato de	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	61400	290000	3580	10900
Sodio, cloruro de	NaCl	223000	243000	13100	14200
Sodio, hidróxido de	NaOH	370000	970000	14300	56900
Sodio, sulfato de	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	33600	210000	1970	12300

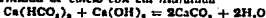
TABLA 14-9 PROCESO CON CAL SODADA EN FRIO: REACCIONES CON CAL EN FRIO, CAL SODADA, CLORURO DE CALCIO CAL. Y BARIO CAL.

(13)

## (1) Coagulantes con alcalinidad de bicarbonato

(2) CO<sub>2</sub> con cal hidratada

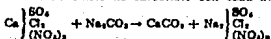
## (3) Alcalinidad de calcio con cal hidratada



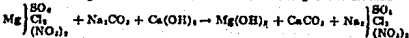
## (4) Alcalinidad de magnesio con cal hidratada



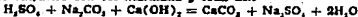
## (5) Dureza de calcio no carbonato con soda ash



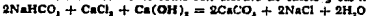
## (6) Dureza de magnesio no carbonato con soda ash y cal hidratada



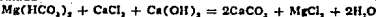
## (7) Acido sulfúrico con cal hidratada y soda ash



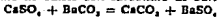
## (8) Alcalinidad de bicarbonato de sodio con cloruro de calcio y cal hidratada



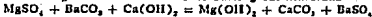
## (9) Alcalinidad de bicarbonato de magnesio con cloruro de calcio y cal hidratada



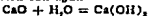
## (10) Sulfato de calcio con carbonato de bario



## (11) Sulfato de magnesio con carbonato de bario y cal hidratada



## (12) Cal viva con agua



## (13) Cal hidratada con soda ash

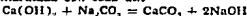


FIGURA 14-5.

CANTIDAD RESIDUAL DE  $\text{Ca}^{++}$ 

(PROCESO CAL - CARBONATO)

(7)

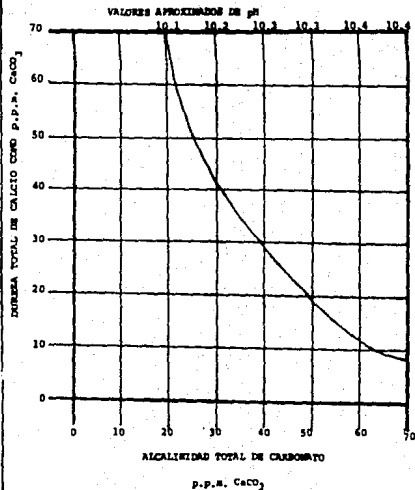


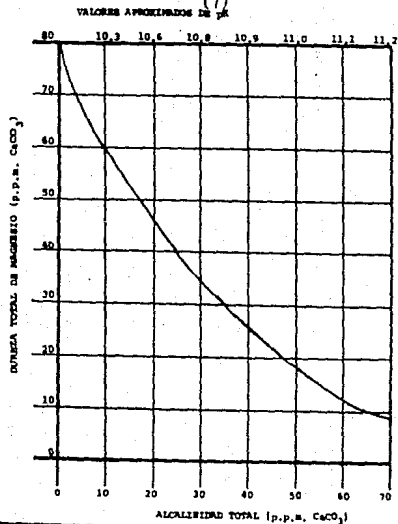
FIGURA 14-6

85

CANTIDAD RESIDUAL DE  $\text{Mg}^{++}$ 

(PROCESO CAL - CARBONATO)

(7)



### 15.1 PROCESO CAL SODADA EN CALIENTE

El proceso de cal sodada en caliente es un proceso continuo en el cual el agua (1) se calienta, (2) se trata con una cantidad dada de reactivos químicos, (3) se asientan y (4) se filtra.

Las sustancias químicas usadas son cal hidratada y soda ash. En lugar de comprar cal hidratada se puede comprar cal viva y se apaga antes de usarse. Cuando se requiere para la eliminación de sílica, puede usarse también cal dolomítica hidratada y/o magnesia activada.

Los precipitados formados con carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  e hidróxido de magnesio  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  que se pueden eliminar por asentamiento y filtración. El grado de ablandamiento que se puede llevar a efecto en este proceso directo cal sodada, con la cantidad usual de reactivos químicos, es una dureza residual de menos de 25 ppm.

El procedimiento de ablandar el agua en caliente, difiere de que es llevado a efecto a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Debido a estas elevadas temperaturas, los procesos en caliente usualmente se limitan a tratamiento de aguas para calderas.

Cualquier cantidad de dureza de magnesio que se remueva en el proceso de ablandamiento eliminará cierta cantidad de sílica. Si ésta es ineficiente, una mayor reducción puede llevarse a efecto usando cal dolomítica o magnesia activada.

De acuerdo con la regla general de que la mayoría de las reacciones químicas aproximadamente doblan su velocidad por cada  $10^\circ\text{C}$  de aumento en la temperatura, las reacciones en el proceso en caliente se efectúan cientos de veces más aprisa que en los procesos cal sodada en frío. También, los precipitados formados a estas temperaturas son mayores y más pesados, y puesto que el agua caliente

es menos viscosa, el asentamiento toma lugar más rápidamente, de manera que en estos procesos no es necesario usar coagulantes. Los procesos en caliente difieren de los procesos en frío, en que no es necesario añadir cal para el contenido de bióxido de carbono libre del agua cruda, ya que éste se desprende por calentamiento del agua antes de que se añadan los reactivos.

### 15.2 EQUIPO USADO EN EL PROCESO CAL SODADA EN CALIENTE

El equipo usado consiste de los siguientes cuatro elementos: (1) dosificador, (2) calentador primario, (3) tanque de asentamiento, (4) filtros. Además, se puede usar un desareador como parte integral del tanque de asentamiento o como una unidad separada.

**Dosificadores químicos.** Los dosificadores usados en el proceso cal sodada en caliente, son, del tipo de operación proporcional húmedos equipados con un agitador mecánico continuo. Cuando se emplea cal hidratada, es práctica usual mezclar la cal y la soda y alimentarlas con el mismo dosificador. Cuando se emplea cal viva, se usa un tanque separado equipado con agitador mecánico para apagar la cal, después de lo cual se añade la cantidad indicada de soda ash y se alimentan juntos al reactor. Este tanque apagador usualmente se encuentra montado sobre el tanque alimentador, de manera que este último puede llenarse por gravedad a partir del tanque superior. En ocasiones este tanque separado también se emplea cuando se usa cal hidratada. Un diseño típico es el alimentador electroquímico. Este alimentador se conecta eléctricamente a un medidor de flujo en la línea de agua cruda, de manera que la dosificación es proporcional al flujo de agua cruda al tanque asentador del reactor.

**Calentador primario, condensador de purga, desareador.** El calentador primario se monta en la parte superior del reactor. El calentador de tipo de rocío es ampliamente usado en estos procesos y prácticamente no presenta problemas de incrustación, aún con aguas

duras que tienen altos contenidos de dureza de bicarbonato. Las válvulas de rocío son de resortes calibrados, de manera que se obtienen buenas eficiencias en todo el rango de calibración. En el calentamiento, usualmente se emplea vapor de desperdicio y la presión más usual es de 4 a 10 lb/plg<sup>2</sup>. El equipo usualmente se basa en una presión de trabajo de 10 lb/plg<sup>2</sup>, pero ocasionalmente se trabaja a 20.

El vapor llena la parte superior del reactor arriba del nivel de agua, al ser rociada el agua en este espacio se calienta, hasta de 2 a 3°C la temperatura del vapor. A esta temperatura, se desprende el bióxido de carbono libre y cualquier cantidad de aire que el agua contenga. Estos gases (nitrógeno, oxígeno y CO<sub>2</sub>) pueden purgarse directamente a la atmósfera a través de la tubería de ventilación, o, preferiblemente, se pasan primero a través del condensador húmedo que está a la cabeza de la tubería de ventilación. Cuando el condensador de purga se usa en estos equipos, parte del agua de compensación pasa por él recuperada, así como calor que de otra manera se desperdiciaría. La tubería de purga se equipa con una válvula estranguladora que se calibra de tal manera que los gases se purgan a la atmósfera desperdiciando sólo una pequeñísima cantidad de vapor.

El calentador primario desaireará a menos de 0.3 ml/l de oxígeno disuelto por litro. Si el agua fría estuviera saturada con aire disuelto a 50°F, esto representa una remoción de más de 96% del oxígeno disuelto. Para instalaciones con calderas de baja presión este grado de desaeración es por lo general suficiente. En la práctica se encontrará que el contenido actual de oxígeno disuelto será entre 0.1 y 0.2 ml/l.

Tanques de asentamiento. El tanque de asentamiento de reacción en el que se efectúa el ablandamiento, es un tanque alto, vertical, construido de acero, con tapa abombada y un fondo cónico invertido, montado en cuatro patas a eficiente elevación para propor-

cionar una presión hidrostática suficiente para la operación adecuada de los filtros. El tamaño del tanque se basa en una capacidad equivalente a aproximadamente un periodo de retención de una hora a flujo máximo, usualmente se provee de una capa de aislante externo para disminuir las pérdidas de calor. Las capacidades se basan en el volumen total del efluente caliente.

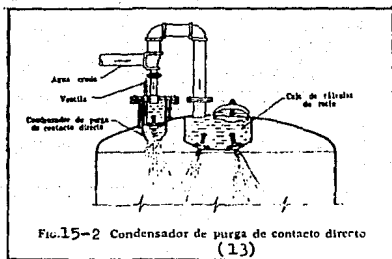
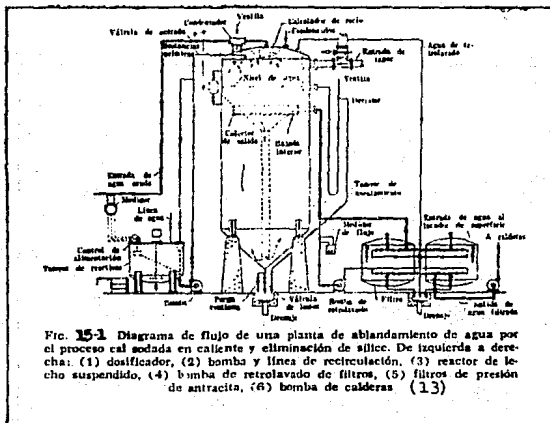
El agua en la parte superior del reactor se calienta rociándola a través de una cámara llena de vapor. Para prevenir la formación de vacío si accidentalmente llegara a faltar el vapor, se proveen con una válvula rompedora de vacío. Las sustancias químicas se añaden al calentador de agua en la parte superior del tanque, donde rápidamente reaccionan con los constituyentes de la dureza, formando flóculos grandes y fácilmente asentables.

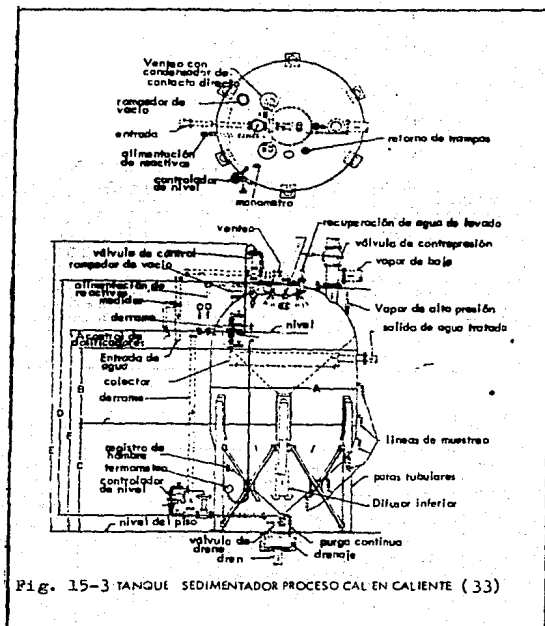
**Filtros.** Los filtros usados en este proceso son filtros de presión, que pueden ser de tipo vertical u horizontal. El medio filtrante más usado en estos tipos de proceso, es antracita graduada y lavada; si se usa grava y arena se disolverá en el agua caliente y alcalina aumentando el contenido de sílice. Otros medios filtrantes que se han usado son la calcita y la magnetita.

### 15.3 ABLANDADORES PARA PROCESOS EN CALIENTE

Básicamente, los ablandadores para procesos en caliente se dividen en dos tipos principales: (1) tipo de lecho suspendido, (2) tipo convencional. Ambos están disponibles en un variado número de diseños, dependiendo del grado de desaserción requerido, de si se deben manejar condensados y agua de compensación, de si se requiere o no tratamiento con fosfatos y si va incluida la eliminación de sílice. El tipo de lecho suspendido se diseñó primeramente para la eliminación de sílice, ya que la filtración a través del lecho de lodos usa las propiedades de remoción de sílice de la magnesia de una manera más eficiente que el tipo convencional. También, igual







que en el proceso cal sodada en frío, hay una mejor utilización de los reactivos y produce un efluente más claro.

#### 15.4 DOSIS DE REACTIVOS

Cal y soda ASH. Estas son las dos sustancias principales que se usan en el proceso en caliente. La cal hidratada de buena calidad contiene aproximadamente 93% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La soda ash de calidad promedio contendrá 99% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , al hacer los cálculos supóngase una pureza de 98%. En la práctica la dosis de reactivos se calculan a partir de estos datos y los ajustes finales se hacen de acuerdo con las determinaciones de alcalinidad al amaranjado de metilo y a la fenolftaleína.

Las dosis aproximadas de reactivos se calculan como sigue:

Donde A = alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  ppm

Mg = dureza de magnesio como  $\text{CaCO}_3$  ppm

H = dureza total  $\text{CaCO}_3$  ppm

$$\text{Cal hidratada (93\% Ca(OH)}_2) \text{ lb/1000 gal de agua} = \frac{A + \text{Mg}}{151}$$

$$\text{Si se usa cal viva (90\% de CaO) lb/1000 gal de agua} = \frac{A + \text{Mg}}{193}$$

$$\text{Lb/1000 gal} \times 0.120 = \text{Kg/m}^3$$

$$\text{Soda ash (98\% Na}_2\text{CO}_3) \text{ lb/1000 gal de agua} = \frac{H - A}{111} + 0.25 \text{ lb}$$

**Tratamiento con cal y yeso.** Si el agua cruda contiene bicarbonato de sodio, los cálculos para la cantidad de cal requerida se llevan a efecto de la misma manera. En tales casos, A - H indicará el número de partes por millón de bicarbonato de sodio presente (expresado como  $\text{CaCO}_3$ ). Para obtener esta cantidad como libras de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  presentes después del tratamiento con cal, se puede usar la siguiente ecuación:

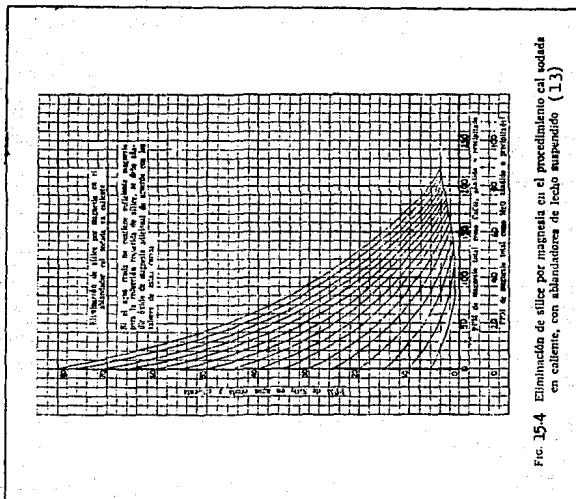
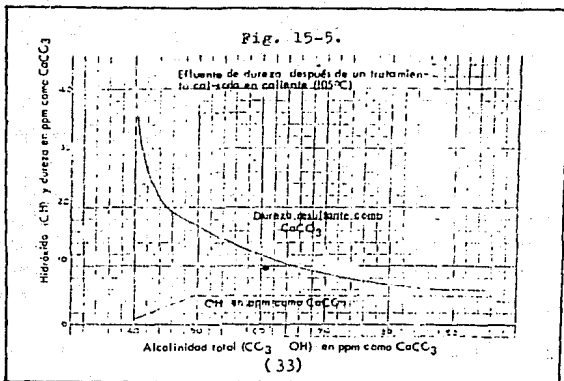
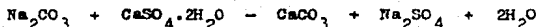


Fig. 15-4 Eliminación de sílice por magnesia en el procedimiento cal sodada en caliente, con ablandadores de lecho suspendido (13)

$$\frac{A - H}{113} = \text{lb Na}_2\text{CO}_3 \text{ por 1000 gal}$$

Si este resultado es menor que 0.25 lb/1000 gal, la diferencia debe duplicarse añadiendo la cantidad requerida de soda ash para mantener el exceso. Si el resultado está arriba de este exceso por gran margen, este exceso debe reducirse a la cantidad correcta añadiendo yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). la reacción es:



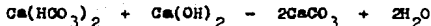
Como una libra de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  requerirá 1.62 lb de yeso, la corrección requerida, por ejemplo, para un agua que en el tratamiento con cal diera 0.45 lb de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , será:

$$(0.45 - 0.25) \times 1.62 = 0.32 \text{ lb de } \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} / 1000 \text{ gal}$$

Cal dolomítica o magnesita. Usando las curvas de la figura 15-4, se pueden estimar las cantidades de magnesio requeridas expresadas como  $\text{CaCO}_3$  ppm, para reducir los contenidos de sílice a las tolerancias requeridas. De esta figura, debe sustraerse la dureza de magnesio del agua (las cantidades inferiores son las correspondientes en  $\text{MgO}$ ).

#### 15.5 REACCIONES QUIMICAS DEL PROCESO DE ABLANDAMIENTO EN CALIENTE

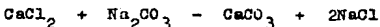
- (1) Alcalinidad de calcio con cal hidratada



- (2) Alcalinidad de magnesio con cal hidratada



- (3) Dureza de no carbonato con soda ash



(4) Dureza de magnesio no carbonato con soda ash y cal hidratada

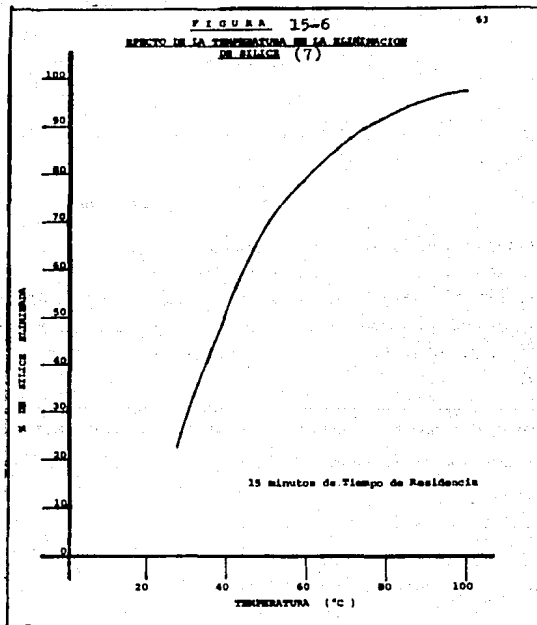
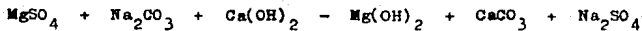


FIGURA 15-7

EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA ELIMINACION DE SILICE (7)

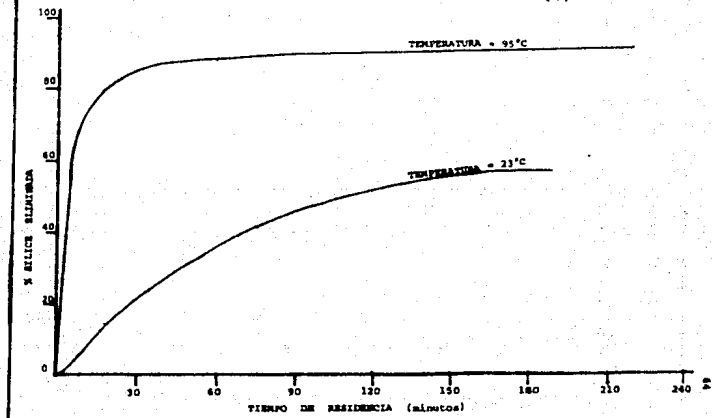
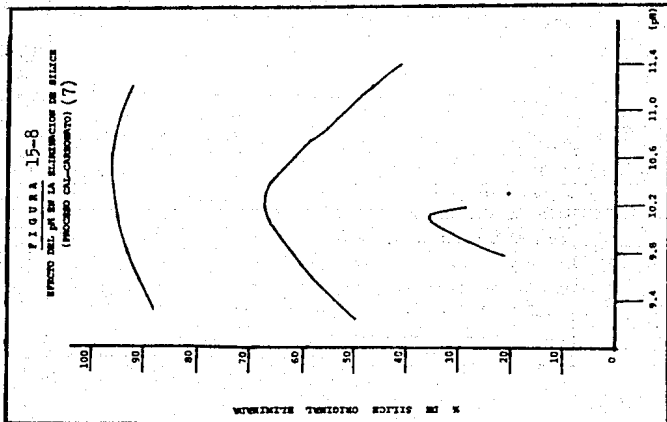


FIGURA 15-8

EFECTO DEL pH EN LA ELIMINACION DE SILICE  
(PROCESO CAL-CARBONATO) (7)

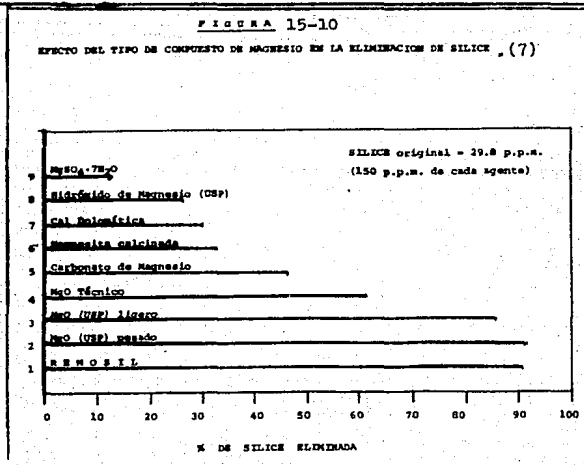
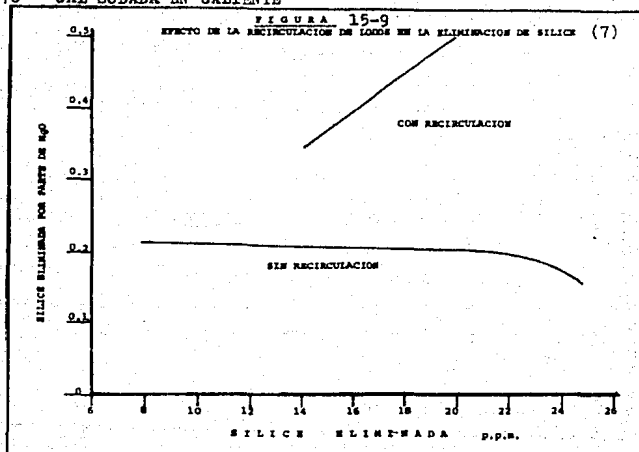




FIGURA 15-11

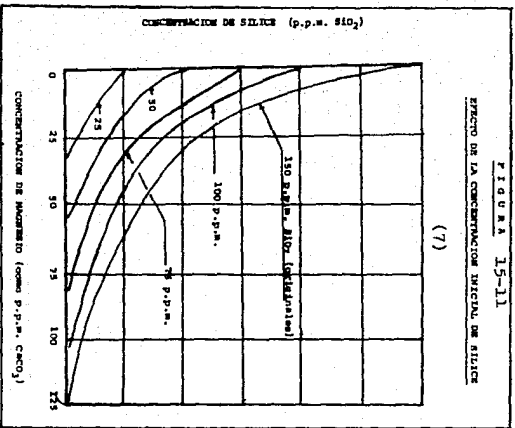
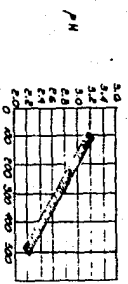
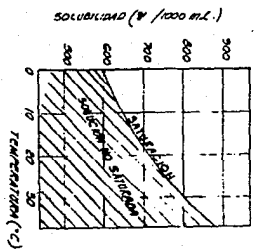
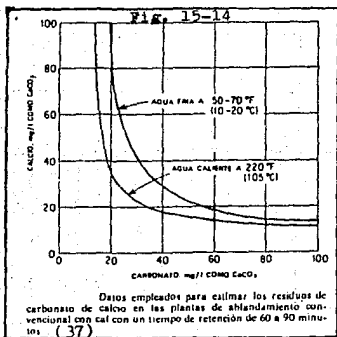
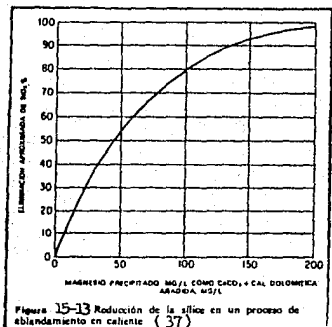


FIG. 15-12



PH DE LAS SOLUCIONES DE SULFATO DE ALUMINIO



## 16.1 FILTRACION

La filtración es una operación unitaria clasificada dentro de las separaciones mecánicas. Implica separar partículas sólidas contenidas en un fluido, por su paso a través de un medio, ya sea poroso, fibroso o granular en el cual, quedan retenidas las partículas.

## 16.2 ASPECTOS GENERALES

El proceso de filtración es usado en tratamiento de agua para remover y reducir los sólidos suspendidos, los cuales: (1) pueden estar presentes en el agua cruda que va a ser tratada ó, (2) puede resultar de los procesos de coagulación ó procesos de precipitación (cal soda en frío o en caliente).

En la filtración se considera que intervienen dos fases. Una integrada por el fluido, ya sea gas ó líquido, y la otra, integrada por el conjunto de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el fluido.

En los procesos de coagulación y precipitación, las partículas más pesadas se remueven antes de la filtración. Sólo partículas pequeñas o ligeras llegan al equipo de filtración. Cuando un filtro recientemente lavado es puesto en operación, muchas de las partículas finas, penetran al lecho filtrante a través de los espacios vacíos de la superficie del lecho. A medida de que los sólidos en suspensión quedan atrapados entre los granos del medio filtrante el flujo es restringido. Entonces, se comensará a formar una capa de materia en suspensión, flóculos, etc., sobre la superficie del medio filtrante.

La penetración de la materia en suspensión en el medio filtrante, es más o menos de 10 cm. La mayor parte del trabajo de filtración es efectuado sobre la superficie o en los primeros 3 centímetros de profundidad del medio filtrante.

Es necesario seleccionar el tamaño de partícula del medio filtrante, para tener suficientes espacios libres en la superficie del medio filtrante, que permita algunos centímetros de penetración de las partículas removidas. Si no hay penetración en el lecho filtrante por el material a removerse, la pérdida de presión se incrementa y el tiempo de operación de equipo disminuye.

### 16.3 MEDIO FILTRANTE

El tamaño de las partículas del medio filtrante es muy importante por lo siguiente:

- a) La materia suspendida en el agua, deberá quedar atrapada en el medio filtrante.
- b) Que la materia atrapada no se compacte y se facilite el contralavado de las unidades.
- c) Que sea capaz de atrapar grandes cantidades de materia en suspensión, sin una compactación.

Para determinar si el medio filtrante, cumple con ciertas características que permitan las condiciones antes mencionadas, se deberá considerar, dos parámetros, llamados tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. Estas mediciones, se efectúan haciendo un análisis de mallas del medio filtrante usando cedazos standard. Los resultados (% retenido en cada malla o cedazo) es graficado contra la apertura de la malla (mm).

### 16.4 TIPOS DE MEDIOS FILTRANTES

Básicamente hay cuatro tipos comunes de medios filtrantes usados en la industria del tratamiento de agua. A continuación se listan, junto con los tamaños típicos que se usan:

#### 16.4.1 ARENA

Es el medio más utilizado para filtración de agua fría, debe estar libre de barro, arcilla u otro material soluble en ácido. Con-

tamina con sílice.

Tamaño efectivo: 0.45 - 60 mm.

Coefficiente de uniformidad: 1.6 máximo.

#### 16.4.2 ANTRACITA

Se usa desde la arena silicea es prohibitiva (ablandamiento con cal-carbonato en caliente). Sus ventajas sobre la arena son: menor densidad y forma irregular, dando como resultado un lecho que no se agrieta y se retrolava con facilidad. Se obtienen ciclos de filtración más largos, tienen mayor capacidad de atrapar turbidez, el flujo de retrolavado es inferior.

Se utiliza para reemplazar otros medios filtrantes en filtros ya usados, obteniéndose flujos mayores. También se utilizan en filtrado de aguas blandas con cal o que contengan Fe y Mn y en filtración de agua caliente para la alimentación a calderas (caliente o fría) para evitar la contaminación de sílice, así como la remoción de sólidos.

Tamaño efectivo: 0.65 - 0.76 mm.

Coefficiente de uniformidad: 1.85.

#### 16.4.3 CARBON ACTIVADO

Se utiliza para absorber desechos orgánicos que dan lugar a color, sabor y olor; así como para absorber el cloro. El carbón activado puede ser soportado por grava graduada o puede ser usado en drenes de doble disco.

El carbón activado puede recibir tratamiento de vapor para eliminar la materia orgánica, sin embargo, el cloro para ser removido del carbón activado deberá someterse a un tratamiento químico.

Tamaño efectivo: 0.35 - 0.50 mm.

Coefficiente de uniformidad: 1.5 típico.

TABLA 16-1

CRITERIOS DE FLUJO DE SERVICIO Y DE RETROLAVADO  
PARA DIFERENTES MEDIOS Y TIPOS DE FILTROS

(38)

TIPO FILTRO O MEDIO FILTRANTE	CONDICIONES DE DISEÑO ( $\text{gpm}/\text{ft}^2$ )	CONDICION DE RETROLAVADO ( $\text{gpm}/\text{ft}^2$ )
Filtro de arena (Sin lavadores de superficie)	5 - 6	15 - 20
Filtro de antracita (O de arena con lavadores de superficie)	5 - 6	12 - 15
Filtro de antracita (Con lavadores de superficie)	5 - 6	12
Filtro de carbón activado	4 - 6	6
Filtro de zeolitas	3 (máximo)	8
Filtro de lecho mixto		5 - 10
Filtros verticales	~ 3	10 - 12
Filtros horizontales	~ 3	10 - 12

TABLA 16-2

ESPECIFICACIONES TÍPICAS DE MEDIOS FILTRANTE

(38)

CAPA	ESPESOR	MATERIAL	TAMAÑO EFECTIVO	COEF. DE UNIFORMIDAD
Arena	12"	Arena	0.45 - 0.50 mm	1.75
	10"	Arena	0.80 - 1.20 mm	
	6"	Grava	1/4" - 1/8"	
	8"	Grava	1/2" - 1/4"	
	4"	Grava	1" - 1/2"	
Antracita	18"	Antracita No.1	0.6 - 0.8 mm	1.75
	9"	Antracita No.2	3/32" - 3/16"	
	9"	Antracita No.4	5/16" - 9/16"	
	4"	Antracita No.6	3/16" - 15/8"	
Carbón activado	30"	Carbón activado	0.35 - 0.50 mm	1.50

TABLA 16-3

ANALISIS DE MALLAS DE UNA MUESTRA DE  
ARENA PARA FILTROS

MALLA	ABERTURA DE LA MALLA, mm.	PESO RETENIDO, GRAMOS	PORCENTAJE MAS FINO QUE
10	1.651	0.0	100.0
14	1.168	0.4	99.6
20	0.853	18.9	80.7
24	0.701	22.6	58.1
28	0.589	24.7	31.4
33	0.495	16.1	15.3
35	0.417	11.4	3.9
42	0.391	2.0	1.1
50	0.279	1.1	0.0
100	0.140	0.0	0.0

American Water Works Association, New York, 1940, p.178.  
Water Quality and treatment, Manual AWWA, 23ed., p.257

TABLA 16-4

MEDIO FILTRANTE DE GRAVA Y ARENA

SEGMENTOS DEL LECHO (1)	ALTURA DEL SEGMENTO	TAMÑO DEL MATERIAL	VOLUMEN EN $ft^3$ PARA CADA DIAM.					
			4'	5'	6'	7'	8'	10'
A	4'	1" - 1 1/2"	4	6	9	13	17	26
B	8'	1/2" - 1"	8	12	18	26	34	52
C	3'	1/4" - 1/2"	4	6	9	13	17	26
D	4'	1/8" - 1/4"	4	6	9	13	17	26
E	10'	0.8 mm - 1.2 mm	10	15	23	32	42	65
F	12'	0.45 mm - 0.5 mm	12	18	27	39	51	78
TOTAL	3' - 6'		42	63	95	136	178	273

(SIVALLS TANK, INC.)

TABLA 16-5

(38)

## PROPIEDADES FISICAS DE VARIOS MEDIOS FILTRANTES

PARAMETROS FISICOS	FILTROS DE ARENA				
	ARENA COMPRIMIDA	FILTROS DE ARENA			ARENA QUARRY
Tamaño del tamiz (mm)	0.5 - 0.422	0.599 - 0.500	0.853 - 0.699	1.676 - 1.405	2.411 - 2.057
Velocidad cm/seg	5.00	6.54	8.10	16.85	20.90
Diámetro hidráulico (mm)	0.38	0.435	0.600	1.185	1.360
Esféricidad	0.83	0.80	0.78	0.765	0.620
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Porosidad	0.464	0.464	0.464	0.39	0.39

(SIVALLS TANK INC.)

TABLA 16-6

## MEDIO FILTRANTE DE ANTRACITA

(38)

SEGMENTOS DEL LECHO (1)	ALTURA DEL SEGMENTO	GRADO Y TAMAÑO DEL MATERIAL	VOLUMEN EN Ft. <sup>3</sup> PARA CADA DIAM.							
			4'	5'	6'	7'	8'	10'	12'	
A	4'	#6 13/16"-15/8"	4	6	8	13	17	26	37	
B	9'	#4 5/16"-9/16"	9	15	21	29	38	59	83	
C	9'	#2 3/32"-3/16"	9	15	21	29	38	59	83	
D	1' - 0"	#1 0.6 mm-0.8 mm	18	30	42	58	76	118	166	
TOTAL	3' - 4"		40	66	92	129	169	262	369	



TABLA 16-7.

ESPECIFICACIONES DE FILTROS POR CARBÓN ACTIVADO

(38)

%

A través de 20 mallas	0 - 3
A través de 20 mallas y sobre 30 mallas	40 - 55
A través de 30 mallas y sobre 40 mallas	30 - 50
A través de 40 mallas y sobre 50 mallas	5 - 12
A través de 50 mallas	0 - 1

Densidad de carbón activado	30 lb/ft <sup>3</sup>
Velocidad de filtración:	
capac. pequeña	4 gpm/ft <sup>2</sup>
capac. grande	6 gpm/ft <sup>2</sup>
Velocidad de retrólavado	6 gpm/ft <sup>2</sup>
Carga/año de servicio	1
Altura de lecho de carbón activado (soportado en capas de grava)	24" - 36"

TABLA 16-8

ESPECIFICACIONES PARA FILTROS DE ZEOLITAS

(RENDICION DE Fe y Mn)

(38)

Máximo de remoción de Fe y Mn	1 ppm
Flujo mínimo (filtro a presión)	3 gpm/ft <sup>2</sup>
Flujo mínimo de retrólavado	8 gpm/ft <sup>2</sup>
Presión que indica inicio de retrólavado	5 - 8 psi
Regeneración	5 - 20 días.

**TABLA 16-9**  
**FLUJO DE RETROLAVADO PARA FILTROS CON MEDIO**  
**FILTRO MIXTO (MIXED MEDIA INC.)**

(38)

TEMPERATURA	4 COMPONENTES	3 COMPONENTES
90 °F	22 gpm/ft <sup>2</sup>	21 gpm/ft <sup>2</sup>
70 °F	19 gpm/ft <sup>2</sup>	17 gpm/ft <sup>2</sup>
60 °F	18 gpm/ft <sup>2</sup>	15 gpm/ft <sup>2</sup>

TABLA 16-10

MEDIOS FILTRANTES

(38)

ESPECIFICACIONES COMUNES DE MEDIOS FILTRANTES MIXTOS

(ALTURA DE LECHO: 30")

## ALTERNATIVAS

a) 3 componentes:	carbón	55 %	60 %	65 %
	arena sílica	30 %	30 %	30 %
	arena alta densidad	15 %	10 %	5 %
b) 4 componentes:	carbón de baja densidad	30 %	30 %	35 %
	carbón	25 %	30 %	30 %
	arena sílica	30 %	30 %	30 %
	arena alta	15 %	10 %	5 %

#### 16.4.4 NEUTRALITA

La neutralita es carbonato de calcio procesado. Se usa cuando las aguas a filtrar son corrosivas, ya que aumenta el pH.

La siguiente reacción se lleva a cabo en presencia de  $\text{CO}_2$ :



Tamaño efectivo: 0.38 - 0.68 mm.

Coefficiente de uniformidad: 1.4 típico.

#### 16.5 CLASIFICACION DE LAS PARTICULAS SUSPENDIDAS

Las partículas sólidas que se retienen pueden ser:

- a) Gruesas o finas.
- b) Rígidas o plásticas.
- c) Redondas o alargadas.
- d) Individuales separadas o agregadas.
- e) Orgánicas e inorgánicas.

#### 16.6 CLASIFICACION DE FILTROS

La filtración puede efectuarse en muchas formas; con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos); en medios porosos (pastas arcillosas, papel filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados); con flujo ascendente, descendente o mixto; y por último, los filtros pueden trabajar a presión o por gravedad.

##### 16.6.1 FILTROS DE PRESION

Los filtros de presión se fabrican en el tipo vertical y horizontal. Los filtros están formados por una coraza metálica cilíndrica con tapas abombadas que contienen una capa de medio filtrante (arena o antrafilt) soportado por capas de grava o antrafilt, equipados con los accesorios necesarios para llevar a efecto las opera-

TABLA 16-11

CAPAS DE MEDIO FILTRANTE PARA FILTROS A PRESION

(DE LA PARTE SUPERIOR A LA INFERIOR)

(38)

FILTROS VERTICALES

MEDIO FILTRANTE	CARACTERISTICA	ALTURA DE LECHO	TAMANO EFECTIVO
Grava y arena	arena fina	12"	0.45 - 0.55 mm
	arena gruesa	10"	0.80 - 1.20 mm
	grava delgada	6"	1/8" - 1/6"
	grava mediana	6"	1/4" - 1/2"
	grava gruesa	8"	1/2" - 3/4"
Antracita	antracita No.1	18"	0.55 - 0.65 mm
	antracita No.2	9"	3/32" - 3/16"
	antracita No.4	9"	5/16" - 9/16"
FILTROS HORIZONTALES			
Grava y arena	antracita No.1	18"	0.55 - 0.65 mm
	arena fina	10"	0.80 - 1.2 mm
	grava delgada	6"	1/8" - 1/6"
	grava mediana	6"	1/4" - 1/2"
	grava gruesa	8"	1/2" - 3/4"
Antracita	antracita No.1 (fina)	18"	0.40 - 0.60 mm
	antracita No.1 (gruesa)	6"	1.0 mm
	antracita No.2	6"	3/32" - 3/16"
	antracita No.4	6"	5/16" - 9/16"
	antracita No.5	6"	9/16" - 13/16"
	antracita No.6	6"	13/16" - 15/16"

TABLA 16-12 FILTROS HORIZONTALES: AREAS, RETROLAVADO Y VELOCIDAD DE FILTRACION DE UNIDAD SIMPLE Y BATERIAS DE 3 A 8 UNIDADES, DE 2.5 M DE DIAMETRO A UNA VELOCIDAD DE FILTRACION DE 3 GPM/PIE

(13)

Longitud	Unidades simples			Flujo total por bateria (gpm)				
	Area (Pies <sup>2</sup> )	Retrolavado (gpm)	Flujo (gpm)	3 Unidades	3 Unidades	4 Unidades	5 Unidades	8 Unidades
10'6"	67	810	201	400	600	800	1000	1200
12'2"	79	960	237	475	710	1050	1195	1420
14'2"	93	1140	253	570	855	1140	1425	1710
16'5"	109	1300	327	655	960	1310	1635	1960
18'3"	124	1460	375	745	1115	1490	1800	2230
20'2"	137	1600	411	820	1235	1645	2055	2465
25'0"	172	2000	516	1030	1550	2065	2560	3095

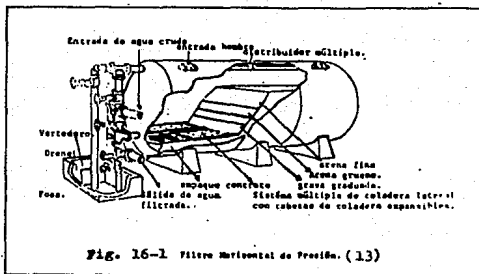


TABLA 16-13  
FILTROS HORIZONTALES

(13)

DIAMETRO	LONGITUD	VELOCIDADES DE FILTRACION															
		1 gal/ft <sup>2</sup> /min		1.5 gal/ft <sup>2</sup> /min		2 gal/ft <sup>2</sup> /min		2.5 gal/ft <sup>2</sup> /min		3 gal/ft <sup>2</sup> /min		3.5 gal/ft <sup>2</sup> /min		4 gal/ft <sup>2</sup> /min			
		min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora		
8' - 0"	10' - 0"	67	420	101	660	134	804	168	1008	201	1206	235	1410	268	1608		
8' - 0"	12' - 0"	79	474	119	714	158	948	198	1188	237	1422	277	1662	318	1908		
8' - 0"	14' - 3"	95	570	143	854	190	1140	238	1416	285	1710	332	1998	380	2280		
8' - 0"	16' - 3"	109	654	164	984	218	1308	273	1638	327	1962	382	2292	434	2574		
8' - 0"	18' - 3"	124	744	180	1116	240	1440	310	1860	372	2220	434	2598	496	2976		
8' - 0"	20' - 0"	137	810	206	1236	274	1644	343	2058	411	2466	480	2880	548	3288		
8' - 0"	25' - 0"	172	1032	258	1560	354	2124	350	2100	516	3096	602	3612	680	4188		

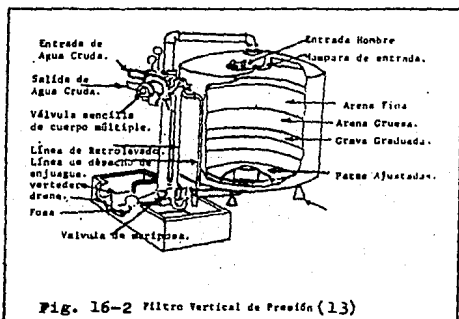


TABLA 16-14

CARACTERÍSTICAS DE FILTROS A PRESION CON FLUJOS DE 3 gpm/ft<sup>2</sup> (13)

## FILTROS VERTICALES

DIAMETRO p	AREA (ft <sup>2</sup> )	UNIDADES SIMPLES		FLUJO TOTAL POR BATERIA (gpm)				
		RETROALAMADO (gpm)	FLUJO (gpm)	2	3	4	5	6
30	4.9	49	15	30	45	60	75	90
36	7.1	70	21	42	63	85	105	125
42	9.6	96	29	58	87	115	145	175
48	12.6	126	38	75	113	150	190	225
54	15.9	159	48	95	143	190	240	285
60	19.6	196	59	118	177	235	295	355
66	23.8	238	71	143	215	285	375	430
72	28.3	283	85	170	255	340	425	510
78	33.2	332	100	200	300	400	500	600
84	38.5	385	116	230	350	460	580	695
90	44.2	442	133	265	400	530	665	795
96	50.3	503	150	300	450	605	755	905
102	56.8	568	170	340	510	680	850	1020
108	63.6	636	190	380	570	765	955	1145
120	78.5	785	235	470	705	945	1180	1415

TABLA 16-15

RELACIONES DE FILTRACION PARA FILTROS VERTICALES

(38)

VELOCIDADES DE FILTRACION

DIAMETRO Ø (in.)	1 g/ft <sup>2</sup>		1.5 g/ft <sup>2</sup>		2 g/ft <sup>2</sup>		2.5 g/ft <sup>2</sup>		3 g/ft <sup>2</sup>		3.5 g/ft <sup>2</sup>		4 g/ft <sup>2</sup>	
	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora	min	hora
30	4.9	294	7.33	441	9.0	540	11.25	735	14.7	882	16.33	975	19.6	1176
36	7.1	426	10.66	640	12.1	727	17.75	1065	21.3	1278	24.66	1480	29.4	1764
42	9.0	540	13.50	810	15.2	912	21.0	1260	25.5	1530	28.66	1720	34.2	2052
48	12.6	756	18.90	1134	22.2	1332	27.5	1650	33.0	1980	36.66	2200	43.8	2628
6	15.0	900	22.50	1350	26.1	1566	30.75	1845	37.5	2250	41.33	2480	49.5	2970
66	19.6	1176	29.40	1764	35.1	2106	40	2520	48.0	2880	54.66	3280	65.4	3924
66	23.8	1428	35.70	2142	42.6	2556	50.5	3030	57.0	3420	63.33	3800	76.2	4572
72	26.1	1566	42.15	2529	46.6	2796	56.75	3345	62.5	3750	69.33	4160	83.4	5004
72	33.2	1992	54.00	3240	64.6	3876	75.5	4530	81.0	4860	93.66	5620	111.6	6696
96	38.5	2310	61.75	3705	72.0	4320	86.25	5115	93.5	5610	105.66	6340	126.6	7596
96	45.2	2712	72.60	4356	86.6	5196	107.50	7080	120.0	7200	138.66	8300	151.2	9072
96	50.2	3012	78.90	4734	94.6	5676	115.75	7522.5	130.0	7800	149.66	8980	162.6	9756
120	54.0	3240	81.00	4860	112.0	6720	132.0	8520	150.0	9000	170.66	10240	207.0	12420
120	63.6	3816	95.40	5724	127.1	7626	150	9000	168.0	10080	201.66	12100	241.2	14472
144	76.0	4560	110.25	6615	141.0	8460	172.25	10552.5	192.0	11520	234.66	14080	289.2	17352
120	78.5	4710	117.33	7038	137.0	8220	174.25	11172.5	202.5	12150	239.66	14380	314	18840

TABLA 16-16

CARACTERÍSTICAS DE FILTROS A PRESION

(38)

FILTRO VERTICAL	GPM	63	100	143	193	251	320	348
DIAMETRO, Ft		6	5	6	7	8	9	10
ALTEZA		8'-0"	8'-0"	8'-0"	8'-0"	10'-0"	10'-0"	10'-0"
PESO	lbs	11,100	12,650	15,850	17,400	20,700	21,750	25,100
FILTRANTE	ft <sup>2</sup>	12.6	12.6	12.3	20.2	20.2	53.6	28.5
CONEXION AL BARRIL		CONEXION AL BARRIL						
INSTRUMENTOS Y EQUIPAMIENTO		INSTRUMENTOS Y EQUIPAMIENTO						
VALVULAS		VALVULAS						
INTERCONEXION DE FUENTES		INTERCONEXION DE FUENTES						
FLUJO DE FILTRACION	con (20' ft)	215	333	470	611	733	1080	1330

NOTAS:

1. Controla automaticamente.
2. 120 v. 60 Hz. 20 amps. 1Ø.
3. Requerimiento de area: 1.5 ft<sup>2</sup>/min @ 50 psig por filtro.

(© 1975 Tank Inc.)

ciones de (1) filtración, (2) retrolavado, y (3) enjuague. Los filtros verticales varían de 30 cm a 3 m de diámetro, y tienen capacidades de 2.5 a 235 gpm a una velocidad de filtración de 3 gpm/ft<sup>2</sup> de superficie filtrante. La altura de los filtros verticales es usualmente de 1.60 m en la parte cilíndrica, aunque ocasionalmente se usan de 1.20 m. Los filtros horizontales tienen 2.5 m de diámetro y su longitud varía de 3.5 a 8.5 y tienen capacidades de 20l a 516 gpm.

Cuando un filtro se pone en operación de filtrado, por algunos minutos el agua que se filtra se manda al drenaje. Esto se debe a que una buena acción filtrante no se asegura sino hasta después de que el lecho filtrante se haya compactado y se acumule en su superficie una pequeña cantidad de flóculos. La eficiencia de la filtración se chequea fácilmente tomando muestras y viendo su claridad. Tan pronto como el efluente sea claro, se deja de mandar agua al drenaje y el filtro se pone en línea. Los filtros de presión generalmente se operan a 3 gpm/ft<sup>2</sup> de área de filtración. La operación de filtrado se continúa hasta que los indicadores de pérdida de carga muestran que se deben retrolavar los filtros. Usualmente los filtros no se lavan antes de que haya una pérdida de carga de 5 lb/plg<sup>2</sup>, y raramente se continúan operando más allá de las 8 lb/plg<sup>2</sup> de pérdida. El flujo mínimo para retrolavar un filtro de presión son 10 gpm/pie<sup>2</sup>, y se prefieren flujos más altos. El retrolavado se lleva a cabo durante 8 o 10 minutos.

#### 16.6.2 FILTROS DE GRAVEDAD

Para las aplicaciones industriales generalmente se operan a 3 gpm/pie<sup>2</sup>; en la práctica municipal se emplea una velocidad de filtración de 2 gpm/pie<sup>2</sup>.

Los filtros convencionales a gravedad son unidades usadas para filtrar flujos a gravedad de agua, y los cuales incorporan un conjunto de válvulas para efectuar las operaciones de los funciones



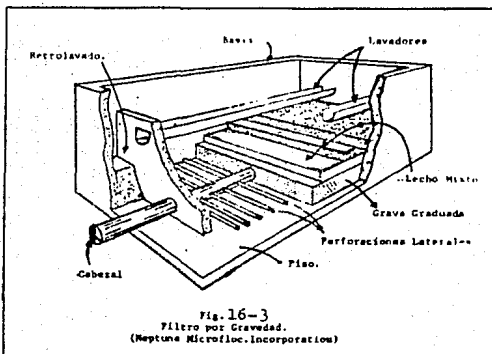


TABLA 16-17

## CAPAS DE MEDIO FILTRANTE PARA FILTROS POR GRAVEDAD

(38)

MEDIO FILTRANTE	CARACTERISTICA	ALTURA DE LECHO	TAMANO EFECTIVO
Grava y arena	grava	4"	1/4" - 1/2"
	grava	5"	1/2" - 1"
	grava	5"	1" - 1 1/2"
	grava	4"	3/32" - 3/16"
	arena gruesa	6"	0.8 - 0.12 mm
	arena fina	24"	0.4 - 0.5 mm
	antracita No. 6	5"	13/16" - 1 5/8"
	antracita No. 5	5"	9/16" - 13/16"
	antracita No. 4	4"	5/16" - 9/16"
	antracita No. 3	4"	3/16" - 5/16"
antracita No. 2	6"	3/32" - 3/16"	
antracita No. 1	24"	0.55 - 0.65	

188 FILTRACION

TABLA 16-18 TAMAROS Y DATOS SUGERIDOS PARA PLANTAS DE FILTRACION POR GRAVEDAD CUYAS CAPACIDADES VARIAN DE 70 000 A 5 000 000 GPD (13)

Capacidad de la planta		Datos generales						Tamaño de válvulas y controladores						Lavadores de superficie		
(ftm)	(msd)	Número de filtros	Tamaño	Área (ft <sup>2</sup> )	Velocidad de fluj. (ftm/ft <sup>2</sup> )	Retención (min)	Válvula de entrada	Válvula de salida y controlador	Válvula de retención	Válvula de controlador	Válvula de limpieza	Número	Radio (calentado)	Tamaño de retículo	Presión en las espesas (lb/ft <sup>2</sup> )	
2 gpm/ft <sup>2</sup>																
50	0.07	1	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	13 1/2"	50	
75	0.11	1	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	11 1/2"	50	
100	0.14	2	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	13 1/2"	50	
150	0.22	2	50" X 70"	37.5	2	750	4"	3"	8"	8"	3"	1	2'3"	11 1/2"	50	
200	0.29	2	50" X 90"	54	1.85	1000	5"	3"	8"	8"	3"	1	2'9"	2"	50	
250	0.36	2	70" X 100"	75	1.67	1500	5"	4"	10"	10"	4"	1	3'0"	2"	50	
300	0.43	2	70" X 100"	75	2.0	1500	6"	5"	10"	10"	4"	1	3'0"	2"	50	
350	0.50	2	50" X 110"	88	1.99	1700	6"	5"	10"	10"	4"	1	3'9"	2 1/2"	50	
400	0.58	2	90" X 120"	108	1.85	2100	6"	6"	10"	12"	4"	1	4'3"	3"	50	
500	0.73	2	90" X 140"	126	1.08	2520	8"	6"	12"	12"	5"	1	4'3"	2"	50	
600	0.86	2	100" X 150"	150	2.0	3000	8"	8"	12"	14"	5"	2	3'0"	3"	50	
700	1.00	2	120" X 150"	180	1.94	3600	8"	8"	12"	14"	5"	1	5'0"	4"	75	
870	1.23	2	120" X 180"	216	2.01	4320	10"	8"	14"	14"	6"	2	4'3"	4"	75	
1040	1.50	2	120" X 210"	252	2.00	5040	10"	8"	16"	16"	6"	2	4'9"	4"	50	
1390	2.00	4	120" X 150"	180	1.93	3600	8"	8"	12"	14"	5"	1	5'0"	4"	75	
1740	2.50	4	120" X 180"	216	2.01	4320	10"	8"	14"	14"	6"	2	4'3"	4"	50	
2090	3.00	4	120" X 210"	252	2.00	5040	10"	8"	16"	16"	6"	2	4'9"	4"	50	
2780	4.00	4	150" X 210"	300	1.53	7200	12"	10"	20"	20"	8"	2	5'0"	5"	50	
3470	5.00	4	180" X 240"	432	2.00	8640	12"	12"	24"	24"	8"	4	4'3"	5"	50	

2 gpm/ft <sup>2</sup>															
50	0.07	1	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	13 1/2"	50
75	0.11	1	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	11 1/2"	50
100	0.14	2	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	13 1/2"	50
150	0.22	2	50" X 50"	25	2	500	4"	3"	6"	6"	2"	1	2'3"	11 1/2"	50
200	0.29	2	50" X 70"	37.5	2.68	750	5"	3"	8"	8"	3"	1	2'3"	11 1/2"	50
250	0.36	2	50" X 90"	45	2.78	900	5"	4"	8"	8"	3"	1	2'9"	2"	50
300	0.43	2	60" X 90"	54	2.78	1080	6"	5"	8"	8"	3"	1	2'9"	2"	50
350	0.50	2	60" X 110"	66	2.65	1320	6"	5"	8"	10"	4"	1	3'0"	2"	75
400	0.58	2	70" X 100"	75	2.67	1500	6"	6"	10"	10"	4"	1	3'6"	2"	50
500	0.73	2	80" X 110"	88	2.84	1760	8"	6"	10"	10"	4"	1	3'9"	2 1/2"	50
600	0.86	2	90" X 120"	108	2.78	2160	8"	8"	10"	12"	4"	1	4'3"	3"	50
700	1.00	2	90" X 130"	117	2.92	2310	8"	8"	10"	12"	4"	1	4'3"	3"	50
870	1.25	2	100" X 150"	150	2.9	3000	10"	8"	12"	14"	5"	2	3'0"	3"	50
1040	1.50	2	120" X 150"	180	2.80	3600	10"	8"	12"	14"	5"	1	4'3"	3"	75
1390	2.00	4	90" X 130"	117	2.92	2310	8"	8"	10"	12"	4"	1	4'3"	3"	50
1740	2.50	4	100" X 150"	150	2.91	3000	10"	8"	12"	14"	5"	2	3'0"	3"	50
2090	3.00	4	120" X 150"	180	2.89	3600	10"	8"	12"	14"	5"	1	4'3"	3"	75
2780	4.00	4	120" X 210"	252	2.76	5040	12"	10"	16"	16"	6"	2	4'9"	4"	50
3470	5.00	4	180" X 210"	315	2.70	6300	12"	12"	18"	18"	6"	2	5'0"	4"	75

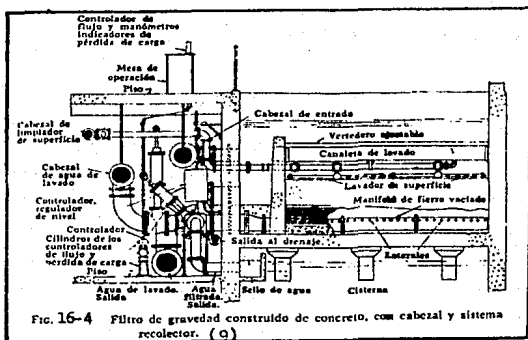


TABLA 16-19

ESPECIFICACIONES DE FILTROS DE ALTA VELOCIDAD

(38)

ft x h	PRESION PERMISIBLE (psi)	gpd AGUA (1)	gpm DE AGUA DE RETROLAVADO ARENA Y GRAVA	CONEXION ENT Y SAL (2)	LIBRAS
4' x 5'	40,75,100	1080	100	4"	1400
5' x 5'	40,75,100	1680	300	4"	1600
6' x 5'	40,75,100	2400	425	4"	2150
7' x 5'	40,75,100	3300	575	4"	2650
8' x 5'	40,75,100	4300	750	4"	3200
10' x 5'	40,75	6700	1180	6"	5500
12' x 5'	40	9400	1700	6"	10800

- (1) Capacidad basada en una velocidad de 2.5 gpm/ft<sup>2</sup> de sección.  
 (2) Las conexiones standard son uniones.

de filtración, contralavado y enjuague. Estas unidades pueden fabricarse en concreto, acero o madera, pero el concreto es el material que más se usa. También, la forma más usada es la rectangular.

### 16.6.3 FILTROS AUTOMATICOS SIN VALVULA

El último tipo de filtro de gravedad es el tipo **automático sin válvulas**. Este filtro efectúa automáticamente todas las operaciones del ciclo sin usar válvulas, manómetros, indicadores u otros controles eléctricos.

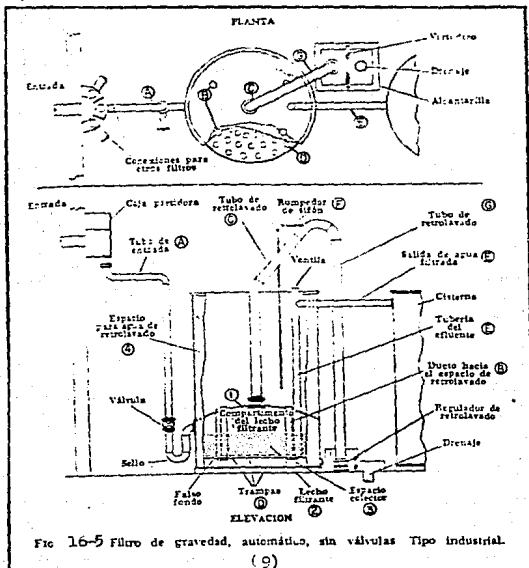


TABLA 16-20 FILTRACION RAPIDA Y LENTA (38)

SEGUN LA VELOCIDAD DE FILTRACION	SEGUN EL MEDIO FILTRANTE	SEGUN EL SENTIDO DEL FILTRO	SEGUN LA CARGA SOBRE EL LECHO
<b>RAPIDOS</b> 120-360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día	1) ARENA (h <sup>*</sup> = 60-75 cm)	ASCENDENTE	FOR GRAVEDAD
	2) ANTRACITA (h = 60-75 cm)	DESCENDENTE	FOR PRESION
<b>LENTOS</b> 7-14 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día	3) MIXTOS: a) ANTRACITA, (h = 50-60 cm) b) ARENA, (h = 15-20 cm)	FLUJO MIXTO	
	4) MIXTOS: a) ARENA, b) ANTRACITA, c) GRANATE	DESCENDENTE ASCENDENTE	FOR GRAVEDAD

\* h: ESPESOR DEL LECHO.

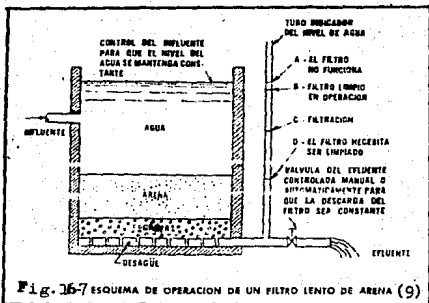
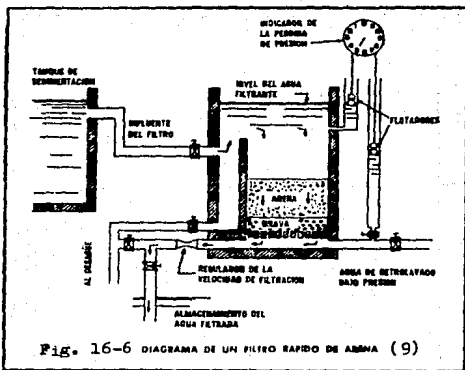


TABLA 16-21 TIPO DE FILTROS (33)

TIPOS DE FILTROS	FLUJOS			DURACION		
	SERVICIO LPM/m <sup>2</sup>	LAVADQ LPM/m <sup>2</sup>	ENJUAGUE LPM/m <sup>2</sup>	SERVICIO mH <sub>2</sub> O	LAVADO min.	ENJUAGUE min.
<b>CONVENCIONALES</b>						
<b>A GRAVEDAD</b>						
a) MUNICIPAL	80	800	80	2.4	10	10
b) INDUSTRIAL	120	800	120	2.4	10	10
<b>A PRESION</b>						
a) MUNICIPAL	80	400	80		10	10
b) INDUSTRIAL	120	400	120	5.4	10	10
<b>AUTOMATICOS SIN VALVULAS</b>						
<b>A GRAVEDAD</b>						
a) MUNICIPAL	80	840	80	1.5	5	25
b) INDUSTRIAL	120	840	120	1.5	5	15
<b>PURIFICADORES</b>						
	80	240	80	5.4	10	5

TABLA 16-22

INTERVALO DE CAPACIDADES DE FILTROS COMERCIALES (38)

TIPO	VELOCIDAD (gpm/ft <sup>2</sup> )	AREA (ft <sup>2</sup> )	FLUJO (gpm)	FABRICANTE	
Por gravedad	2 - 4	hasta 500		Faulder - Permutit	
	2 - 6			Fuller - Inflico	
	2 - 4			Pelletier - Degremont	
Por gravedad sin válvula	2 - 3		38 - 154	Faulder - Permutit	
	3		38 - 942	Crane - Cochrane	
A presión vertical	2 - 3	hasta 113		Faulder - Permutit	
	2 - 4			2 - 380	Crane - Cochrane
	1 - 4			4.9 - 314	Graver
	2 - 4				Pelletier - Degremont
	2 - 3				Faulder - Permutit
A presión horizontal	2 - 4	hasta 200	149 - 910	Crane - Cochrane	
	1 - 4	71 - 129	67 - 688	Graver	
	2 - 4			Pelletier - Degremont	
	1 - 4				

### 17.1 INTERCAMBIO IONICO

El intercambio iónico remueve de una agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico, 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 tiene la capacidad limitada para almacenar iones en un esqueleto, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material de intercambio en condición útil. Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio.

Los intercambiadores de iones para ser efectivos deben cumplir con:

1. El intercambiador de iones, debe primeramente estar compuesto por una estructura sólida insoluble en el agua.
2. Un grupo polar iónico debiera formar parte de la estructura sólida.
3. Un ión intercambiable el cual neutraliza la carga en el grupo polar (usualmente sodio, hidrógeno u oxhidrilo), formando parte del intercambiador de iones. Si el grupo es polar positivo, entonces el ion intercambiable es negativo, tendremos un intercambiador aniónico. Por el contrario, tendremos un intercambiador catiónico. Cada resina por lo tanto, tendrá una porción catiónica y aniónica. En las resinas catiónicas, todos los cationes están libres. La porción aniónica no puede disolverse en el agua y por lo tanto, no es libre. En una resina aniónica se presenta el proceso inverso y solo la porción aniónica está libre.



Tabla 17-1 ORDEN GENERAL DE LA SELECTIVIDAD DE IONES EN  
AGUA POR DEBAJO DE 1 000 mg/l STD (37)

CATIONES	ANIONES
$Fe^{+3}$	$CrO_4^{-2} \times$
$Al^{+3}$	$SO_4^{-2} \times$
$Pb^{+2}$	$SO_3^{-2} \times$
$Ba^{+2}$	$HPO_4^{-2} \times$
$Sr^{+2}$	$CNS^{-}$
$Cd^{+2}$	$CNO^{-}$
$Zn^{+2}$	$NO_3^{-}$
$Cu^{+2}$	$NO_2^{-}$
$Fe^{+2}$	$Br^{-}$
$Mn^{+2}$	$Cl^{-}$
$Ca^{+2}$	$CR^{-}$
$Mg^{+2}$	$HCO_3^{-}$
$K^{+1}$	$HSiO_3^{-}$
$NH_4^{+}$	$OH^{-}$
$Na^{+}$	$F^{-}$
$H^{+}$	
$Li^{+}$	

\* Estos pueden ser desplazados cuando son protonados a pH bajo, a:

NOTAS: Pueden ocurrir cambios en la posición entre productos de manufatura diferentes o que tienen esqueletos o grupos ligeramente distintos. En general la selectividad está afectada por:

- La valencia iónica;  $3 > 2 > 1$
- El número atómico;  $Ba > Sr > Ca > Mg$  en el grupo IIA.
- Radio iónico hidratado: cuanto mayor sea el radio, tanto menores son la selectividad y la capacidad de intercambio.

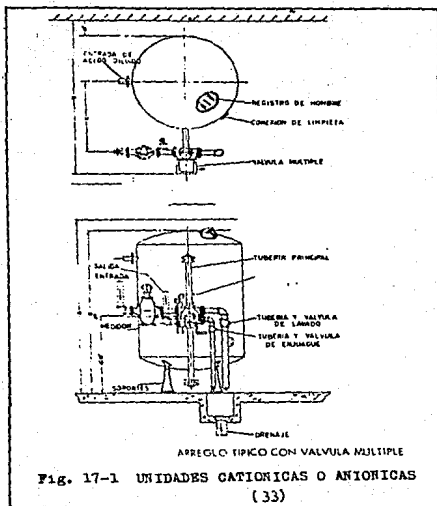


TABLA 17-2

DATOS DE DISEÑO PARA INTERCAMBIADORES IONICOS EN LECHO FIJO (38)

TIPO DE RESINA	FLUJO MAXIMO gpm/ft <sup>2</sup>		ALTURA DE LECHO min (in)	TEMPERATURA MAX OP (°F)	CAPACIDAD Kgr/ft <sup>3</sup> CaCO <sub>3</sub>	REGENERANTE
	MAX	MIN				
Catiónica débilmente ácida	8	1-2	24-30	250	11-60	HCl ó H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (110%)
Catiónica fuertemente ácida.	7-12	1-2	24-30	250	18-32 11-20 15-30	5-5 lb NaCl 2-12 lb H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 66 °Ba 5-30 lb HCl 20 °Ba
Aniónica débil o intermedia.	4-7	1-2	30-36	100	18-24	2-4 lb NaOH
Aniónica fuertemente básica.	5-7	1-2	30-36	100-120	8-16	4-8 lb NaOH
Catiónica mixta y aniónica fuertemente básica.	8-12		36-48	100	5-8	Los mismos que catiónicos y aniónicos individuales.

En el intercambio iónico existen dos grupos de intercambiadores de iones:

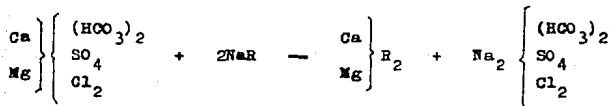
1. Intercambiador Catiónico.
2. Intercambiador Aniónico.

## 17.2 INTERCAMBIADORES CATIONICOS

Los intercambiadores catiónicos a su vez se dividen en intercambiadores catiónicos ciclo sódico e intercambiadores catiónicos ciclo hidrógeno.

### 17.2.1 INTERCAMBIADORES CATIONICOS CICLO SODICO

Cuando el agua dura se pasa a través de un intercambiador catiónico ciclo sódico, el magnesio y el calcio se fijan en el intercambiador catiónico, el que transfiere a la solución una cantidad equivalente de sodio. Usando el símbolo R para el radical intercambiador, las reacciones de ablandamiento son:



Cuando la habilidad del intercambiador catiónico para producir un agua completamente blanda se agota, ese ablandador se elimina temporalmente del servicio; se retrolava para limpiarlo; se regenera con una solución de sal común que elimina el calcio y el magnesio en forma de sales solubles de cloro y simultáneamente cambia al intercambiador catiónico a su estado de sal sódica; lavado del producto de estas reacciones y el exceso de sal, la unidad puede volverse al servicio para ablandar otra cantidad igual de agua dura. Las reacciones de regeneración se indican como sigue:

CLASE	TIPO	HUMEDAD	IONAC CHEMICAL IONAC	BOW CHEMICAL BOWEA	DIAMOND ALKALI CORP. DUGLITE	KOHM & HAAS AMBEPLITE	(THE PERALTI COMPANY PERALITI
Zeolitas Naturales			C-50				Zeo-Dur
Zeolitas sinteticas			C-100, 101 C-102, 103 C-110				Decalco Folm
Carbonaceas	ACIDA Fuerte		C-150				Zeo-Karb
	ACIDA Debil						
Granular Organica	Acido Debil		C-265		C5-100		H
	Acido Fuerte		C-200	30	C-1 C-3 C-10	IR-1 IR-100 IR-105	Zeo-Aex
Tipo perlas poliestireno	Acido Fuerte	Alta Normal	C-220 C-240	50, 50W -rifa	C-20 C-21	IR-120, R-120L R-122	Q QB
	Sulfonado	bajo	C-250 C-255, C-260	ripes	C-27	IR-124	QC, QD
	Acido Fuerte	porosa	C-350 C-355		C-25	200 200C	Q-222 Q-220
	Sulfonado		C-265		ES-80	IRC-84	Q-221 Q-210
	Acido Debil		C-275				Q-211 Q-212

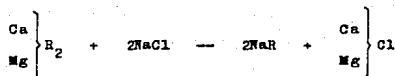
Tabla 17-3 TABLA COMPARATIVA DE INTERCAMBIADORES CATIONICOS (33)

TABLA 17-4

COMPARACION DE REGENERACION A CORRIENTE Y A CONTRACORRIENTE  
DE INTERCAMBIADOR CATIONICO (38)

FACTOR DE OPERACION	CORRIENTE	CONTRACORRIENTE
REGENERACION:		
Acido, lb/ft <sup>3</sup>	6.0	3.7
Concentracion	2% y 4%	2%
CAPACIDAD:		
Kgr/ft <sup>3</sup>	7.7	14.5
100 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Kgr	0.78	0.26
REGENERACION:		
Consumo de acido como % del teorico	510%	170%





## 17.2.2 INTERCAMBIADORES CATIONICOS CICLO HIDROGENO

En el proceso de intercambio catiónico ciclo hidrógeno, los iones de calcio, magnesio y sodio son intercambiados por hidrógeno. El resultado neto es que los iones de calcio, magnesio y también sodio, son removidos del agua; que la cantidad teórica de ácido carbónico formada de los bicarbonatos se descompone en bióxido de carbono y agua, y que las cantidades de ácido sulfúrico y clorhídrico, que corresponden a los sulfatos y cloruros presentes en el agua cruda, se encuentran en el efluente.

En el intercambio catiónico ciclo hidrógeno, la regeneración se efectúa con un ácido mineral. Los ácidos más comúnmente usados son el sulfúrico y el clorhídrico, su selección depende de consideraciones económicas.

Los intercambiadores de más uso en el tratamiento de agua por intercambio catiónico ciclo hidrógeno, son: (1) resinas catiónicas de alta capacidad de poliestireno, (2) intercambiadores catiónicos carbonáceos.

Las reacciones de los intercambiadores catiónicos ciclo hidrógeno con los bicarbonatos, sulfatos y cloruros son las sig.:

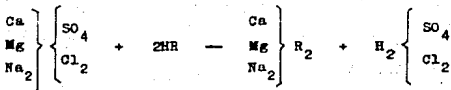
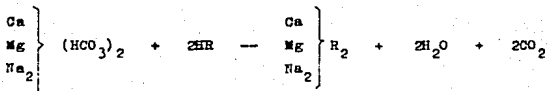


TABLA 17-6

REPRESENTACION TIPICA DE RESINA CATIONICA FUERTE CICLO HIDROGENO  
(REGENERACION ACIDO SULFURICO) (38)

NIVEL DE REGENERACION (ACIDO), lb/ft <sup>3</sup>	6	8
CAPACIDAD APROXIMADA, Kgr/lb/ft <sup>3</sup>		
1. Total electrolito/alcalinidad H=3.0	12	13.5
lbs/Kg	0.5	0.6
partes H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /partes cationes	3.5	4.2
2. Total electrolito/alcalinidad H=2.0	13.5	16
lbs/Kg	0.45	0.5
partes H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /partes cationes	3.20	3.5
3. Total electrolito/alcalinidad H=1.5	15	17
lbs/Kg	0.4	0.47
partes H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /partes cationes	2.8	3.3

1. Para desalcalinización corriente dividida, usase 6 lb H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ft<sup>3</sup>
2. Para desmineralización:
  - a) 6 lb H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ft<sup>3</sup> para lecho mixto
  - b) Para sistema de 2 lechos, usase 6 lb/ft<sup>3</sup>, para Na < 50 mg/l, 8 lb/ft<sup>3</sup> en otros casos.

TABLA 17-7

CAPACIDADES TIPICAS DE UN INTERCAMBIADOR CATIONICO POLIESTIRENO DE ALTA CAPACIDAD  
CICLO HIDROGENO, CUANDO SE RESENERA CON 5 y 10 lb HCl/ft<sup>3</sup> (38)

Cationes sodio: porcentaje de los cationes totales como CaCO<sub>3</sub>  
 Alcalinidad: porcentaje de los aniones totales como CaCO<sub>3</sub>  
 Fugas: porcentaje de cationes totales.

HCl(lb/ft <sup>3</sup> ) 100%	CATIONES SODIO %	50% ALCALINIDAD		50% ALCALINIDAD		5% ALCALINIDAD	
		KFT/ft <sup>3</sup>	FUGAS %	KFT/ft <sup>3</sup>	FUGAS %	KFT/ft <sup>3</sup>	FUGAS %
5lb a 15%	10	21.7	0.2	21.1	1.5	20.1	2
	20	22.1	0.3	21.3	1.8	20.3	2.4
	40	22.9	0.7	22.1	2.4	20.7	3.2
	60	23.5	1.2	22.7	3.0	21.3	5.0
	80	24.2	2.0	23.5	5.4	22.0	9.0
10lb a 15%	10	27.5	0.2	26.6	0.6	24.0	1.2
	20	27.6	0.3	26.7	0.8	24.1	1.5
	40	27.9	0.4	26.9	1.0	24.3	1.8
	60	28.2	0.6	27.1	1.2	24.7	2.2
	80	28.6	0.8	27.5	1.5	25.3	2.5



TABLA 17-8

CARACTERÍSTICAS Y CAPACIDADES TÍPICAS DE UN INTERCAMBIADOR CATIONICO  
POLIESTIRENO DE ALTA CAPACIDAD EN CICLO HIDROGENO CUANDO SE RE-  
GNERA CON 3,6,9,12 lb H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 66 °Ba/ft<sup>3</sup> (38)

Cationes sodio en porcentaje a los cationes totales (como CaCO<sub>3</sub>)

Alcalinidad en porcentaje a los aniones totales (como CaCO<sub>3</sub>)

Fugas en porcentaje a los cationes totales (como CaCO<sub>3</sub>)

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (66 °Ba) lb/ft <sup>3</sup>	CATIONES SODIO		90% ALCALINIDAD FUGAS		50% ALCALINIDAD FUGAS		3% ALCALINIDAD FUGAS	
	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>
3lb a 2%	10	7.5	0.5	7.0	2.6	6.6	3.8	3.8
	20	7.8	0.9	7.2	3.1	6.7	4.5	4.5
	40	8.5	1.0	7.8	4.8	7.3	6.5	6.5
	60	9.3	3.9	9.0	8.2	8.4	11.0	11.0
80	11.9	5.8	11.1	18.6	10.4	25.0	25.0	
6lb incrementos	10	11.1	0.4	10.6	1.3	10.1	2.0	2.0
	20	11.7	0.6	11.0	1.4	10.3	2.1	2.1
	40	13.3	1.0	12.1	1.9	11.2	2.6	2.6
	60	15.4	1.9	14.0	3.9	12.9	4.8	4.8
80	18.1	3.5	17.0	10.0	15.8	12.0	12.0	
9lb incrementos	10	15.9	0.2	14.3	0.5	13.4	1.1	1.1
	20	16.4	0.3	14.6	0.6	13.7	1.2	1.2
	40	17.5	0.5	15.6	0.8	14.6	1.8	1.8
	60	18.0	0.7	16.9	1.1	15.7	3.2	3.2
80	21.4	1.7	19.0	3.8	17.7	6.8	6.8	
12lb incrementos	10	18.6	0.2	17.7	0.4	17.2	1.1	1.1
	20	18.9	0.2	18.0	0.5	17.4	1.2	1.2
	40	19.4	0.3	18.4	0.7	17.6	1.8	1.8
	60	20.7	0.4	19.4	1.2	18.2	2.5	2.5
80	21.8	0.8	21.4	2.5	20.3	4.3	4.3	

TABLA 17-9

CAPACIDADES TÍPICAS DE UN INTERCAMBIADOR CATIONICO CARBONACEO EN CICLO HIDROGENO  
CUANDO SE REGNERA CON 2 y 2,5 lb/ft<sup>3</sup> DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 66 °Ba (38)

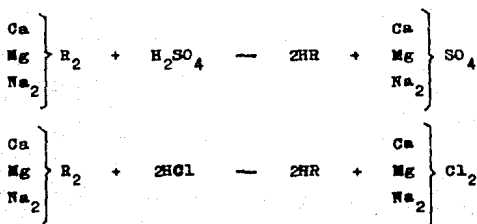
Cationes sodio: % de cationes totales como CaCO<sub>3</sub>

Alcalinidad: % aniones totales como CaCO<sub>3</sub>

Fugas: % cationes totales.

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (66 °Ba) lb/ft <sup>3</sup>	CATIONES SODIO		90% ALCALINIDAD FUGAS		50% ALCALINIDAD FUGAS		3% ALCALINIDAD FUGAS	
	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>	%	Kgr/ft <sup>3</sup>
2lb a 2%	10	5.6	0.4	4.6	2.0	3.7	4	4
	20	5.9	0.5	4.7	2.1	3.8	4.1	4.1
	40	6.4	0.6	4.9	2.3	3.8	4.3	4.3
	60	6.9	0.7	5.2	2.5	3.9	4.7	4.7
	80	7.6	1.1	5.4	3.0	4.0	5.4	5.4
2.5lb 2%	10	7.1	0.2	5.4	2.0	3.8	3.4	3.4
	20	7.3	0.3	5.5	2.1	3.9	3.5	3.5
	40	7.5	0.5	5.7	2.2	4.0	3.6	3.6
	60	7.7	0.7	5.9	2.3	4.0	3.7	3.7
	80	7.9	0.9	6.2	2.4	4.1	3.8	3.8

Cuando la capacidad de los intercambiadores catiónicos se agota, se hace necesaria la regeneración con ácido para eliminar el calcio, magnesio y sodio y restaurar su condición de intercambiador catiónico ciclo hidrógeno. Las reacciones son como siguen:



El equipo usado para efectuar el intercambio catiónico ciclo hidrógeno, se asemeja, al ablandador de agua por medio de zeolitas, pero difiere en que éste debe ser a prueba de ácidos. El recipiente usualmente es un cilindro vertical de acero con tapas abombadas, que resista presión. Se cubre interiormente con hule u otro material resistente al ácido. Las conexiones internas son de hule duro, cubiertas de hule u otro material a prueba de ácido; las válvulas son recubiertas de hule, la tubería a través de la cual fluye el efluente es de hule duro, cubierta con hule o plástico.

### 17.3 INTERCAMBIADORES ANIÓNICOS

Los dos tipos principales de intercambiadores aniónicos que pueden usarse en los procesos de desmineralización, se pueden clasificar como (1) intercambiadores aniónicos débilmente básicos, (2) intercambiadores aniónicos fuertemente básicos. Los intercambiadores aniónicos básicos débiles pueden emplearse para eliminar ácidos ionizados fuertes pero no lo harán con los ácidos ionizados débiles.

CLASE	TIPO	HUMEDAD	IONAC	DOW	DIAMOND	ROHM &	THE PERMUTIT
			CHEMICAL IONAC	CHEMICAL SULFON	ALKALICOMP SULFITE	HAFAS AMBERLITE	CO-ORDINATE PERMUTIT
Granular Organica	BASE DEBIL		A-260		A-1, A-2, A-3 A-5, A-6, A-7 A-10, A-30	IR-3	Decadire (i-380)
	BASE MEDIA		A-300 A-310		A-41 A-1140 A-307		A 75-300)
Perlas Organicas	Base debil	baja	A-316	3	A-308	IR-45	5-330
		media	(A-310)			IR-68 IR-93	A 85-370) 5-440 5-340
		macroporosa					5-130
	Base Fuerte	baja	A-546	1	A-40	RA-400	5-100
		media	A-540 A-530		A-101D	RA-402 RA-401	5-431 5-230
	Tipo I	macroporosa	A-847			RA-900	5-471
Fuerte Tipo II	baja	A-530	2	A-102D	RA-910	5-471	
	media	A-651			RA-911	5-471	

Tabla 17-10 TABLA COMPARATIVA DE INTERCAMBIADORES ANIONICOS (33)

Tabla 17-11

COMPARATIVA DE CAPACIDADES IONICAS (38)

TIPO	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
<b>CONDICIONES DE USO</b>			
<b>CONDICIONES DE USO</b>	<b>RESERVATE BASICO</b>	<b>RESERVATE BASICO, TIPO 1</b>	<b>RESERVATE BASICO, TIPO 11</b>
<b>CONDICIONES DE USO Y BASE DE LA RESINA</b>	(1) Resinilla (2) Resinilla de (3) Resinilla de (4) Resinilla de (5) Resinilla de	(1) Resinilla de (2) Resinilla de (3) Resinilla de (4) Resinilla de	(1) Resinilla de (2) Resinilla de (3) Resinilla de (4) Resinilla de
<b>GRUPO DE CAPACIDAD IONICA</b>	<b>GRUPO DE CAPACIDAD IONICA</b>	<b>GRUPO DE CAPACIDAD IONICA</b>	<b>GRUPO DE CAPACIDAD IONICA</b>
<b>TIPO DE RESINA</b>			
<b>TIPO DE RESINA</b>	100 2-2 2-2	100 2-2 2-2	100 2-2 2-2
<b>REQUISITOS PARA RESINA:</b>			
<b>Superficie y peso de la resina</b>	Base resina, con base de resina	Base resina de resina	Base resina de resina
<b>TIPO DE RESINA</b>	10-10	10-10	10-10
<b>TIPO DE RESINA</b>			
<b>TIPO DE RESINA</b>	Las resinas funcionan mejor en el agua.	Preferible para el agua de mar.	Preferible para el agua de mar.

TIPO DE RESINA  
 Tipo 100  
 Tipo 100  
 Tipo 100

8.

TABLA 17-11

DATOS DE CAPACIDAD	GRUPO 1			GRUPO 2			GRUPO 3		
	lb/ft <sup>3</sup>	Kgr/ft <sup>3</sup>	lb/kg	lb/ft <sup>3</sup>	Kgr/ft <sup>3</sup>	lb/kg	lb/ft <sup>3</sup>	Kgr/ft <sup>3</sup>	lb/kg
SOSA CAUSTICA 100%	3.2	25	0.13	3.5	11	0.32	4	12.5	0.33
	3.5	25	0.14	4.0	9.0	0.44	4	15	0.27
				4.5	11.0	0.41	4.5	14	0.32
				5.0	11.75	0.42	5	13.5	0.37
				6.0	10.0	0.60	6	16.2	0.37
				6.0	10.0	0.60	6	16.0	0.37
				7.5	13.0	0.57	7.5	14.5	0.52
				8.0	10.9	0.73	8.0	16.9	0.47
				8.0	11.9	0.72	8.0	17.0	0.46

\* Los nombres comerciales está identificados por los siguientes fabricantes: Chemical Process Co., (4), (5), (9), (13); Dow Chemical Co. (Metc), (2), (6), (10); Permutit Co., (1), (7), (11); Rohm & Haas, (3), (8), (12).

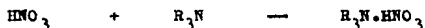
Las capacidades de cambiadores aniónicos fuertemente básicos han sido seleccionados para aplicaciones de remoción de sílice en las que el contenido de sílice total es del orden de 10 ppm y constituye el 30% de los aniones intercambiadores totales. Pueden obtenerse mayores capacidades y eficiencias cuando no se requiere remover sílice hasta un residual bajo. Dado que las capacidades reales varían con el análisis del influente los valores anteriores típicos en la práctica de agua para alimentación de calderas, no deberán usarse para fines de diseño.

TABLA 17-12

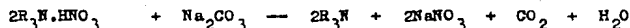
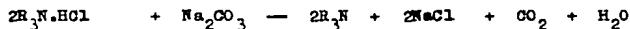
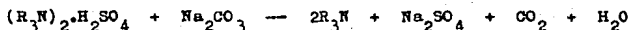
## PROPIEDADES FISICAS DE INTERCAMBIADORES ANIONICOS TÍPICOS ( 38)

INTERCAMBIADORES ANIONICOS	COLOR	TAMAÑO MALLAS	lb/ft <sup>3</sup>
Resinas fuertemente básicas Tipo-I (aminas cuaternarias de resina de poliestireno - que contienen grupos alquílicos).	amarillo	16-50	43-45
Resinas fuertemente básicas Tipo-II (aminas cuaternarias de resina de poliestireno que contienen grupos alquílicos y alcanol).	amarillo	16-50	43-45
Resinas de basicidad intermedia (aminas alifáticas).	gránulos anaranjados	16-50	20
Resinas débilmente básicas - (aminas alifáticas)	gránulos café-rojizos	16-50	17

En las siguientes reacciones, se usa el término  $R_3N$  para representar intercambiadores aniónicos débilmente básicos en sus reacciones con los ácidos fuertemente ionizados.



Al final de cada ciclo de operación, el intercambiador aniónico se regenera con carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ), se anjuga y se pone en servicio. Las reacciones de regeneración pueden escribirse como sigue:



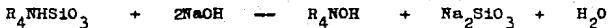
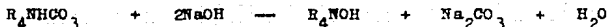
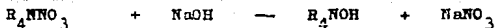
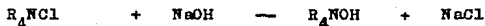
A medida que los ácidos débiles se eliminan en el intercambiador aniónico, el efluente contiene la misma cantidad de sílice que el agua cruda, otro tanto sucede con el bióxido de carbono correspondiente formado en el intercambiador catiónico ciclo hidrógeno, además de su contenido original. La mayoría de este bióxido de carbono se puede eliminar en un desgacificador, desaerador al vacío o un tanque de descarbonatación, dejando los residuos de menos de 10 ppm o 5 ppm, cualquiera que se pueda necesitar.

Los intercambiadores aniónicos fuertemente básicos difieren de los débilmente básicos en que remueven tanto los ácidos ionizados como los que no lo están. Empleando el símbolo  $R_4N$  como el radical del intercambiador aniónico básico fuerte, las reacciones de estas

resinas aniónicas con las dos clases de ácidos se muestran como sigue:



Al final de la operación, el intercambiador aniónico fuertemente básico se retrolava, regenera con solución de sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ); se enjuaga y se vuelve al servicio. Las reacciones de regeneración se pueden escribir como sigue:



Aunque las resinas aniónicas fuertemente básicas pueden eliminar el bióxido de carbono, es mucho más fácil y barato eliminarlo por medios mecánicos.

Los intercambiadores aniónicos de basicidad intermedia tienen casi las mismas propiedades que los débilmente básicos, y pueden ser empleados para eliminar ácidos fuertemente ionizados. La diferencia es que pueden ser regenerados con sosa cáustica.

TABLA 17-13  
CAPACIDADES TÍPICAS DE INTERCAMBIADORES ANIONICOS (38)

TIPO DE INTERCAMBIO ANIONICO	REGENERANTE lb/ft <sup>3</sup>	CAPACIDAD			% A 100% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
		0%	20%	Kgr/ft <sup>3</sup> 40%	60%	80%	100%
Tipo I fuertemente básico	NaOH						
	2.0	5.8	6.2	6.5	7.3	7.6	
	2.5	6.6	7.0	7.4	8.0	8.3	8.6
	3.0	7.5	7.9	8.4	9.0	9.4	9.7
	4.0	8.7	9.2	9.8	10.5	10.9	11.3
	5.0	9.6	10.1	10.7	11.5	12.5	12.4
Tipo II fuertemente básico	3.0	11.4	11.5	11.6	12.0	12.7	13.8
	4.0	13.3	13.4	13.6	14.0	14.8	16.1
	5.0	14.3	14.4	14.6	15.0	15.9	17.3
	6.0	15.2	15.3	15.5	16.0	17.0	18.4
	8.0	16.2	16.3	16.5	17.0	18.0	19.6
	10.0	17.1	17.3	17.5	18.0	19.1	20.7
* Basicidad Intermedia	3.2,4.0,4.5	16.0	17.3	18.5	20.0	20.7	21.2
Debilitante básico	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>						
	4.2	13.1	14.3	15.6	17.0	18.3	20.1

\* Con el Intercambiador aniónico de basicidad intermedia, la sosa usualmente empleada en lb/ft<sup>3</sup> es 3.2 si el influente es 10 ppm o menos, 4.0 si es de 10-50 ppm y 4.5 si es de 50 a 100 ppm.

TABLA 17-14  
CAPACIDADES DE INTERCAMBIADORES FUERTEMENTE BASICOS EN  
SISTEMA DE DESMINERALIZACION (REGENERACION CON NaOH a 95 °F  
CON 90 MINUTOS DE TIEMPO DE CONTACTO) (38)

NaOH lb/ft <sup>3</sup>	Cap. Kgr/ft <sup>3</sup>	lb/Kg	SiO <sub>2</sub> final Mg/l
3.5	10	0.35	0.6
5.0	12	0.42	0.3

**17.4 SUAVIZACION CICLO SODICO**

En el proceso de ablandamiento por intercambio catiónico ciclo sódico los iones de calcio y magnesio se intercambian por iones sodio. El resultado es que aunque el agua obtenida es completamente blanda, su contenido de sólidos totales no disminuye y el efluente contiene las mismas cantidades de aniones -bicarbonatos, sulfatos y cloruros.

La presencia de sales de calcio y magnesio provoca problemas de incrustación en calderas y equipos de calor, condensadores, así como sabores no deseables.

**17.4.1 APLICACIONES**

- 1) Tratamiento de aguas de calderas a presión baja y media.
- 2) Tratamiento de aguas para circuitos de refrigeración.
- 3) Tratamiento de aguas para usos domésticos.
- 4) Aplicaciones textiles (blanqueo, tinte, etc.).

**17.4.2 USOS INDUSTRIALES Y DOMESTICOS**

- |                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| 1.- Lavanderías.                   | 6.- Pigmentos.           |
| 2.- Hospitales.                    | 7.- Plantas Textiles.    |
| 3.- Hogar.                         | 8.- Colorantes.          |
| 4.- Enlatadoras.                   | 9.- Cervecerías.         |
| 5.- Industria química (reactivos). | 10.- Plantas Termoeléct. |

**17.4.3 TIPOS DE INTERCAMBIADORES CATIONICOS CICLO SODICO**

El primer intercambiador catiónico usado en el ablandamiento de agua fue una zeolita sintética, y en los siguientes años todos los intercambiadores usados fueron de zeolitas sintéticas u otros materiales silíceos que tiene la propiedad de intercambiar cationes. Luego se descubrieron los compuestos orgánicos que tienen propiedades tales, que pueden ser usados en ciclo sódico o de hidróge-





TABLA 17-15

CAPACIDADES TÍPICAS DE INTERCAMBIADORES DÉBILMENTE BÁSICOS (38)

AGENTE QUÍMICO	DOSEIFICACION lb/ft <sup>3</sup>	CAPACIDAD Kgr/ft <sup>3</sup>	lbs/Kg
NH <sub>3</sub>	1.5	20.0	0.08
NaOH	3.0	21.3	0.14
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6.6	19.6	0.34

NOTA:

Capacidades basadas en una relación 1:1 de HCl a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

TABLA 17-16

REPRESENTACION TÍPICA DE ZEOLITAS DE SODIO (38)

Consumo de sal	6	8	10	15
Capacidad aprox, Kgr/ft <sup>3</sup>	20	23	25	30
Relación de sal lb/Kgr.	0.30	0.35	0.40	0.50
mg/l sal/mg/l dureza	2.1	2.5	2.8	3.5
Fugas de dureza mg/l				
100 mg/l electrolito total	0.1-0.3	0.1-0.2	0.1	0.1
250 mg/l electrolito total	0.5-2.0	0.5-1.0	0.3-0.5	0.1-0.20
500 mg/l electrolito total	3.0-6.0	2.0-4.0	1.0-3.0	0.5-1.0
1000 mg/l electrolito total	12-25	8.0-15.0	5.0-10.0	2.0-4.0

TABLA 17-17

INTERCAMBIO CATIONICO DE ALTA CAPACIDAD (38)  
 (CAPACIDADES POR FT<sup>3</sup> CON CONSUMO DE SAL DE 0.275 a 0.50 lb/Kg)

CAPACIDADES DE ABLANDAMIENTO Kgrano/ft <sup>3</sup>	CONSUMO DE SAL	
	lb/Kg	lb/ft <sup>3</sup>
27	0.50	13.5
26	0.45	11.7
25	0.40	10.0
24	0.35	8.4
22	0.30	6.6
20	0.275	5.5

TABLA 17-18

INTERCAMBIADORES CATIONICOS CICLO SODICO DATOS TÍPICOS (38)

INTERCAMBIADORES CATIONICO SODICO	TAMARO (MALLA)	lb/ft <sup>3</sup>	COLOR	CONSUMO DE SAL		CAPACIDADES kg/ft <sup>3</sup>
				lb/kg	lb/ft <sup>3</sup>	
Resina poliestireno alta capacidad	16-50	53	ambar	0.50	13.5	27
				0.45	11.7	25
				0.40	10.0	25
				0.35	8.4	24
				0.30	6.6	21
0.275	5.5	20				
Carbonáceas	16-50	24-30	negro	0.45	3.15	7
				0.40	2.68	6.9
				0.375	2.37	6.3
				0.35	2.10	6.0
				0.50	5.0	10
Zeolitas sintéticas	16-50	54	blanco	0.45	4.05	9
				0.40	3.2	8
Greensand alta capacidad	16-50	80	negro	0.45	2.25	5
				0.40	1.76	4.4
Greensand standard	16-50	80	verde	0.50	1.5	3.0
				0.45	1.26	2.8
				0.40	0.96	2.4

## NOTA:

	flujo (gpm/ft <sup>2</sup> )	Retro lavado (gpm/ft <sup>2</sup> )
Resina carbonáceas	6-8	6
Greensand	5-6	7
Resina sintética	6-8	7

no. Algunos tipos de intercambiadores catiónicos ciclo sódico son:

- 1) Zeolitas fundidas.
- 2) Zeolitas gelatinosas.
- 3) Zeolitas greensand.
- 4) Intercambiadores catiónicos carbonáceos.
- 5) Resinas catiónicas de poliestireno de alta capacidad.

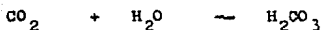
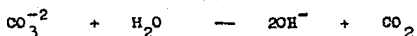
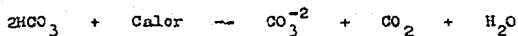
#### 17.4.4 ABLANDADORES DE AGUA PARA ZEOLITAS

Los ablandadores de agua con intercambiadores catiónicos sódicos, se fabrican tanto en el tipo de presión como en el de gravedad, y su operación puede ser manual, semiautomática o automática. Todos operan en el mismo principio que consiste de un ciclo de ablandamiento y regeneración. En el ablandamiento se remueve y detiene el calcio y magnesio dando una cantidad equivalente de sodio por ellos.

La regeneración consiste de tres pasos: (1) retrolavado, (2) paso de salmuera, (3) lavado. El retrolavado se lleva a efecto enviando un potente flujo de agua en dirección ascendente a través del lecho de resina intercambiadora, que sirve para expandir, lavar y clasificar hidráulicamente el lecho. El paso de salmuera se efectúa percolando por el lecho una cantidad predeterminada de salmuera, que elimina el calcio y magnesio y restituye el estado sódico del intercambiador.

#### 17.5 DESALCALIZACION

El grupo iónico responsable de la alcalinidad presente en el agua cruda es el radical bicarbonato, así como carbonatos, hidróxidos, silicatos, boratos y fosfatos. La principal objeción a el agua alcalina proviene de los operadores de calderas. Bajo la acción del calor, estos iones se descomponen de acuerdo a las siguientes reacciones:



El bióxido de carbono formado reacciona con agua para producir ácido carbónico, el cual reacciona y corroe el acero y otras aleaciones ferrosas. Este producto de corrosión formado (bicarbonato ferroso) se deposita y eventualmente contamina líneas de agua.

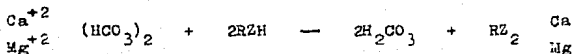


Existen otras objeciones al agua alcalina, pues un alto contenido de ella, produce hielo que hace turbia a las bebidas embotelladoras y otros productos alimenticios, cuyos componentes ácidos se neutralizan con el agua alcalina, la cual hace perder sabores.

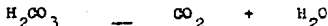
Esta impureza puede ser reducida por una serie de métodos de intercambio iónico. La selección adecuada del método y la resina depende de un número de factores, incluyendo la composición del agua y la aplicación para la cual será requerido.

#### 17.5.1 DESALCALIZACION-SUAVIZACION

Se lleva a cabo mediante resina tipo catiónica fuerte ciclo hidrógeno, y su principal actividad radica en la habilidad de la forma hidrógeno de la resina catiónica (IR-120) para convertir los bicarbonatos en ácidos carbónicos.



El cual es desdoblado produciendo bióxido de carbono y agua. El bióxido formado debe ser removido posteriormente por aereación.



En este método, todos los cationes presentes son reemplazados por hidrógeno (descationización), el efluente es suavizado y acidificado a la vez; el cual deberá ser posteriormente neutralizado mediante varias técnicas:

- 1) Neutralización con sosa cáustica.
- 2) Neutralización con efluente de ciclo sodio.

#### 17.5.2 DESALCALIZACION POR INTERCAMBIO IONICO

Las resinas de intercambio aniónico, cuando son regeneradas con sal para producir la forma cloruro de la resina, mismo que intercambiará por otros aniones como bicarbonatos, sulfatos, fluoruros, sulfuros, etc.



Las ventajas del proceso son:

- 1) Se utiliza un regenerante de bajo costo (sal).
- 2) Se evita el manejo de ácidos peligrosos.
- 3) No se tiene el riesgo de introducir ácido a las calderas.
- 4) No se requiere desgascifloador.
- 5) No se requiere equipo de bombeo.

#### 17.5.3 DESALCALIZACION-SUAUVIZACION POR INTERCAMBIO CATIONICO-ANIONICO

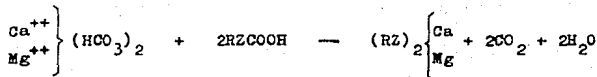
Debido al uso de resinas catiónicas en forma sodio para suavizar agua, y la forma cloruro de las resinas aniónicas usada para desalcalizar agua; una combinación de ambas, debe ser empleada para administrar agua suavizada-desalcalinizada. La mayor ventaja que representa este método es que ambas resinas son regeneradas con salmuera.

## 17.5.4 DESALCALIZACION-SNAVIZACION CON RESINAS CATIONICAS-CARBOXILICAS

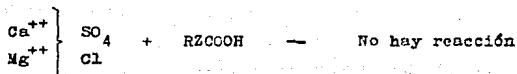
La desalcalización con resinas carboxílicas ha tenido un desarrollo lento. Sin embargo, este método se ha establecido firmemente en Europa. Su utilización es atractiva desde el punto de vista económico.

Las resinas débiles como la carboxílica se hacen atractivas puesto que se regeneran con sólo 100-120 % de la cantidad teórica de ácido para regeneración.

Debe recomendarse que las resinas débiles no desdoblan sales específicamente, y no remueven cationes que no estén relacionados con alcalinidad. Muchas aguas contienen dureza permanente lo cual significa que las resinas carboxílicas desalcalizarán.



No se afectará la dureza permanente:



## 17.6 DES-SILIZADOR

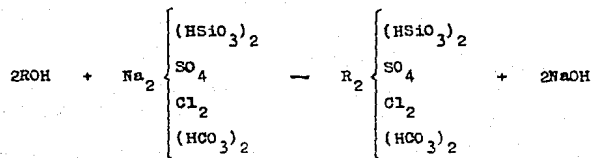
Si la aplicación requiere agua de mayor pureza, la remoción de sílice y bióxido de carbono es factor primordial. La operación de generadores de turbina para alta presión requiere de tal pureza y para este propósito se utiliza una resina aniónica fuerte. La mayor utilización de estas, en tratamiento de agua está íntimamente relacionada con la remoción de sílice. Normalmente para calderas de alta presión, la concentración de sílice debe ser mantenida considerablemente abajo de 1 ppm.

Para su remoción, la sílice soluble entra al lecho de resina como ácido silícico ( $\text{HSiO}_3^-$ ) y después de tener contacto con la resina en forma de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) por algún tiempo, se desdobra formando agua.

Algo de sílice presente en ciertos suministros de agua no está en solución verdadera, pero existe en estado coloidal, desafortunadamente la mayoría de esta sílice no reactivo, no es absorbido por resinas aniónicas convencionales.

La manera más común de mover sílice es a través de la desionización (reducción de sólidos totales). La razón más dominante es que la desionización, muestra ser más económica.

Hay, sin embargo, una cantidad limitada de condiciones bajo las cuales el uso de las resinas aniónicas no operando en sistemas de desionización, pueden ser consideradas para la remoción de sílice.



Esta técnica es conocida como desilización. Las guías a seguir para su uso son:

- 1) Cuando el agua a tratar tiene bajo contenido de cloruros, nitratos, sulfatos, etc., pero no necesariamente en alcalinidad.
- 2) Para calderas en la escala de 500 a 950 psi.



- 3) Cuando existen plantas con pre-suavizador o desalcalizador.
- 4) Cuando los costos de inversión para una desionización completa es un factor limitante.

### 17.7 DESMINERALIZACION

Los términos "desmineralización", "desmineralizar" y "desionizar", son de uso común para distinguir la eliminación de la materia mineral del agua por medio del intercambio iónico, a diferencia de la destilación.


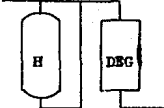
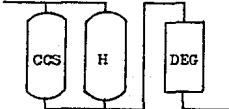
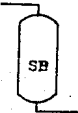
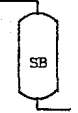
Las unidades catiónicas son el primer paso en una planta desmineralizadora, y tiene por objeto convertir las sales presentes en el agua a sus ácidos correspondientes y estos sean posteriormente removidos por las unidades aniónicas.

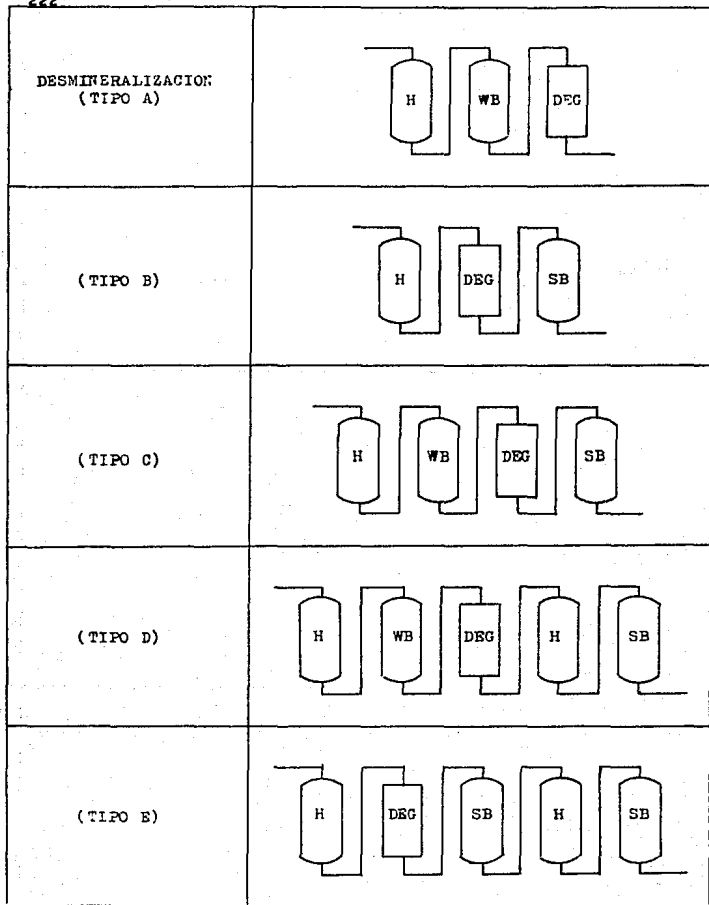
La planta desmineralizadora de dos pasos es el más simple sistema de desmineralización, pero existe otros arreglos más complidos. Respecto a la selección de cuál de estos arreglos deberá emplearse en un caso particular, depende de la composición del agua, tipo de efluente requerido, costo de operación y capital.

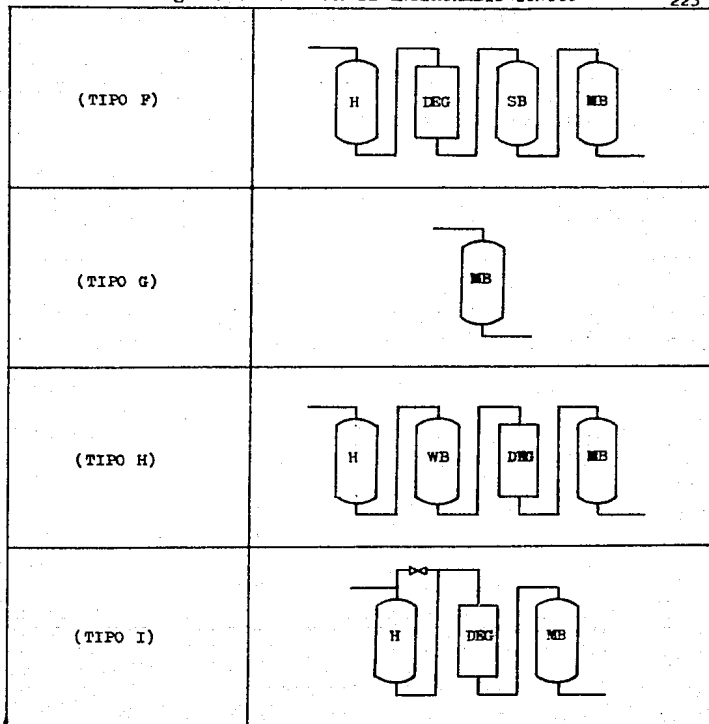
En los arreglos se muestra intercalado en algunos casos un equipo denominado desgacificador, que tiene por objeto remover el bióxido de carbono producido por los carbonatos o bicarbonatos presentes en el agua.

#### 17.7.1 APLICACIONES QUE NECESITAN UNA DESMINERALIZACION MAS COMPLETA

- 1) Tratamiento de agua de alimentación a calderas de alta presión.
- 2) Obtención de agua de gran pureza para la industria química.
- 3) Agua destilada para cristalería y perfumería.

SUAVIZACION	 <p>A vertical cylindrical tank labeled 'CCS' with an inlet pipe at the top and an outlet pipe at the bottom.</p>
DESALCALIZACION (TIPO A)	 <p>A vertical cylindrical tank labeled 'H' and a rectangular tank labeled 'DEG' connected in series. The 'H' tank has an inlet at the top and an outlet at the bottom. The 'DEG' tank has an inlet at the top and an outlet at the bottom. The outlet of the 'H' tank is connected to the inlet of the 'DEG' tank.</p>
(TIPO B)	 <p>A vertical cylindrical tank labeled 'CCS', a vertical cylindrical tank labeled 'H', and a rectangular tank labeled 'DEG' connected in series. The 'CCS' tank has an inlet at the top and an outlet at the bottom. The 'H' tank has an inlet at the top and an outlet at the bottom. The 'DEG' tank has an inlet at the top and an outlet at the bottom. The outlet of the 'CCS' tank is connected to the inlet of the 'H' tank, and the outlet of the 'H' tank is connected to the inlet of the 'DEG' tank.</p>
(TIPO C) (*)	 <p>A vertical cylindrical tank labeled 'SB' with an inlet pipe at the top and an outlet pipe at the bottom.</p>
DES-SILIZADOR (x)	 <p>A vertical cylindrical tank labeled 'SB' with an inlet pipe at the top and an outlet pipe at the bottom.</p>





## SISTEMA DESMINERALIZADOR.

<u>TIPO</u>	<u>REDUCCION DE ELECTROLITO (ppm)</u>	<u>REDUCCION DE SILICE (ppm)</u>	<u>CARACTERISTICAS</u>
A	2	0	No sirve para calderas.
B	2-10	0.02-0.15	Utilización en calderas.
C	2-10	0.02-0.15	Utilización en calderas. El sistema ahorra regenerante cuando se tratan con alta acidez mineral.
D	1	0.02	Se recomienda para aguas con elevado porcentaje de sodio y bajos porcentajes de alcalinidad.
E	1	0.05	Evita el ensuciamiento orgánico.
F	0.04-0.4	0.05-0.01	Se protege el lecho mixto.
G	1	0.02-0.15	Elevados costos de operación.
H	1	0.02-0.15	Bajos costos de operación comparados con G.
I	1	0.02-0.15	Reduce la cantidad de ácido y sosa.

H = Unidad de intercambio catiónico hidrógeno.  
 WB = Unidad aniónica débilmente básica.  
 SB = Unidad aniónica fuertemente básica.  
 MB = Lecho mixto.  
 CCS = Unidad catiónico ciclo sodio.  
 \* = Ciclo cloruro.  
 x = Ciclo hidróxido.

TABLA 17-19 CONDICIONES GENERALES DE OPERACION RECOMENDADOS  
EN SISTEMAS DE SUAVIZACION Y DESMINERALIZACION.  
(47)  
SUAVIZACION

OPERACION:	FLUJO RECOMENDADO:	TIEMPO (min):
RETROLAVADO GPM/ft <sup>3</sup>	NOTA 1	10 - 15
REGENERACION GPM/ft <sup>3</sup>	0.5 - 1.5	NOTA 3
ENJUAGUE GPM/ft <sup>3</sup>	NOTA 5	NOTA 5

## DESMINERALIZACION

OPERACION:	FLUJO RECOMENDADO: CATION / ANION	TIEMPO (min):
RETROLAVADO GPM/ft <sup>3</sup>	5 - 6 / 3 - 5	10 / 25 - 30
REGENERACION GPM/ft <sup>3</sup>	0.5-0.75 / 0.25	NOTA 3
DESPLAZAMIENTO GPM	NOTA 2	NOTA 2
ENJUAGUE GPM/ft <sup>2</sup>	5 - 6 / 5 - 6	NOTA 4

TABLA 17-20

## CARTA DE SELECCION DE UNIDADES DE DESMINERALIZACION (37)

VELOCIDAD DE FLUJO, gpm	CANT. IMPUREZAS PARA REMOCION, mg/l			RESINAS REQUERIDAS			UNIDADES A UTILIZAR			
	FHA	CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	C	BD	BF	C	DG	A	LM
Cualquiera	Cualquiera	Ninguna	Ninguna	X	X	-	(1) X	-	X	-
							(2) -	-	-	X
Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	Ninguna	X	X	-	(1) X	X	X	-
							(2) -	X	-	X
0-20	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	X	-	X	(1) X	-	X	-
							(2) -	-	-	X
20-50	Cualquiera	0-50	Cualquiera	X	-	X	(1) X	-	X	-
							(2) -	-	-	X
100	0-100	100	Cualquiera	X	-	X	(1) X	X	X	-
							(2) X	X	-	X
100	200	200	Cualquiera	X	X	X	(1) X	X	X	-
							(2) X	X	X	X

## NOTAS:

C = catiónica

A = aniónica

DG = desgasificador

LM = lecho mixto

BD = base débil

BF = base fuerte

AML = acidez mineral libra (SO<sub>4</sub> + Cl + NO<sub>3</sub>)

(1) planta de multi-lechos

(2) lecho mixto para efluente micromem.

Intervalos Intermedios entre 500 y 100 gpm de flujo, 50-100 mg/l de CO<sub>2</sub>, 100-200 mg/l de ácido libre mineral, requiere de una evaluación cuidadosa para el mejor balance de costos de inversión y de operación.

TABLA 17-21

TABLA DE PUREZA DE AGUA DESMINERALIZADA ( 38 )

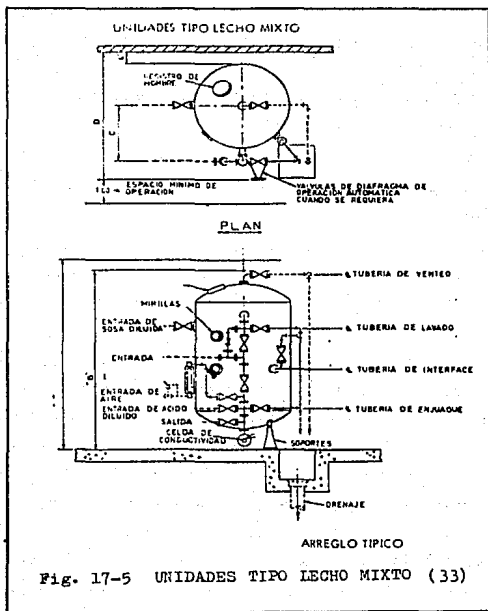
GRADO DE PUREZA	DHMS-CM RES-ESP (77 °F)	CONDUCTIVIDAD $\mu$ MOS	LECHO MIXTO O 2 LECHOS CON BASE DEBIL	2 LECHOS CON BASE FUERTE
ULTRA PURA	$10 \times 10^6$	0.1	0.04 *	0.02
MUY PURA	$1 \times 10^6$	1.0	0.40	0.20
PURA	$1 \times 10^5$	10.0	4.00	2.00

\* Concentraciones en ppm como  $\text{CaCO}_3$ 

TABLA 17-22

INTERVALO DE CONTENIDO DE ELECTROLITO (COMO TDS) Y SILICE EN EFLUENTES DE SISTEMAS DE DESMINERALIZACION ( 38 )

CONCEPTO	2 o 3 LECHOS	4 LECHOS	LECHO MIXTO	2 o 3 LECHOS MIXTO
ELECTROLITO (TDS) ppm	2.0 - 3.0	0.2 - 1.00	0.2 - 0.5	0.04 - 0.10
SILICA (como $\text{SiO}_2$ ) ppm	0.2 - 0.1	0.01 - 0.05	0.02 - 0.10	0.002 - 0.1
CONDUCTIVIDAD $\mu$ mos	10.0 - 15.0	1.0 - 5.0	0.50 - 1.25	0.10 - 0.25
RESISTENCIA ESPECIFICA	67000	200000	800000	4000000
DHMS-CM	100000	1000000	2000000	10000000





17.8 CRITERIOS DE DISEÑO

- a) El área de las unidades de intercambio iónico es determinada por la velocidad superficial del agua a tratar durante la fase de servicio.
- b) La velocidad superficial de servicio en  $\text{gpm}/\text{ft}^2$  de área de las unidades de intercambio, en el pasado fue limitada de  $6 \text{ gpm}/\text{ft}^2$  cuando las unidades operaban en batería, y  $8 \text{ gpm}/\text{ft}^2$  cuando una unidad estaba siendo regenerada.

Actualmente la velocidad se incrementó de 8 a  $10 \text{ gpm}/\text{ft}^2$  con todas las unidades operando en batería y de 12 a  $15 \text{ gpm}/\text{ft}^2$  con una unidad fuera.

Las unidades secundarias o pulidoras pueden operar a altas velocidades superficiales de 15 a  $25 \text{ gpm}/\text{ft}^2$  y en los lechos mixtos para tratamiento de condensados las unidades son diseñadas para velocidades superficiales de  $50 \text{ gpm}/\text{ft}^2$ .

- c) El tiempo de servicio o ciclo de operación especificado en el pasado era de 24 horas entre regeneraciones, esto se debía a que se operaban las plantas manualmente, sin embargo este tiempo se ha reducido con el control automático de la planta y actualmente diversas plantas operan de 8 a 12 horas satisfactoriamente.

El cálculo final de las unidades involucran las operaciones de retrolavado, regeneración, desplazamiento (enjuague lento y enjuague rápido) de los cuales se deberá de especificar el flujo en  $\text{gpm}$ , el tiempo (duración en minutos de la operación) y el volumen de agua requerido para cada uno de los pasos. La determinación de estos parámetros se hacen en base a ciertos flujos recomendados:

- 1.- La velocidad superficial recomendada para esta operación deberá ser tal que ocasione una expansión a la resina del 50 al 75 %.
  - 2.- El gasto en gpm de desplazamiento (enjuague lento) es el mismo que el calculado para el agua de dilución, el cual se utiliza para el cálculo del tiempo de desplazamiento de acuerdo al volumen de resina.
  - 3.- El tiempo de regeneración deberá de ser calculado de acuerdo al flujo de regenerante recomendado. El tiempo empleado para la regeneración normalmente es de 45-60 minutos.
  - 4.- El tiempo de enjuague rápido será calculado de acuerdo a el requerimiento de volumen de agua y a la velocidad superficial recomendada.
  - 5.- En los sistemas de suavización, los requerimientos de enjuague son determinados en base a la dureza residual del efluente.
- d) En los sistemas de regeneración convencional (flujo ascendente) en las unidades catiónicas es conveniente regenerar de la forma siguiente para evitar precipitación de  $\text{CaSO}_4$ :

Calcio en el influente (%)	$\text{H}_2\text{SO}_4$ (%)
$\text{Ca} \geq 50$	1.3
$20 < \text{Ca} < 50$	1.5
$\text{Ca} \leq 20$	2.0

- e) En los sistemas de regeneración de las unidades aniónicas para evitar las fugas de sílice, se efectúa un precalentamiento y se introduce la sosa a  $120^\circ\text{F}$ .
- f) Las resinas aniónicas tienen una menor densidad, por lo que es conveniente retrolavarlas de 25-30 min., y las resinas catiónicas de 10-15 minutos.

- g) El sistema de regeneración a contracorriente en las unidades catiónicas, se emplea para reducir las fugas de sodio aproximadamente de 0-2 ppm. En este caso se recomienda eliminar la operación de retrolavado para evitar mezclar la banda de calcio y tener precipitación de  $\text{CaSO}_4$ .
- h) Los sistemas es conveniente diseñarlos con varios trenes para que en el momento que unos trabajen otros esten regenerandose.
- i) Cuando se emplea el sistema de lecho estratificado (resinas débilmente básicas y fuertemente básicas están en el mismo recipiente), se deberá de efectuar primeramente la regeneración y posteriormente el retrolavado para evitar que se mezclen, debido a que estas resinas agotadas tienen la misma densidad.
- j) Los lechos mixtos son empleados generalmente como unidades pulidoras.
- k) En los sistemas de lechos mixtos el flujo recomendado de retrolavado, será el que cause una expansión del lecho del 100 %.

TABLA 17-23

(38)

CARACTERISTICAS DE RESINAS (AMBERLITE-ROHM & HASS, CO)AMBERLITE IA-122 (POLIESTIRENO SULFONATADO).

## a) Características físicas:

$\rho = 51-54 \text{ lb/ft}^3$   
humedad 39-43 %  
grado de tamizado = 16-50 mesh.  
tamaño efectivo = 0.45 - 0.60 mm  
coef. uniformidad = 1.8 max  
volumen vacío = 45-50%

## b) Condiciones de operación sugeridas: (ciclo sodio o hidrógeno)

pH = 1.0-1.4  
 $T_{\text{max}} = 250 \text{ }^\circ\text{F}$   
altura mínima de lecho = 24 in  
flujo de retrólavado = 7 gpm/ft<sup>2</sup> @ 72 °F  
flujo de servicio = 2 gpm/ft<sup>2</sup>

## c) Operación ciclo hidrógeno:

concentración de regenerante: 4-10% HCl o 1.5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
flujo de regenerante: 0.5-0.75 gpm/ft<sup>2</sup>  
flujo de enjuague: 0.5-0.75 gpm/ft<sup>2</sup>, inicialmente: 1.5 gpm/ft<sup>2</sup>  
Requerimiento agua enjuague: 25-50 gal/ft<sup>2</sup>

CONTINUACION TABLA 17-23

SOLUCION AGOTADA (como ppm $\text{CaCO}_3$ )	NIVEL DE REGENERACION (H 50 66 °Bé) lb/ft <sup>3</sup> resina	CAPACIDAD Kgranos como $\text{CaCO}_3$ /ft <sup>3</sup> resina
500 ppm NaCl	2.5	11.5
	5.0	19.0
	7.5	23.0
	10.0	25.0
	15.0	27.0
	25.0	28.5
500 ppm $\text{CaCl}_2$	2.5	7.5
	5.0	12.5
	7.5	15.0
	10.0	17.0
	16.0	19.0

NIVEL DE REGENERACION  
(HCl 30%)  
lb/ft<sup>3</sup>

500 ppm $\text{CaCl}_2$	5.0	11.0
	10.0	17.4
	15.0	22.6
	20.0	26.5
	25.0	29.0

CONTINUACION TABLA 17-23

SOLUCION AGOTADA (como ppm $\text{CaCO}_3$ )	NIVEL DE REGENERACION ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 66 % 80) lb/ft <sup>3</sup> resina	CAPACIDAD Kilogramos como $\text{CaCO}_3$ /ft <sup>3</sup>
500 ppm NaCl	4	14
	6	17
	8	19.7
500 ppm $\text{CaCl}_2$	10	21
	4	8.9
	6	11
	8	12.4
	10	13.7
HCl (700 % lb/ft <sup>3</sup> resina)		
500 ppm NaCl	2	15.5
	4	20
	6	23.8
	8	25.9
500 ppm $\text{CaCl}_2$	2	12.3
	4	17.3
	6	20.9
	8	22.7

## d) Ciclo sodio.

concentración regenerante = 10% NaCl  
 flujo de regenerante = 1 gpm/ft<sup>3</sup>  
 flujo de enjuague = 1 gpm/ft<sup>3</sup>; inicialmente: 1.5 gpm/ft<sup>3</sup>  
 requerimiento de agua de enjuague = 25-75 gal/ft<sup>3</sup>

SOLUCION AGOTADA (como ppm $\text{CaCO}_3$ )	NIVEL DE REGENERACION (lbs NaCl/ft <sup>3</sup> ) resina	CAPACIDAD Kg como $\text{CaCO}_3$ / ft <sup>3</sup>	EFICIENCIA DE RE- GENERACION (lbs - NaCl/Kg removido)
500 ppm $\text{CaCl}_2$	4	15.2	0.26
	6	18.6	0.32
	8	20.7	0.39
	10	22.2	0.45
	15	24.7	0.61

## CONTINUACION TABLA 17-23

## d) Operación ciclo sódico.

NIVEL DE REGENERACION (lbs NaCl/Ft <sup>3</sup> resina)	CAPACIDAD (Kgrs CaCO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup> resina)	EFICIENCIA REGENERACION (lbs NaCl/Kg renovado)
5.0	19	0.26
7.5	24	0.31
10.0	27	0.37
15.0	32	0.47

\* 500 ppm como CaCO<sub>3</sub> de CaCl<sub>2</sub>

**AMBERLITE-200 (RESINA INT. CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA)**

## a) Características físicas.

$\rho = 51-54 \text{ lb/ft}^3$   
 humedad = 46-51 %  
 grado de tamizado = 16-50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.4 - 0.50  
 coeficiente de uniformidad = 2 máx

## b) Condiciones de operación.

pH = 1.0 - 4.0  
 Tmax = 300 °F  
 Altura mínima de lecho = 24 in  
 Flujo de retrolavado = 7 gpm/ft<sup>2</sup> @ 72 °F  
 Flujo de servicio = 2 gpm/ft<sup>3</sup>

## c) Operación ciclo hidrógeno.

concentración de regeneración 4-10% HCl o 1-5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
 flujo de regeneración 0.5 - 0.75 gpm/ft<sup>3</sup>  
 flujo de enjuague 0.5 - 0.75 gpm/ft<sup>3</sup>, inicialmente = 1.5 gpm/ft<sup>3</sup>

## CONTINUACION TABLA 17-23

## AMBERLITE MB3-400 (RESINA FUERTEMENTE BASICA).

## a) Características físicas.

$\rho = 41.48$  lb/ft<sup>3</sup>  
 grado de tamizado = 16-50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.41-0.48 mm  
 coef. uniformidad = 1.8 max.

## b) Condiciones de operación.

sin límites de pH  
 T<sub>max</sub> 140 °F  
 altura mínima de lecho = 24 in  
 flujo de retrolavado = 2.3 gal/ft<sup>2</sup> min @ 70 °F  
 concentración de regeneración = 4% NaOH  
 flujo de enjuague: 0.25 - 0.50 gal/ft<sup>2</sup> min; inicialmente: 1.5 gal/ft<sup>2</sup> min  
 requerimiento de agua de enjuague = 40-90 gal/ft<sup>2</sup>  
 flujo servicio = 2-gal/ft<sup>2</sup> min

## c) Capacidad de intercambio

500 ppm HCl (como CaCO <sub>3</sub> )	NaOH lb/ft <sup>2</sup>	CAPACIDAD (como CaCO <sub>3</sub> ) Egranos/ft <sup>2</sup> resina	EFICIENCIA (lbs NaOH/ Egrano como CaCO <sub>3</sub> )
	2	8.1	0.267
	4	11.3	0.354
	8	14.0	0.571
	10	15.5	0.645
50 ppm CaCl <sub>2</sub> (como CaCO <sub>3</sub> )	1	5.0	0.200
	1	6.1	0.328
	3	8.3	0.382
	4	9.7	0.413
	6	11.8	0.508
	8	13.5	0.602
	10	14.3	0.700
	12	14.9	0.806

% FUGAS EN INF(CI<sup>-</sup>)

12

5-5

3-7

1-5

0.7

0.2

0.1



## CONTINUACION TABLA 17-23

AMBERLITE IRA-403.

## a) Características físicas.

$Q = 43 \text{ lb/ft}^3$   
 contenido de humedad = 50-57%  
 grado de tamizado = 16 a 50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.45-0.55 mm  
 coeficiente de uniformidad = 1.75 max

## b) Características de operación.

sin límites de pH  
 temperatura máxima  
     forma (OH<sup>-</sup>) 140 °F  
     forma (Cl<sup>-</sup>) 170 °F  
 altura de lecho mínimo: 24 in  
 flujo de retrolavado 2-3 gal/ft<sup>2</sup>/min 70 °F  
 concentración de regenerante = 4% NaOH  
 flujo de regenerante = 0.25 - 1.0 gal/ft<sup>3</sup>/min  
 flujo de enjuague = 1.5 gal/ft<sup>3</sup>/min  
 requerimiento de agua de enjuague 40-90 gal/ft<sup>3</sup>  
 flujo de servicio = 2-5 gal/ft<sup>2</sup>/min

## c) Nivel de regeneración y capacidad.

lbs NaOH/ft <sup>3</sup> resina	HCl	CAPACIDAD (como CaCO <sub>3</sub> Kgreno/ft <sup>3</sup> resina)					
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HMnO <sub>3</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> COOH
2	9	11.3	--	16	4.7	14	13.9
4	12	14.6	12.6	19	7.9	16.1	19.8
8	14.9	17.5	16.7	21.3	11.3	18.4	23.4
10	17	19.6	18.9	21.7	13.0	19.8	25.2
12	20.1	22.9	22.0	22.0	15.6	21.8	27.0

## CONTINUACION TABLA 17-23

AMBELLITE IRA-510 (RESINA FUERTEMENTE BASICA, TIPO 11)

## a) Características físicas.

$Q = 44 \text{ lb/ft}^3$   
 contenido de humedad = 38-43 %  
 grado de tamizado 20-50 mesh  
 tiempo efectivo 0.41-0.48 min  
 coeficiente de uniformidad 1.8 max

## b) Condiciones de operación.

sin límite de pH  
 temperatura máx.  
 (OH<sup>-</sup>) 105 °F  
 (Cl<sup>-</sup>) 170 °F  
 altura mínima de lecho = 24 in  
 flujo de retrolavado = 3 gpm/ft<sup>2</sup> @ 70 °F  
 concentración de regenerante = 4% NaOH  
 flujo de regenerante = 0.5 gpm/ft<sup>3</sup>  
 flujo de enjuague = 0.5 gpm/ft<sup>3</sup>; inicial = 1.5 gpm/ft<sup>3</sup>  
 requerimiento de agua = 75 gal/ft<sup>3</sup>  
 flujo de servicio = 2.4 gpm/ft<sup>3</sup>

## c) Capacidad de intercambio

	lbs NaOH/ft <sup>3</sup> de resina	CAPACIDAD Kgrmos como CaCO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup> resina	EFICIENCIA (lbs NaOH/ Kgrmo)(como CaCO <sub>3</sub> )
500 ppm (como CaCO <sub>3</sub> ) de HCl en influente	4 6 8 10 12	21.6 23.1 23.8 24.4 24.9	0.185 0.260 0.336 0.410 0.483
500 ppm (como CaCO <sub>3</sub> ) de NaCl en influente	4 6 8 10 12	19.5 20.7 21.6 22.2 22.6	0.205 0.290 0.370 0.450 0.531

## CONTINUACION TABLA 17-23

AMBERLITE IRA-900 (FUERTEMENTE BASICA TIPO I)

## a) Características físicas.

$\rho = 42 \text{ lb/ft}^3$   
 contenido de humedad = 60-64%  
 grado de tamizado = 16-50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.43-0.52 mm  
 coeficiente uniformidad = 1.8 max

## b) Condiciones operación.

sin límite de pH  
 temperatura máxima  
 (an<sup>+</sup>) 140 °F  
 (cl<sup>-</sup>) 170 °F  
 altura de lecho mín = 24 in  
 concentración de regenerante = 4% NaOH  
 flujo regenerante = 0.25-0.5 gal/ft<sup>3</sup>/min  
 velocidad de flujo de enjuague = 1.5 gal/ft<sup>3</sup>/min (inicial);  
 0.5 gal/ft<sup>3</sup>/min  
 agua de enjuague = 75 gal/ft<sup>3</sup>  
 flujo de servicio = 1-3 gal/ft<sup>3</sup>/min

## c) Nivel de regeneración y capacidad.

NaOH/ft <sup>3</sup> resina (75 °F)	HCl	CAPACIDAD (Kgrs CaCO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup> resina)		
		N <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
4	8.8	10.3	8.6	14.4
6	10.4	11.8	10.3	15.6
8	11.5	13.0	11.5	15.9
10	12.2	13.9	12.4	16.2

## CONTINUACION TABLA 17-23

**AMBERLITE 919 (RESINA FUERTEMENTE BASICA, TIPO 1)**

## a) Características físicas.

$e = 42 \text{ lb/ft}^3$   
 contenido de humedad = 50-55%  
 grado de tamizado = 16-50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.40 - 0.50 mm  
 coeficiente de uniformidad

## b) Condiciones de operación.

sin límites de pH  
 temperatura máx.  
 (OH<sup>-</sup>) 105 °F  
 (Cl<sup>-</sup>) 170 °F  
 altura lecho mínimo: 24 in  
 concentración de regenerante = 4% NaOH  
 flujo de regenerante = 0.25-0.5 gal/ft<sup>3</sup>/min  
 flujo de enjuague = 1.5 gal/ft<sup>3</sup>/min (inicial); 1.5 gal/ft<sup>3</sup>  
 requerimiento de agua de enjuague = 75 gal/ft<sup>3</sup>  
 flujo de servicio = 1-3 gal/ft<sup>3</sup>/min

## c) Nivel de regeneración y capacidad de intercambio.

lb NaOH/ft <sup>3</sup> resina	MCL	CAPACIDAD (Kgrx CaCO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup> resina)		
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
4	16.2	18.4	20	16.1
6	17.3	19.6	22.4	17.2
8	17.8	20.1	22.7	17.9
10	18.3	20.6	23.7	18.3

**AMBERLITE IRA-91 (RESINA DEBILMENTE BASICA)**

## a) Características físicas.

$e = 38 \text{ lb/ft}^3$   
 contenido de humedad = 53-59%  
 grado de tamizado = 16-50 mesh  
 tamaño efectivo = 0.4 - 0.5 mm

## CONTINUACION TABLA 17-23

coeficiente de uniformidad = 2 máx

## b) Condiciones de operación.

límites de pH = 0 - 7

T<sub>max</sub> = 212 °F

altura de lecho mín = 24 in

concentración de regenerante = 4%

flujo de regenerante = 0.5 - 1.0 gal/ft<sup>3</sup>/minflujo de enjuague = 0.5 gal/ft<sup>3</sup>/min (inicial); 1.5 gal/ft<sup>3</sup>/minrequerimiento agua de enjuague = 25 - 30 gal/ft<sup>3</sup>flujo de servicio = 1 - 5 gal/ft<sup>3</sup>/min

## c) Nivel de regeneración y capacidad.

19 Kg (como CaCO<sub>3</sub>)/ft<sup>3</sup> resina27 lb NaOH/ft<sup>3</sup>24 lb NH<sub>4</sub>OH/ft<sup>3</sup>1.2 lb NH<sub>3</sub>/ft<sup>3</sup>3.6 lb Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ft<sup>3</sup>AMBERLITE IR-120

## a) Características físicas.

Contenido de humedad = 44-60%

tamaño efectivo = 0.47 - 0.62 mm

coeficiente de uniformidad = 1.8 máx

Q = 40-54 lb/ft<sup>3</sup>

volumen vacío = 35 - 40%

## b) Condiciones de operación (ciclo sodio e hidrógeno)

pH 1.0 - 14.0

T<sub>max</sub> 250 °F

altura mínima de lecho = 24 in

flujo de servicio 2 gal/ft<sup>3</sup>/min

## c) Operación ciclo hidrógeno

concentración de regenerante: 10% HCl

1-5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>velocidad de flujo de regenerante = 0.5 - 1.0 gal/ft<sup>3</sup>/minvelocidad de flujo de enjuague = 1.5 gal/ft<sup>3</sup>/minrequerimientos de agua de enjuague = 25 a 75 gal/ft<sup>3</sup>

## CONTINUACION TABLA 17-23

## Regeneración.-

SOLUCION ADITADA (ppm como CaCO <sub>3</sub> )	NIVEL DE REGENERACION (lbs H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 56 °Bé/ft <sup>3</sup> resina)	(Kgranos como CaCO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup> resina)
500 ppm NaCl	5	19
	10	25
500 ppm CaCl <sub>2</sub>	5	12.5
	10	17

	NIVEL DE REGENERACION (lbs HCl 30%/ft <sup>3</sup> resina)	
500 ppm CaCl <sub>2</sub>	5	11.0
	15	22.5
	25	27.5

## d) Operación ciclo sódico.

concentración de regenerante = 10% NaCl  
 velocidad de flujo de regenerante = 1 gpm/ft<sup>3</sup>  
 velocidad de flujo de enjuague = 1 gpm/ft<sup>3</sup>; inicialmente =  
 1.5 gpm/ft<sup>3</sup>  
 requerimientos agua de enjuague = 25-75 gal/ft<sup>3</sup>

	NIVEL DE REGENERACION (lbs NaCl/ft <sup>3</sup> )	CAPACIDAD Kgranos como CaCO <sub>3</sub> / ft <sup>3</sup>	EFICIENCIA DE REGENERACION (lbs NaCl/Kg removido)
500 ppm como CaCO <sub>3</sub>	5	17.8	0.28
	15	29.3	0.51
	25	34.0	0.74

FIG. 17-6 AMBERLITA IR - 120. DATOS DE FUGA.

(21)

REGENERACION - 5 lb.  $H_2SO_4$  (66°Bé)/pie<sup>3</sup>.

CONCENTRACION DE SODIO (% DEL TOTAL DE CATIONES).

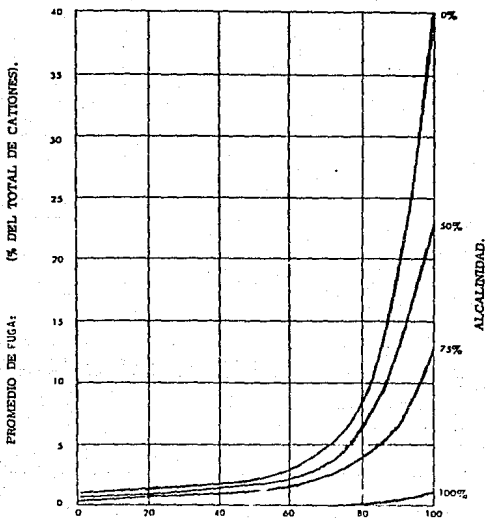
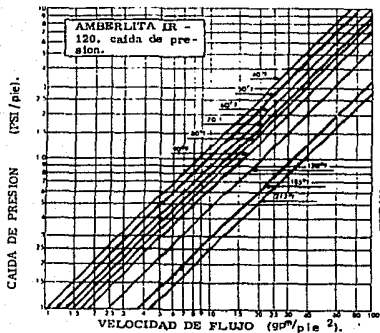
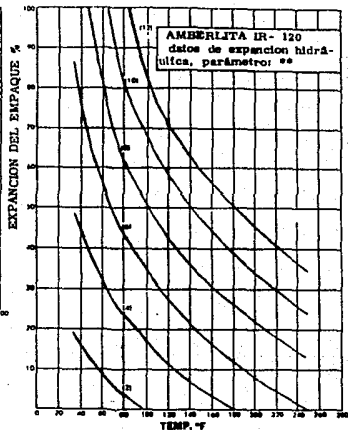


FIG.17-7 DATOS DE CAIDA DE PRESION Y EXPANCIION HIDRAULICA (21)



\*\* velocidad del flujo gpm/ pie.





### 18.1 DESAERACION

Los desaeradores se usan para reducir el contenido de los gases a un mínimo. Esto se aplica generalmente al agua de alimentación a calderas donde se requiere que el contenido de oxígeno sea mínimo con la intención de reducir la corrosión en la caldera y en las líneas de retorno de condensados.

### 18.2 ELIMINACION DE OXIGENO, NITROGENO Y BIXIDO DE CARBONO POR EBULLICION

Ya que las solubilidades del oxígeno, nitrógeno y  $\text{CO}_2$  son cero en el punto de ebullición, el agua puede liberarse de ellos hirviéndola y desfogando los gases que escapan. Esto puede ser efectuado hirviendo el agua a cualquier presión. El agua fría hervirá en el vacío, de manera que la desaeración de agua a temperatura ordinarias puede efectuarse por medio de vacío. Los factores importantes son: (1) hervir el agua, (2) desfogue de los gases que se desprenden.

No se puede obtener una desaeración completa aumentando simplemente la temperatura al punto de ebullición, o con agua fría aumentando el vacío hasta que el agua empiece a hervir. Ya que la solubilidad de los gases depende también de su presión parcial a menor presión parcial más eficiente será su eliminación. Por lo que, si el agua se hierve en un espacio cerrado, entre más grande sea el volumen del vapor de agua en comparación con el volumen de los gases expulsados, más completa será su eliminación. Excepto para el desaerador al vacío en el cual no se emplea calentamiento, la desaeración es casi invariablemente efectuada usando vapor de escape para calentar el agua y eliminar los gases.

### 18.3 TIPOS DE DESAERADORES

#### 18.3.1 CALENTADORES ABIERTOS

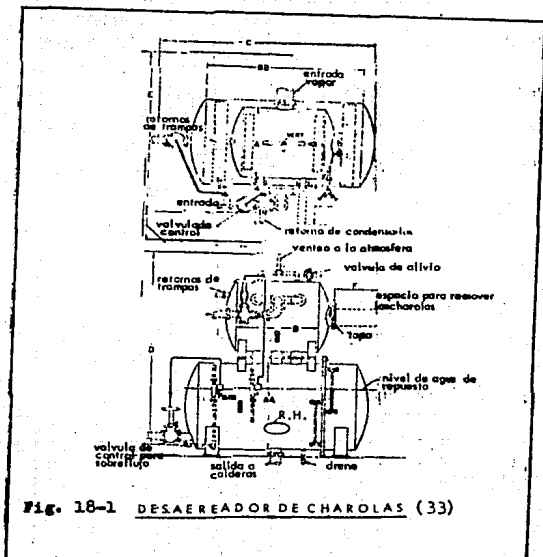
Estos calentadores se emplean con frecuencia para calentar agua para calderas y efectuar una desaeración limitada en aquéllas de baja presión, que no están equipadas con economizadores. El grado de desaeración a que se llega en los calentadores abiertos, no es completo, pero en los equipos bien diseñados el contenido de oxígeno disuelto usualmente se reduce de 0.1 a 0.2 ml/l, y la temperatura usualmente deberá aumentarse 3 o 4° F la temperatura del vapor.

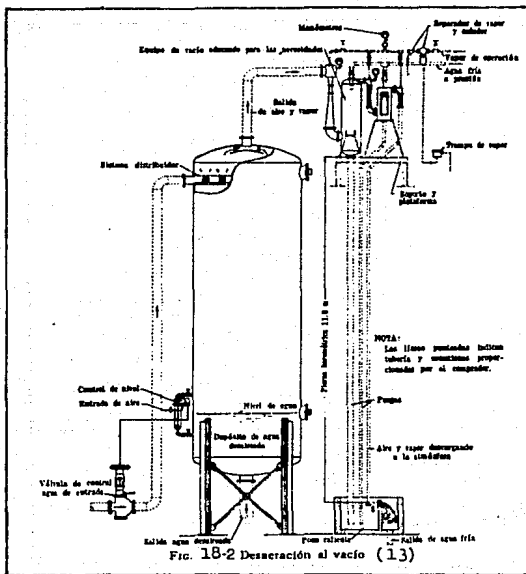
#### 18.3.2 CALENTADORES TIPO BOCIO PARA DESAERAR

En los calentadores de tipo abierto, el vapor se usa una sola vez y la desaeración efectuada no es completa. En el calentador des-aerador, el vapor se usa dos veces primero para lavar el agua caliente pero no completamente des-aerada del primer calentador y, segundo, para calentar y eliminar la mayor parte de los gases disueltos en el calentador primario. Este sistema elimina el oxígeno a prácticamente cero, o sea menos de 0.005 ml/l, que es la garantía del fabricante. El nitrógeno también se elimina prácticamente en su totalidad, lo mismo se puede decir del bióxido de carbono y si el agua contiene alguna alcalinidad de bicarbonato, una considerable parte del bióxido de carbono de los bicarbonatos también se elimina, aumentando el pH usualmente sobre 8.8.

#### 18.3.3 CALENTADORES DE CHAROLAS Y DE ATOMIZACION

En los calentadores de charolas el agua se calienta pasando sobre una serie de charolas superpuestas y en una atmósfera de vapor. Estos calentadores están disponibles en diferentes diseños entre los que se cuentan los de flujo a contra-corriente, flujo cruzado y flujo paralelo. En los tipos de contra-corriente como su nombre lo indica, el flujo del agua y el vapor son opuestos a través de las





charolas. Es decir el vapor fluye hacia arriba poniéndose en contacto con el agua que desciende a través de las charolas. En los de flujo cruzado, usualmente se dispone de dos series de charolas superpuestas, el flujo de vapor cruza la serie de charolas inferiores y luego asciende a través de las superiores. En los de flujo paralelo, el flujo del agua y del vapor siguen el mismo camino ascendente.

En los calentadores desaireadores del tipo de atomización, el agua usualmente se desairea en un proceso de dos pasos. En este tipo el vapor entrante atomiza el agua parcialmente desaireada del primer paso, después de lo cual sirve para calentar el agua del primer paso, en éste el agua se atomiza.

#### 18.3.4 DESARACION DE AGUA FRIA AL VACIO

Puesto que la solubilidad del oxígeno, nitrógeno y bióxido de carbono son cero al punto de ebullición del agua, el agua fría puede desairearse si se reduce la presión hasta que hierva. Esto se lleva a efecto pasándola a través de un desaireador al vacío. No es económica la desaireación completa, aun cuando es posible. En lugar de esto se desairea el agua para obtener un contenido mínimo similar al que se obtiene con otros equipos. El contenido de oxígeno residual varía en diferentes aplicaciones.

Cuando el agua debe usarse para propósitos de enfriamiento y la contaminación accidental por hierro es cuestión de pocos momentos la desaireación usualmente se lleva a cabo de manera que el oxígeno residual sea poco menor de 0.3 ml/l. Puesto que la desaireación también afecta el contenido de bióxido de carbono, el aumento consecuente del valor del pH tendría una posterior reducción en la corrosividad.

El desaireador al vacío consiste de un tanque de acero en el que se colocan (1) una serie de charolas de madera desfleada, (2)

empaquete de anillos Rasching y se monta de tal manera que se puede obtener una pierna barométrica por el efluente. El vacío necesario para instalaciones grandes se obtiene mejor con instalación de eyectores de vapor. Generalmente estas instalaciones se colocan en serie para poder lograr el vacío necesario.

El flujo en estos equipos es usualmente de 40 a 50  $\text{gpm/ft}^2$  de superficie transversal, pero con agua de 32 °C este flujo puede llegar a doblarse. Además de otras aplicaciones como las descritas, los desaeradores se usan para eliminar el bióxido de carbono formado por los bicarbonatos en el proceso de desmineralización en su primer paso.

#### 18.4 CONTROL DE CORROSION

La corrosión no es, fundamentalmente, más que la disolución del hierro, u otros materiales de las tuberías, por el agua. El mecanismo por medio del cual tiene lugar esta acción, así como los factores que controlan la velocidad de la misma, forman una teoría complicada. Sin embargo, aunque sea en forma sucinta, diremos que la corrosión del hierro consiste en reemplazar las moléculas de éste por iones de hidrógeno del agua y en la formación de moléculas de hidrógeno y de iones de hierro (ferroso). Los iones ferrosos reaccionan entonces con los iones hidróxido del agua formando un compuesto insoluble que es el hidróxido ferroso. Estas acciones tienen lugar en la superficie del metal y tienden a formar capas protectoras, tanto de hidrógeno como de hidróxido ferroso formados, para prevenir que más iones hidrógeno se pongan en contacto con el hierro.

Sin embargo, la acción erosionadora del agua en movimiento, así como la presencia de ciertas "impurezas", especialmente el oxígeno y bióxido de carbono, tienden a desprender estas películas tan pronto como se van formando. Si hay bióxido de carbono, éste remove-

rá el hidróxido ferroso insoluble combinándose con él para formar bicarbonato ferroso soluble. Si hay oxígeno, éste removerá el hidrógeno combinándose con él para formar agua. Sin embargo, el oxígeno juega un papel adicional, cuya naturaleza depende de que haya o no bióxido de carbono. En ausencia de bióxido de carbono, el oxígeno convertirá el hidróxido ferroso en óxido férrico (orín de hierro) que es aún menos soluble y permanece en la superficie del metal formando una capa protectora. Si hay bióxido de carbono en cantidad suficiente para disolver el hidróxido ferroso; entonces el oxígeno convertirá al bicarbonato así formado en óxido férrico (orín).

El control de la corrosión puede llevarse a cabo por uno o todos los procedimientos siguientes: (1) por reducción de la concentración de iones hidrógeno, o sea elevando el valor del pH; (2) por reducción del contenido de oxígeno; (3) por reducción del contenido de bióxido de carbono, y (4) manteniendo una capa protectora sobre la superficie del metal para que éste no pueda ponerse en contacto con los iones de hidrógeno.

TABLA 18-1 DESABREADOR AL VACIO.

FLUJO DE AGUA (GPM)	DIAMETRO ft in		ALTURA ft in		INFLUENTE (ppm)		EFLUENTE (ppm)		TEMPERATURA (°F)
					O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
60000	11	0	56	6	8.5	70	0.05	2.5	70
5500	14	0	43	0	11.0	-	0.1	-	50
1650	8	0	58	0	11.0	-	0.1	-	50
1020	6	0	24	3	5	-	0.1	-	80
1000	6	0	15	3	5	-	0.1	-	100
750	5	6	33	0	-	100	-	5.0	70
532	4	6	21	4	11.0	50	0.1	4.0	50
500	4	0	22	0	10.0	54	0.1	2.5	60
270	3	6	21	6	8.0	102	0.4	10.0	50
200	3	6	20	0	-	135	-	10.0	75

TABLA 18-2 DESAERADOR A DIFERENTES TEMPERATURAS

FLUJO DEL AGUA TRATADA: 2500 gal/min	TEMPERATURA DEL AGUA	
INFLUENTE $O_2$ : 88 ppm	35°F	50°F
INFLUENTE $O_2$ SATURADO		
EFLUENTE $CO_2$ , ppm	5	5
EFLUENTE $O_2$ , ppm	0.2	0.2
DIAMETRO x ALTURA, ft	10x17	10x15
TOTAL DE EVACUACION, $ft^3/hr$	1900000	690000
VAPOR (a 100 psi) REQUERIDO, lb/hr	3000	1450
AGUA PARA EL CONDENSADOR, gal/min	140	75

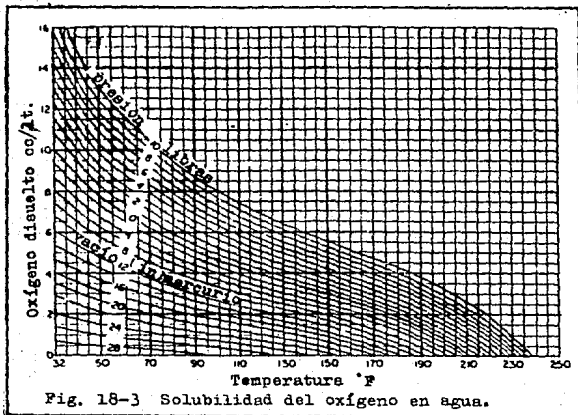


Fig. 18-3 Solubilidad del oxígeno en agua.



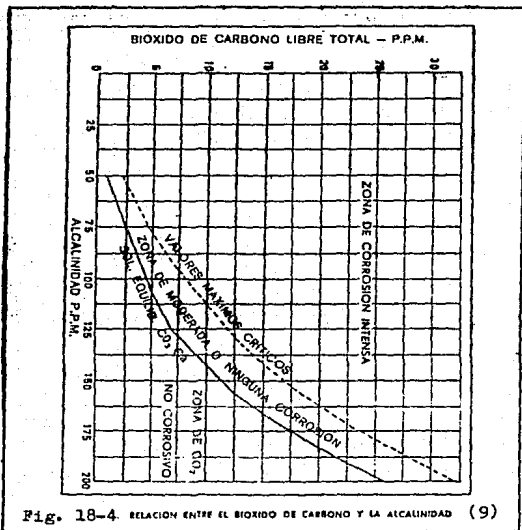


Fig. 18-4. RELACION ENTRE EL BIOXIDO DE CARBONO Y LA ALCALINIDAD (9)

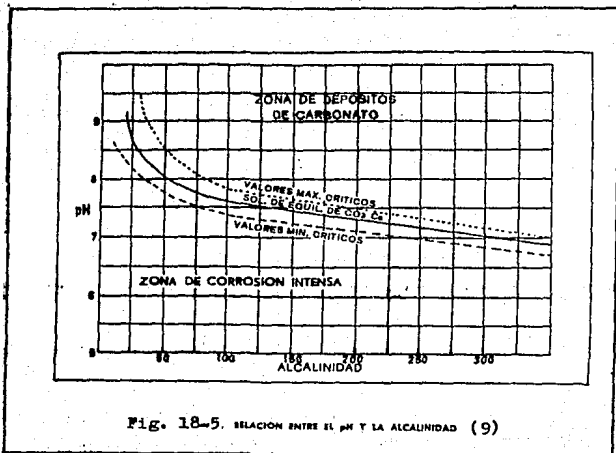


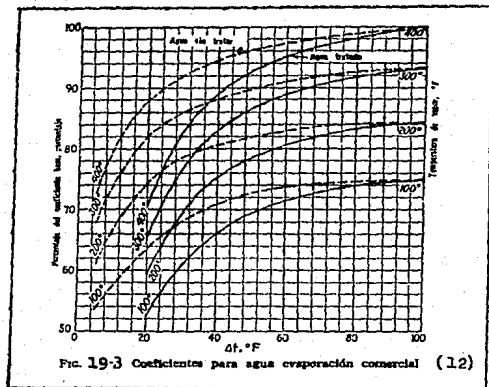
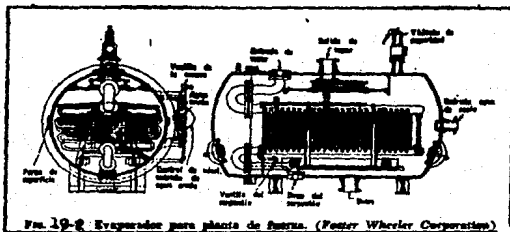
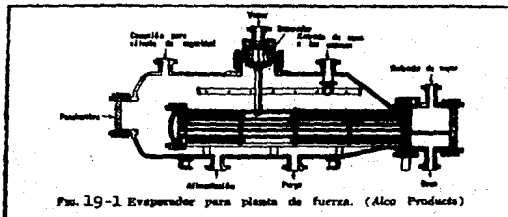
Fig. 18-5. RELACION ENTRE EL pH Y LA ALCALINIDAD (9)

### 19.1 CLASIFICACION DEL EQUIPO DE VAPORIZACION

Hay dos tipos principales de equipo tubular vaporizador usado en la industria; calderas e intercambiadores vaporizadores. Las calderas son aparatos tubulares calentados directamente, que por principio convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización. Los intercambiadores vaporizadores no tienen fuego directo y convierten el calor latente o sensible de un fluido en calor latente de vaporización de otro. Si se usa un intercambiador vaporizador para la evaporación de agua o de una solución acuosa, es casi convencional llamarlo evaporador. Si se usa para suministrar los requerimientos del calor en el fondo de una columna de destilación ya sea que el vapor formado sea vapor de agua o no, es llamado un hervidor. Cuando no se usa para la formación de vapor de agua y no forma parte de un proceso de destilación, un intercambiador vaporizador se llama simplemente vaporizador. Cuando en conexión con un sistema de generar potencia se usa un evaporador para la producción de agua pura o para cualquiera de los procesos asociados con la generación de potencia, se llama evaporadores para plantas de fuerza. Cuando se usa un evaporador para concentrar una solución química mediante la evaporación del solvente agua, se llama evaporador químico. Los dos tipos difieren en diseño.

### 19.2 EVAPORADORES PARA PLANTAS DE FUERZA

Uno de los principales propósitos de los evaporadores para plantas de fuerza es proveer de agua relativamente pura para la alimentación de la caldera. Las principales características incorporadas en los evaporadores para plantas de fuerza, son, un elemento calefactor tubular, un espacio en el que las gotitas del líquido que se arrastran debido al estallido de las burbujas pueden separarse, y un medio para remover la incrustación de la parte exterior de los tubos. Todos operan llenos de agua hasta la mitad, la mitad superior



es el espacio en el cual las gotas de agua se separan del vapor y, asimismo, todos están equipados con separadores que regresan el líquido separado debajo del nivel de trabajo del evaporador.

### 19.3 TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION

Cuando una libra de vapor se evapora de un recipiente con agua hirviendo, muchas de las impurezas originalmente presentes en el agua permanecen en ella y tienden a formar depósitos en la superficie de calentamiento sumergida. Todas las aguas naturales contienen sales minerales, de las que aquellas de calcio y magnesio en particular, forman incrustaciones. La incrustación se forma más rápidamente en superficies calientes y es una resistencia adicional al flujo de calor. Es perjudicial para la operación de los evaporadores que están diseñados para altos índices de transferencia de calor. El agua se clasifica como dura o blanda, principalmente atendiendo a su comportamiento en el uso casero. El jabón reacciona con las sales de calcio y magnesio formando compuestos insolubles, pero el agua puede ser considerada suave en el hogar puede no serlo para alimentar continuamente un evaporador. Para evitar o reducir la acumulación de materiales que puedan formar depósitos o incrustaciones, es costumbre vaporizar sólo 90% del agua continuamente alimentada, el restante 10% se drena continuamente como purgas.

Hay tres métodos químicos principales mediante los cuales el agua puede ablandarse. Ellos son: (1) proceso cal-carbonato en frío, (2) cal-carbonato en caliente, y (3) zeolitas. Las razones son las siguientes: cuando las burbujas de vapor se separan del líquido en la superficie del recipiente, el vapor arrastra o atrapa algo del agua líquida, que no ha sido destilada y consecuentemente contiene las impurezas concentradas en la purga. Cuando estas pequeñas cantidades de arrastre se alimentan continuamente a una caldera, originan que se formen incrustaciones en la pared de los tubos. Además, au-

menta la cantidad de agua de purga que debe eliminarse de la caldera donde las temperaturas son mayores que en el evaporador y representan pérdidas en calor sensible del sistema generador de potencia.

El ablandamiento del agua antes de entrar al evaporador no es de ninguna manera una garantía de pureza del agua de alimentación a la caldera, puesto que hay un sinnúmero de factores que tienen influencia en la calidad de arrastre que efectúa en la superficie del líquido. Especialmente significativa es la relación de sólidos totales a sólidos suspendidos o la relación de sólidos totales a sólidos sódicos alcalinos, particularmente cuando se acompañan por una gran cantidad de sólidos suspendidos o pequeñas cantidades de sólidos inorgánicos. Cuando el ablandamiento reduce la tensión superficial del agua apreciablemente en forma invariable se presentan fenómenos de espuma. El control de la espuma es, consecuentemente, una de las más importantes consideraciones en el diseño del evaporador. Los estándares de pureza requeridos para el producto de un evaporador típico en los Estados Unidos, contienen no más de dos o cuatro partes de sólidos minerales por galón americano. No obstante estas precauciones en un evaporador es tal que se consideran normal la limpieza de un evaporador para la planta de fuerza cada 24 h.

Hay tres tipos principales de incrustaciones: (1) incrustación suave que puede ser lavada del tubo, (2) incrustación dura que puede ser removida únicamente en forma manual, y (3) incrustación dura que puede ser desprendida del tubo. Para desincrustar se dreña toda el agua caliente y se circula vapor de agua por los tubos, esto causa una expansión sólo en los tubos, de manera que se flexionan si originalmente se colocaron rectos o tienden a enderezarse si originalmente se instalaron con dobleces en sus centros. Debido a la expansión, la incrustación caliente se somete a esfuerzo, y se rocía agua fría sobre los tubos resultando una súbita concentración diferencial que causa que la incrustación se rompa y se desprenda. Si el

evaporador es pequeño, 100 a 600 pies, es costumbre inundarlo con agua fría en lugar de rociar el agua. Para las instalaciones grandes esto no se aconseja, ya que el tiempo requerido para llenar y drenar al aparato originaría un periodo largo de paro; se emplea el rocío.

#### 19.4 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS EVAPORADORES

Las tasas de transferencia de calor en evaporadores para plantas de fuerza no se tratan en la base de coeficientes de películas individuales. Debido a la rapidez de la formación de la incrustación y de la naturaleza de la resistencia del depósito, las tasas totales se basan en el ciclo de operación normal de una desincrustación cada 24 h. En la fig. 19.3, se grafican los porcentajes de un coeficiente total promedio  $U_d$  contra  $\Delta t$ , que en un evaporador es la diferencia entre la temperatura de saturación del vapor de calentamiento y la temperatura de saturación del lado de la coraza. Esta diferencia de temperatura siempre se emplea cuando se diseñan evaporadores a partir de coeficientes totales. En los evaporadores para plantas de fuerza esto se llama carga térmica, y en los evaporadores químicos es la diferencia de temperatura aparente y se designa por  $(\Delta t)_a$ . Los evaporadores de  $U_d$  y  $\Delta t$  definidos así permiten la sustitución directa de  $U_d$  en  $Q=U_d \Delta t$ . El coeficiente total es influenciado grandemente por la presión en el sistema, puesto que el volumen de vapor de las burbujas es menor a alta presión que a presión baja, de manera que pueden esperarse mayores coeficientes de la primera condición. Esto se refleja en las curvas que se graficaron en la fig. 19.3 como funciones de la temperatura del vapor y que representan directamente la presión de operación de la coraza. Las curvas cambian de inclinación abruptamente a altas cargas térmicas debido a la interferencia incipiente. El valor base del coeficiente total se varía en la industria debido a problemas especiales sugeridos por el análisis químico del agua y el cambio de la línea de competencia

entre los manufactureros.

Un valor de  $700 \text{ Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^\circ\text{F})$  es un buen promedio para el valor base de Ud aún cuando se han usado frecuentemente coeficientes base de valores más altos.

### 19.5 DIFERENCIAS DE TEMPERATURA A FLUJOS MENORES QUE EL MÁXIMO

La superficie llenará la mitad de la coraza o menos, y el método de espaciar la superficie varía grandemente de un fabricante a otro. Los tubos, como regla, se espacian a mayor distancia en los evaporadores que en los intercambiadores.

De acuerdo a la fig. 19.3, sería posible obtener mayores coeficientes totales hasta una carga térmica de  $100^\circ\text{F}$ , aun cuando la temperatura del vapor de  $212^\circ\text{F}$  corresponda a la presión atmosférica. Se estableció previamente que la diferencia de temperatura crítica a presión atmosférica fue de  $45^\circ\text{F}$ . Una carga térmica de  $\Delta t$  de  $100^\circ\text{F}$  corresponde a una diferencia de temperatura crítica  $(\Delta t)^w$  de cerca de  $75^\circ\text{F}$ , pero la limitación de la diferencia crítica de temperatura es valedera únicamente cuando se opera a flujo máximo de calor. En la fig. 14.1 el flujo máximo para  $212^\circ\text{F}$  del valor y  $t=100^\circ\text{F}$  es:  $700 \times 0.85 \times 100 = 60\,000 \text{ Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)$ .

Si el flujo tiene un valor menor que el máximo, la diferencia de temperatura  $(\Delta t)_w$  puede ser mayor que la diferencia crítica de temperatura. El flujo de calor es el índice principal de la interferencia por el vapor, y por esta razón siempre se restringe a una fracción del máximo obtenible cuando se diseñan evaporadores comerciales. Restringiendo el flujo a un máximo de diseño conduce a un aumento de la superficie total con el propósito de reducir la cantidad vaporizada por unidad de superficie de transferencia térmica.

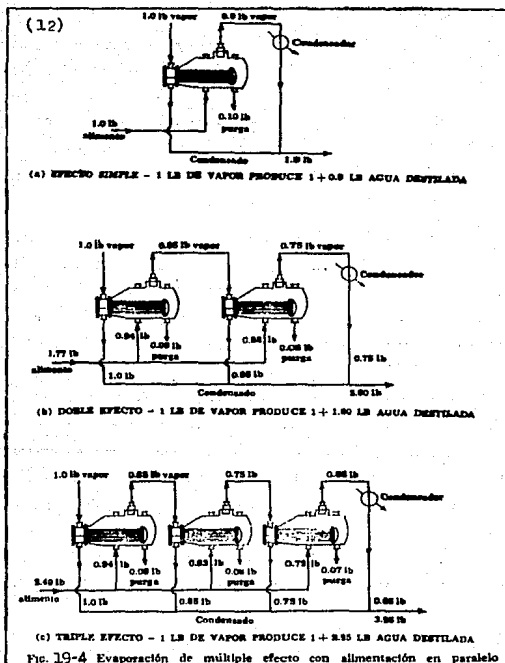


## 19.6 EVAPORACION DE MULTIPLE EFECTO

En la producción de agua destilada el vapor formado en el evaporador es vapor útil tanto como agua relativamente pura. Si se suministra una libra de vapor de agua a un evaporador, como se muestra en la fig. 19.4a, éste se puede usar para producir cerca de 0.9 lb de vapor de agua de una libra de agua. El resto de 0.1 lb de agua contiene la mayoría de las impurezas y se elimina del evaporador como purga. Las 0.9 lb de vapor del evaporador pueden condensarse precalentando parcialmente la alimentación del evaporador, o en la planta de fuerza puede mezclarse directamente con los condensados fríos antes de alimentarse a la caldera.

Sin embargo, si la libra original de vapor fuera suministrada a un proceso de doble efecto como se muestra en la fig. 19.4b, y el vapor producido en el primer evaporador se usara como fuente térmica en un segundo evaporador que operara a menor presión que el primero, podría hacerse una utilización adicional de la mayoría del calor. Si ambos evaporadores fueran alimentados en paralelo con agua cruda, cerca de 0.85 lb de agua pura se formarían del primer efecto, y cerca de 0.75 lb se formarían en el segundo. Por cada libra de vapor suministrado podrían producirse cerca de 1.6 lb de agua pura. La libra original de vapor puede también considerarse como una libra de agua para. Cuando el vapor que se forma en el primer efecto es usado como medio de calentamiento en un segundo evaporador de doble efecto. Cuando se aplica a tres efectos, como se muestra en la fig. 19.4c, es un evaporador de triple efecto y la libra original de vapor produce cerca de 2.25 lb de agua pura.

Para mantener la diferencia de temperatura para transferencia de calor entre el vapor de un efecto y el líquido en ebullición del siguiente, la presión en cada uno de los evaporadores que se suceden debe ser menor que en los predecesores. La cantidad de purga a la



que se llega por experiencia con agua de diferentes calidades, lleva con ella considerable calor sensible y, por lo tanto, reduce la cantidad de vaporización que pueda ser realizada en los efectos siguientes. Debido en parte a este escape de calor del sistema, hay un límite al número de efectos que son justificables. Los cargos fijos por los efectos adicionales en el último análisis, disipan las ganancias en energía que resultan del uso de un gran número de efectos.

### 19.7 PROCESOS DE EVAPORACION EN PLANTAS DE FUERZA

Los procesos de evaporación en estas plantas se clasifican en cuatro entidades:

- 1.- Evaporadores de agua de compensación para alimentar a la caldera.
- 2.- Evaporadores de proceso para la producción de agua purificada.
- 3.- Evaporadores-transformadores de calor.
- 4.- Destiladores de salmueras.

#### 19.7.1 EVAPORADORES DE AGUA DE COMPENSACION

Este tipo de evaporadores suministra agua de alimentación a las calderas para reemplazar las fugas y pérdidas del sistema como vapor de proceso en plantas o como condensados que se desechan. Este es, de hecho, el proceso de evaporación de más volumen y usualmente se efectúa en un evaporador de doble efecto, dependiendo de las características del ciclo de condensado en la planta de fuerza y la cantidad requerida de agua de compensación. Los evaporadores en sí son pequeños, contienen de 100 a 1000 pies<sup>2</sup> de superficie.

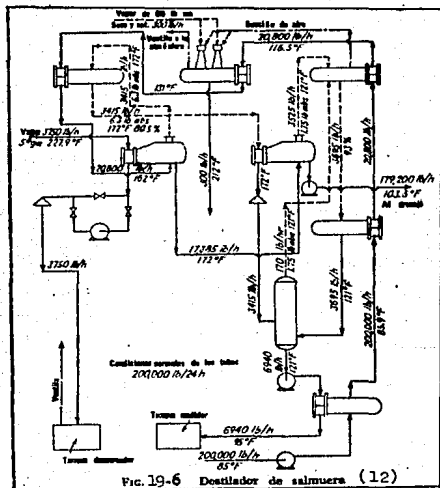
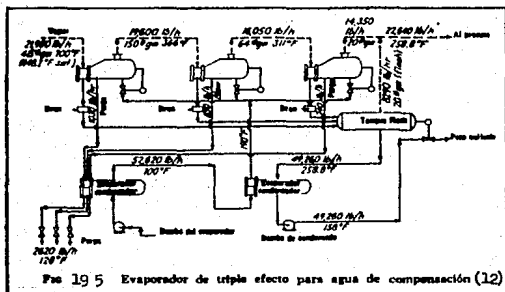
### 19.7.2 EVAPORADORES DE PROCESO

Hay cierto número de industrias que requieren continuamente grandes cantidades de agua destilada. Este tipo de plantas emplean evaporadores de doble, triple o cuádruple efecto y reciben calor ya sea de una purga de la turbina o directamente de la caldera. La selección del número de efectos está correlacionada con los cargos fijos y el costo del vapor de operación. Los evaporadores de múltiple efecto con alimentación paralela no necesitan tener todos los efectos operando simultáneamente, y pueden ajustarse si la demanda de agua varía. Los evaporadores de este tipo de servicio son, generalmente, de tamaño medio, cerca de 500 a 2000 pies<sup>3</sup> por coraza.

### 19.7.3 EVAPORADORES-TRANSFORMADORES DE CALOR

Los evaporadores transformadores de calor son un sistema de efecto simple con una o más corazas en paralelo, que reciben vapor de escape de una turbina o una máquina de alta presión. El propósito de estos evaporadores es el de condensar vapor de agua de una caldera de alta presión que ha pasado a través de una turbina y luego al evaporador. El condensado se regresa luego directamente a la caldera de alta presión mediante una bomba de ayuda, manteniendo así el circuito de alta presión cerrado, y al mismo tiempo se mantiene la demanda de vapor y de agua de alta presión. Obviamente, las instalaciones de calderas y turbinas de alta presión se ven afectadas favorablemente por este circuito. Mediante la condensación de vapor de escape de la máquina o turbina de alta presión, la transferencia de calor en el evaporador se usa para producir grandes cantidades de vapor de proceso, las que en gran parte nunca retornan al sistema evaporador. Si el condensado no regresa, es debido a que puede ser difícil colectarlo o que el vapor pueda consumirse en un proceso químico o de calentamiento o que contamine continuamente. Este tipo de evaporadores es relativamente grande habiéndose construido unida-

des hasta con 11 000 pies<sup>2</sup> de superficie, capaces de producir de 15 000 a 200 000 lb/h de vapor. El tamaño unitario de estos evaporadores es de 10 a 11 pies de diámetro y de 40 a 50 pies de longitud. No hay muchas instalaciones de este tipo, pero donde existen se necesitan grandes cantidades de vapor de calentamiento o de proceso. Se sobreentiende que una caldera de alta presión operando a 1 400 lb/plg<sup>2</sup> presión de estrangulamiento y descargando a 200 lb/plg<sup>2</sup>, produce cantidades de potencia derivada. Esta potencia se carga únicamente con el calor extraído por el paso del vapor a través de la turbina, los cargos remanentes deben adjudicarse a los costos de producción de vapor de alta presión que es el objetivo primario del ciclo de vapor. Cuando la energía de una línea de alta presión se usa continuamente para producir vapor de baja presión para propósitos distintos a los de la instalación original, se llama transformador de calor, por su similitud a un transformador eléctrico para reducir la tensión y también a un transformador de válvula reductora. Esta es, en realidad, la única manera en la que el vapor saturado de alta presión puede convertirse en vapor saturado de baja presión sin sobrecalentarlo. Muchas veces el vapor que va al proceso debe transportarse a distancias considerables. Para prevenir la condensación, el vapor deberá estar algo sobrecalentado antes de abandonar el sistema de generación; no obstante, el evaporador-transformador produce únicamente vapor saturado. Para este propósito se emplea generalmente un calentador o recalentador por el que pasa el vapor por la coraza y llega a los tubos del evaporador, y el vapor del evaporador pasa por los tubos del calentador, lográndose así algo de sobrecalentamiento.



## 19.7.4 DESTILADORES DE SALMUERA

Normalmente una libra de combustible puede producir 10 lb de vapor de agua, y un evaporador de doble efecto que se use con agua salada 10 lb de vapor suministrarán un total de 18.5 lb de agua pura. Es por eso poco sorprendente que los barcos en alta mar producen su propia agua potable a partir del agua de mar. El agua de mar contiene cerca de 3% de sólidos por peso correspondiente a cerca de 34 000 ppm comparados con 340 ppm del agua fresca. En lugar de evaporar cerca del 90%, es costumbre hacerlo solamente hasta un tercio del alimento. El resto, que contiene 5% de sólidos, o sea, 51 000 ppm, se descarta volviéndola al mar. Debido a la gran cantidad de purga son deseados los sistemas de evaporación al vacío, que trabajan a temperatura reducida, ya que esta temperatura favorece a una baja velocidad de incrustación. Contrariamente a los evaporadores de las plantas de fuerza estacionaria, los evaporadores de salmueras o destiladores operan de 600 a 700 h sin desincrustarse.

**TABLA 19-1 DESTILACION; VARIACION DE LOS CONTENIDOS MINERALES EN AGUAS COMERCIALMENTE DESTILADAS.**

	Rango (como CaCO <sub>3</sub> )
Dureza	0 - 15
Alcalinidad	2 - 18
Sulfatos	0 - 6
Cloruros	0 - 5
Sales totales	3 - 21

**TABLA 19-2 FACTORES DE OBSTRUCCION \* (12)**

Temperatura del medio calefactor .....	Hasta 240°F		240-400°F †	
Temperatura del agua .....	125°F o menos		Más de 125°F	
Agua	Velocidad del agua, pps		Velocidad del agua, pps	
	3 pies o menos	Más de 3 pies	3 pies o menos	Más de 3 pies
Agua de mar .....	0.0005	0.0005	0.001	0.001
Salmuera natural .....	0.002	0.001	0.003	0.002
Torre de enfriamiento y tanque con toco artificial:				
Agua de compensación tratada .....	0.001	0.001	0.002	0.002
Sin tratar .....	0.003	0.003	0.005	0.004
Agua de la ciudad o de pozo (como Grandes Lagos) .....	0.001	0.001	0.002	0.002
Grandes Lagos .....	0.001	0.001	0.002	0.002
Agua de río:				
Mínimo .....	0.002	0.001	0.003	0.022
Mississippi .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Delaware, Schykill .....	0.003	0.002	0.004	0.003
East River y New York Bay .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Canal sanitario de Chicago .....	0.008	0.006	0.010	0.008
Locosa o turbia .....	0.003	0.002	0.004	0.003
Dura (más de 15 granos/gal) .....	0.003	0.003	0.003	0.005
Enfriamiento de máquinas .....	0.001	0.001	0.001	0.001
Destilada .....	0.0005	0.0003	0.0003	0.0003
Alimentación tratada para calderas .....	0.001	0.0005	0.001	0.001
Purga de calderas .....	0.002	0.002	0.002	0.002

† Las cifras de las últimas dos columnas se basan en una temperatura del medio calefactor de 240 a 400°F. Si la temperatura de este medio es mayor de 400°F, y si se sabe que el medio enfriador forma depósitos, estas cifras deben modificarse convenientemente.



## 20.1 PROCESOS DE SEPARACION

Las separaciones con membranas cada vez son más importantes en el tratamiento del agua y agua residual. La electrodiálisis y la ósmosis inversa se utilizan actualmente para desalinizar el agua en gran escala. La ultrafiltración se emplea para una variedad de procesos de tratamiento del agua y agua residual.

Una membrana puede definirse como una fase que actúa como una barrera al flujo de especies moleculares o iónicas entre las fases que lo separa. La fase membrana es generalmente heterogénea. Esta fase puede ser un sólido seco, un gel empapado de disolvente, o un líquido inmovilizado. Para que la membrana actúe como un dispositivo útil de separación, debe transportar algunas moléculas más rápidamente que otras. Por tanto, debe tener elevada permeabilidad para algunas especies y baja permeabilidad para otras; es decir, debe ser altamente permeoselectiva. Los mecanismos de transporte a través de la membrana varían desde la difusión molecular en sólidos que son semejantes a un líquido hasta el flujo viscoso y tortuoso a través de sólidos microporosos.

## 20.2 OSMOSIS INVERSA

La ósmosis se define como el transporte espontáneo de un disolvente desde una disolución diluida a una disolución concentrada a través de una membrana semipermeable ideal, que impide el paso del soluto pero deja pasar el disolvente. Este flujo de disolvente puede reducirse si aplicamos una presión en el lado de la membrana. Para una cierta presión llamada presión osmótica, se alcanza el equilibrio y la cantidad de disolvente que pasa en ambas direcciones es la misma. Si la membrana es idealmente semipermeable, la presión osmótica es una propiedad de la solución solamente. Por lo tanto, la presión osmótica debe ser considerada como una medida de cierta diferencia real, expresable como presión, que existe entre la natura-

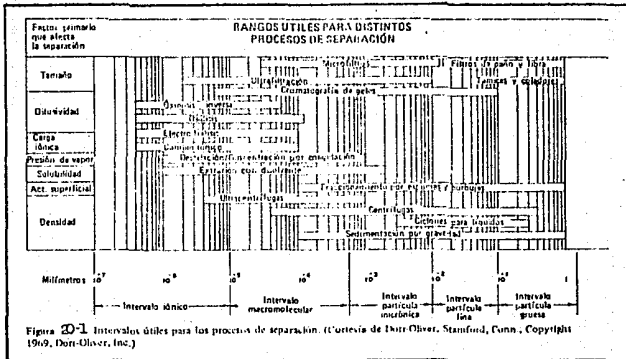


Tabla 20-1 Procesos de separación por membrana y fuerzas impulsoras principales.

Proceso	Función de la membrana	Fuerza impulsora principal
Ósmosis inversa. Ultrafiltración.	Transporte selectivo del agua. Discrimina según el tamaño molecular, forma y flexibilidad.	Presión. Presión.
Electrodiálisis.	Transporte iónico selectivo.	Gradiente de potencial eléctrico.
Diálisis. Cromatografía por tamices moleculares.	Transporte selectivo del soluto. Retardo de la penetración del soluto de peso molecular elevado.	Concentración. Concentración.
Permeación líquida. Separación en un separador de batería.	Transporte selectivo de líquidos. Transporte iónico selectivo pero reteniendo a los coloides.	Concentración. Gradiente de potencial eléctrico.
Determinación de oxígeno por electrodo.	Control de la velocidad de despolarización.	Presión parcial o concentración.
Determinación específica de iones por electrodos.	Transporte selectivo de un ion complejo.	Concentración (actividad).

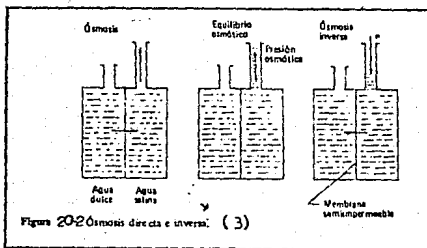


Tabla 20-2 Presiones osmóticas típicas

Compuesto	Concentración		Presión osmótica (atm. a 25°C)
	(mg/litro)	(moles/litro)	
NaCl	35 000	0.6	27.07
NaCl	1 000	0.0171	0.77
NaHCO <sub>3</sub>	1 000	0.0119	0.87
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 000	0.00705	0.41
MgSO <sub>4</sub>	1 000	0.00831	0.24
MgCl <sub>2</sub>	1 000	0.0105	0.66
CaCl <sub>2</sub>	1 000	0.009	0.56
Sacarosa	1 000	0.00292	0.07
Dextrosa	1 000	0.00555	0.14

leza de la solución y el disolvente puro.

Si la presión en el lado de la solución se incrementa por encima de la presión osmótica, la dirección del flujo se invierte. Entonces el disolvente puro pasará desde la solución hacia el solvente. Este fenómeno constituye la base de la ósmosis inversa aplicada en el tratamiento del agua y agua residual. La energía útil por unidad de volumen suministrada a este proceso lo es en forma de presión que es superior a la presión osmótica de equilibrio.

La ósmosis inversa es de alguna forma similar a la filtración ambos procesos implican la separación de un líquido a partir de una mezcla que se hace pasar a través de un dispositivo que retiene los componentes. Este proceso también se ha denominado hiperfiltración.

### 20.3 DISEÑO DEL SISTEMA

En el diseño de un sistema de ósmosis inversa barato y que responda, aparecen muchos problemas ingenieriles difíciles. A continuación se enumeran algunos de los pasos más difíciles durante el diseño:

1. Soportar una membrana frágil para que pueda aguantar presiones de 102 a 300 atm.
2. Evitar que los flujos de alimentación de alta presión y salmuera entren en contacto con el flujo del agua producto de baja presión.
3. Obtener una densidad de empaquetamiento lo suficiente alta como para reducir al mínimo el coste del recipiente a presión.
4. Reducir al mínimo la polarización por concentración y ensuciamiento por medio del diseño de los canales de alimentación.
5. Evitar las caídas de presión parásitas en los flujos de alimentación, salmuera, y producto, y

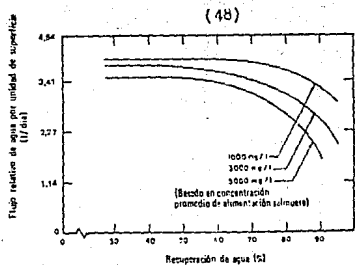


Figura 203 Ósmosis inversa, flujo de agua por unidad de superficie en función de la recuperación.

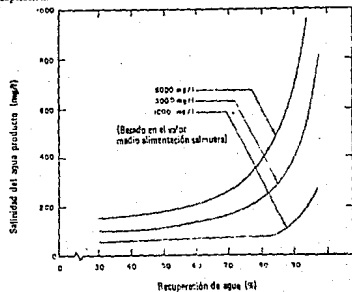


Figura 204 Ósmosis inversa, calidad del agua producido en función de la recuperación.

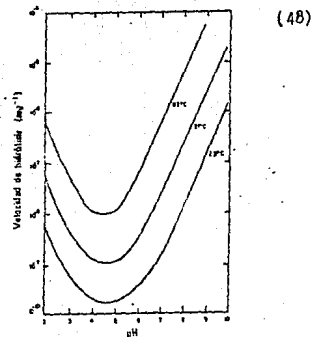


Figura 205 Velocidad de hidrólisis de una membrana de acetato de celulosa en función del pH y temperatura. (Datos de Vos y cols., 1966.)

6. Minimizar los costes de reemplazamiento de las membranas.

Los intentos realizados para solventar estos problemas a la vez de obtener un equipo económico y seguro, ha conducido al diseño de cuatro módulos distintos: placa y marco, tubos largos, arrollamiento en espiral, y fibra fina hueca.

Una planta de ósmosis inversa consiste en una disposición de módulos en serie-paralelo. Las variables de diseño más importantes son, recuperación, calidad de agua producto, presión, caudal de salmuera, grado de pretratamiento necesario, procedimiento para mantener el flujo por unidad de superficie, y tratamiento posterior.

Para diseñar una unidad de ósmosis inversa debemos conocer la composición del agua de alimentación, su variabilidad, temperatura y presión osmótica. El rechazo de los componentes de la alimentación por el sistema de membranas en consideración, también es necesario para estimar la calidad del agua producto. La capacidad de la planta está generalmente basada sobre un caudal de producto a una temperatura determinada.

Una vez que se conocen el caudal de salida y la composición de la alimentación, debemos establecer la recuperación. Esta viene limitada por la calidad del agua producto y la solubilidad de las sales poco solubles de la salmuera. En general, es difícil predecir con exactitud la calidad del agua producto, debido al rechazo del ion específico y a la variación de la composición del agua de alimentación.

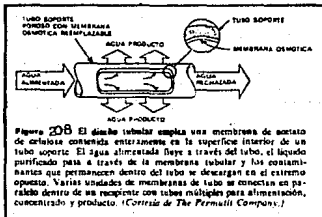
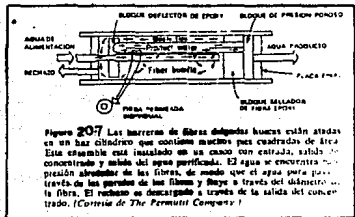
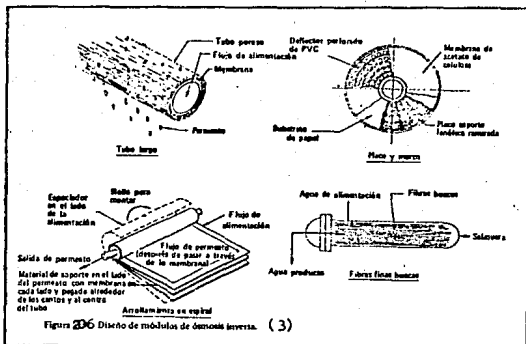
#### 20.4 SISTEMAS DE MEMBRANAS

Actualmente, el acetato de celulosa modificado es la membrana que más se utiliza en la ósmosis inversa. Sin embargo, se han desarrollado una gran variedad de membranas y sistemas de soporte. Un sistema comercial importante se basa en una membrana de poliamida.

Tabla 20-3 Valores típicos de rechazo de soluto para membranas de acetato de celulosa altamente selectivas.

Soluto	% de rechazo		Promedio
	Máximo	Mínimo	
Calcio, $Ca^{2+}$	99.7	96.3	99.0
Magnesio, $Mg^{2+}$	99.9	93.0	99.0
Sodio, $Na^+$	97.0	88.0	
Potasio, $K^+$	97.0	83.0	
Hierro, $Fe^{2+}$ y $Fe^{3+}$	100.0	99.9	100.0
Manganeso, $Mn^{2+}$	100.0		100.0
Aluminio, $Al^{3+}$	99.9	97.3	99.0
Cromo, $Cr^{6+}$ pH 2.6			92.6
4.2			97.2
7.6			98.6
Amonio, $NH_4^+$	95.0	77.0	
Bicarbonato, $HCO_3^-$			80-98
Sulfato, $SO_4^{2-}$	100.0	99.0 <sup>+</sup>	99.0
Cloruro, $Cl^-$	97.0	86.0	
Nitrato, $NO_3^-$	86.0	58.0	
Fluoruro, $F^-$	98.0	88.0	
Boro (a pH 5)	60.0	38.0	
Sílice (a pH 5)	95.0	80.0	
Ortofosfato, $PO_4^{3-}$	100.0		99.0
Polifosfato	100.0		99.0
Sólidos totales disueltos (TDS)	99.0	89.0	
COD - efluente secundario	97.0	94.0	
- licor de sulfato	97.5	94.9	
BOD - efluente secundario	94.0	81.0	
- licor de sulfato	92.2	85.8	
Compuestos sulfonados de lignina	99.4	98.1	
Sacarosa			99.9
Color			100.0
Turbidez			100.0
Proteínas			98-100
Glucosa			99.5 <sup>+</sup>





Esta membrana tiene un coeficiente de permeación al agua menor que el de una membrana de acetato de celulosa. Con el fin de maximizar el área, esta membrana se emplea en forma de una fibra hueca, con un diámetro típico exterior de 0.051 mm y espesor 0.0127 mm. La membrana de poliamida tiene una estabilidad física y química alta dando lugar a una vida larga. Una membrana preparada a partir de resina de acetato butirato de celulosa ha dado rechazos para el cloruro sódico del 99.9% a una presión de 54.42 atm con un flujo por unidad de superficie de  $3.722 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2)(\text{seg})$ . Esta membrana puede ser útil para reducir las concentraciones de ciertos contaminantes, tales como la urea, y producir un agua con un contenido muy bajo en TDS (sólidos totales disueltos) a partir de aguas altamente salobres. Esta membrana tiene mayor resistencia a las soluciones alcalinas que la membrana de acetato de celulosa. Las principales desventajas de esta membrana son su baja permeabilidad al agua y compactación alta.

También se han construido membranas de flujo alto, a partir de mezclas de acetato de celulosa y metacrilato y ácido poliacrílico, y nitrato de celulosa - acetato de celulosa. En general, estas membranas dan unos flujos por unidad de superficie inicialmente mayores, presentan más resistencia a la compactación, pero generalmente tienen un rechazo al cloruro sódico menor que la membrana de acetato de celulosa modificada.

Varios compuestos naturales como los ácidos húmico y fúlvico, el óxido de Zr(IV), y taninos poseen la capacidad de formar membranas dinámicas cuando se filtran a través de una película porosa. Estas membranas dinámicas pueden llegar a ser útiles para recuperar agua a partir de aguas salobres. Con estas membranas es posible obtener flujos por unidad de superficie muy altos hasta  $4.77 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2)(\text{seg})$ . Sin embargo, se requieren caudales de bombeo elevados para evitar la polarización por concentración en estas condiciones.

Tabla 20-4 Comparación de los módulos de ósmosis inversa

Módulo	Densidad de empaquetamiento. ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )	Flujo de agua por unidad de superficie a 40.8 atm. ( $\text{g}/(\text{cm}^2)(\text{seg})$ )	Caudal de agua por volumen unitario. ( $\text{g}/(\text{seg})(\text{cm}^3)$ )	Rechazo de cloruro sódico.
Placa y marco.	150	$4.77 \times 10^{-4}$	$2.32 \times 10^{-4}$	Muy bueno.
Tubos largos.	50	$4.77 \times 10^{-4}$	$0.77 \times 10^{-3}$	Muy bueno.
Espiral.	250	$4.77 \times 10^{-4}$	$3.86 \times 10^{-3}$	Muy bueno.
Fibras finas huecas de poliamida.	5000	$4.77 \times 10^{-5}$ (27.2 atm)	$7.73 \times 10^{-3}$	Regular.
Fibras finas huecas de acetato de celulosa.	2500	$1.43 \times 10^{-4}$ (17 atm)	$1.16 \times 10^{-2}$	Bueno.

## Pérdidas de presión parásita (atm)

Canal de alimentación	Canal producto	Rango útil de pH	Facilidad de limpieza
2.04	2.04	2-8	Regular.
3.40	0.68	2-8	Muy buena.
0.68	3.40	2-8	Muy buena.
0.68	3.40	0-12	Regular.
0.68	3.40	3-7	Regular.

## 20.5 POLARIZACION

Otro factor que debemos tener en consideración durante el diseño es la polarización por concentración que debemos reducir al mínimo mediante una regulación adecuada de los caudales de salmuera. Debido a que el agua producto se extrae continuamente, el caudal de salmuera al final de la unidad es muy bajo. Este efecto se compensa, colocando varios pasos o recipientes a presión en disposición en serie-paralelo, que recuerda una pirámide invertida.

## 20.6 PRETRATAMIENTO

En todos los métodos de desalinización es necesario un tratamiento previo de la alimentación, y por lo tanto la ósmosis inversa no es la excepción. En general, las corrientes de alimentación y salmuera se tratan con los objetivos siguientes:

1. Eliminar el exceso de turbidez o sólidos en suspensión.
2. Ajustar y controlar el pH y temperatura de alimentación.
3. Inhibir o controlar la formación de compuestos, que una vez precipitados taponarán las canalizaciones del agua o el recubrimiento de las membranas.
4. Desinfectar y evitar el crecimiento de los lodos o contaminación del equipo.
5. Eliminar los aceites emulsionados o sin emulsionar, compuestos orgánicos similares.

La disminución del flujo por unidad de superficie constituye el problema operacional más serio. Este fenómeno se presenta en la ósmosis inversa y también en otros procesos de membrana. Esta disminución del flujo, como se observó anteriormente, es la suma de la compactación de la membrana y el ensuciamiento. Para pequeñas presiones de trabajo (40.5 atm) predomina el ensuciamiento. El ensuciamiento de la membrana puede algunas veces reducirse al mínimo mediante una limpieza periódica.

## 20.7 APLICACIONES

El uso principal de la ósmosis inversa es la purificación de las aguas salobres (hasta 10 000 ppm de los sólidos totales disueltos).

Una aplicación muy indicada de la ósmosis inversa constituye el pretratamiento del agua para desionización por intercambio iónico con el fin de obtener un agua ultrapura. Esta combinación es económicamente atractiva y ofrece varias ventajas técnicas. Otras áreas de aplicación en el tratamiento del agua las constituyen el pretratamiento del agua de proceso para alimentar a calderas, agua de reposición en torres de enfriamiento, y agua de lavado de dureza casi cero.

La ósmosis inversa ofrece otra ventaja significativa sobre otros sistemas de desmineralización de aguas salobres, tales como el intercambio iónico y la electrodiálisis, y es que también elimina parte de la materia orgánica. Además este proceso ofrece la posibilidad de reemplazar otros pasos del tratamiento general.

## 21.1 ULTRAFILTRACION

Al igual que la ósmosis inversa, la ultrafiltración por membrana depende de una fuerza impulsora, presión y una membrana que es permeable a algunos de los componentes de una disolución líquida o mezcla e impermeable a otros. Los dos procesos difieren en que la ultrafiltración no está controlada por la presión osmótica y puede llevarse a cabo a diferencias de presión bajas 0.37 a 7 Kg/cm<sup>2</sup>. La ultrafiltración se aplica generalmente para separar solutos que tienen un peso molecular superior a 500, y tienen presiones osmóticas muy pequeñas a concentraciones moderadas. Esto incluye materiales como bacterias, virus, almidón, gomas, proteínas, arcillas y pigmentos de pintura. La ósmosis inversa se aplica a los materiales de peso molecular más bajos. El límite superior de peso molecular para la ultrafiltración se define generalmente como 500 000. Por encima de este tamaño molecular, la separación se lleva a cabo por la filtración microporosa convencional.

El mecanismo predominante en la ultrafiltración por membrana es el tamizado selectivo a través de los poros. El rechazo de una membrana para una sustancia determinada depende de su forma molecular, tamaño y flexibilidad así como de las condiciones de trabajo. Una membrana útil debe ser capaz de obtener una buena separación a una velocidad económica. Para llevar a cabo este objetivo, la membrana de ultrafiltración debe tener un margen de separación de pesos moleculares estrechos y un flujo de disolvente por unidad de superficie alto para presiones diferenciales bajas. El margen de separación de una membrana típica de ultrafiltración es ancho, quizás desde dos veces a diez veces el peso molecular. Los valores típicos del flujo de agua por unidad de superficie oscilan entre  $9.54 \times 10^{-4}$  -  $2.38 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>.seg para valores de 0.68 - 3.40 atm.

El peso molecular límite de separación se utiliza como una medida del rechazo. Sin embargo, la forma, tamaño y flexibilidad son

también parámetros importantes. Para un peso molecular determinado, las moléculas más rígidas se rechazan mejor que las moléculas flexibles. La fuerza iónica y el pH influyen sobre la forma y rigidez de las macromoléculas.

### 21.2 PROPIEDADES DE LA MEMBRANA

En contraste con la ósmosis inversa, en donde el acetato de celulosa ha ocupado una posición predominante, para las membranas de la ultrafiltración se han empleado una variedad de polímeros sintéticos. Muchas de estas membranas pueden manejarse en seco, tienen una resistencia a los disolventes orgánicos mayor y son menos sensitivas a la temperatura y pH que el acetato de celulosa.

Las resinas de policarbonato, olefinas substituidas y complejos de polielectrólitos se han utilizado entre otros polímeros para las membranas de ultrafiltración.

### 21.3 POLARIZACION POR CONCENTRACION

Los efectos de la capa límite en la ultrafiltración son similares a los de la ósmosis inversa. La retención de las partículas y solutos por la membrana crea una capa que debe difundirse nuevamente hacia la masa principal del líquido. Sin embargo, en la ultrafiltración, la polarización es generalmente más severa puesto que las constantes de difusión macromolecular son dos o tres órdenes de magnitud más pequeñas que las sales en las aguas salobres. El flujo por unidad de superficie aumenta con la caída de presión. Entonces los sólidos empiezan a depositarse adyacentes a la superficie de la membrana. Cuando la concentración próxima a la membrana excede de un valor crítico, se forma un gel.

La polarización por concentración generalmente se reduce al mínimo en el proceso de ultrafiltración, si se opera con velocidades altas de alimentación paralelas a la superficie de la membrana y

utilizando diseños de canal poco profundos. La operación a elevada temperatura reduce la viscosidad del disolvente, generalmente aumenta la velocidad de redifusión del gel y aumenta la concentración crítica del gel. Si la temperatura aumenta de 15 a 25°C, el flujo generalmente se dobla.

#### 21.4 DISEÑO

Los parámetros de diseño y método de cálculo de la ultrafiltración son muy similares a los presentados para la ósmosis inversa. Una diferencia principal consiste en que la polarización por concentración, en general juega un papel mucho más importante en la ultrafiltración. La ultrafiltración a "canal poco profundo" es un intento para reducir al mínimo la polarización al disminuir la altura del canal y aumentar la velocidad.

En el equipo de filtración se han utilizado varios métodos de operación que dependen de la sustancia que se filtre, de su uso final y del tamaño de la operación. Los objetivos corrientes son la concentración del soluto o la purificación del disolvente. Sin embargo, en la diafiltración, se mantiene una concentración constante en sustancias de peso molecular alto por adición de disolvente fresco, y se eliminan con el mismo caudal las especies de bajo peso molecular que contienen disolvente. Las mezclas de varios componentes pueden fraccionarse si existe una diferencia suficiente en tamaño molecular.

La selección de un método de operación es una cuestión principalmente económica. Los factores de coste clave son el flujo por unidad de superficie de membrana, la vida y el coste de reemplazamiento de las membranas. Estos parámetros son los que determinan principalmente las condiciones de trabajo de la planta. Por ejemplo, si el flujo por unidad de superficie de membrana es alto, es más barato trabajar en régimen laminar obteniéndose costes de bombeo más



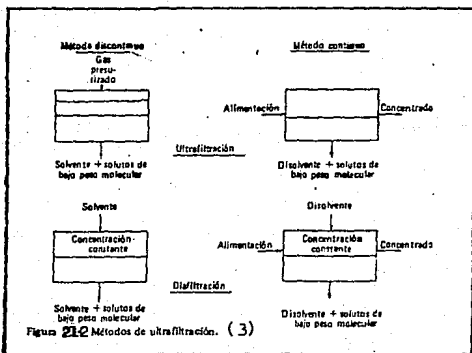
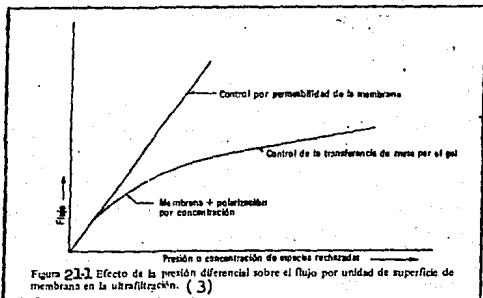


Tabla 21-1 Membranas comerciales típicas para la ultrafiltración.

Membrana	Fabricante	Flujo de agua por unidad de superficie a 6.8 atn.g/(seg)(cm <sup>2</sup> )	Peso molecular límite de separación rechazo 80-100%
Acetato de celulosa	Gulf Evironmental Systems	$1.43 \times 10^{-3}$	600 (rafínosa)
Pellicon	Millipore Corp.	$4.77 \times 10^{-4}$	600 (rafínosa)
Diaflo UM-05	Amicon Corp.	$1.67 \times 10^{-3}$	250 (sacarosa)
Diaflo UM-2	Amicon Corp.	$3.34 \times 10^{-3}$	600 (rafínosa)
Diaflo UM-10	Amicon Corp.	$4.77 \times 10^{-3}$	10000 (dextran 10)
Diaflo PM-10	Amicon Corp.	$2.86 \times 10^{-2}$	10000 (citocromo c)
Diaflo PM-30	Amicon Corp.	$1.67 \times 10^{-1}$	35000 (pepsina)
Diaflo XM-50	Amicon Corp.	$1.19 \times 10^{-2}$	70000 (seroalbúmina bovina)
Diaflo XM-100	Amicon Corp.	$1.43 \times 10^{-1}$	150000 (globulina gamma)
HFA-100	Abcor, Inc.	$1.19 \times 10^{-3}$	10000 (dextran 10)
HFA-300	Abcor, Inc.	$2.38 \times 10^{-2}$	70000 (seroalbúmina bovina)

bajos, vida más larga y coste menor de reemplazamiento de las membranas. Recíprocamente, si los factores del coste de membrana son altos, resulta ventajoso trabajar en flujo turbulento.

#### 21.5 APLICACIONES

La ultrafiltración se aplica corrientemente en las industrias alimenticias y farmacéuticas; las enzimas, virus y vacunas se separan y purifican por esta técnica. La ultrafiltración ha hecho posible el embotellado de la cerveza a granel. Se ha empleado en la purificación de azúcar, concentración, desalado del suero de la leche y fraccionamiento.

La ultrafiltración se ha empleado en el tratamiento del agua residual como un sustituto para los espesadores, clarificadores y floculadores. Por esta técnica, podemos separar del agua, arcillas, materia vegetal y microorganismos.

## 22.1 ELECTRODIALISIS

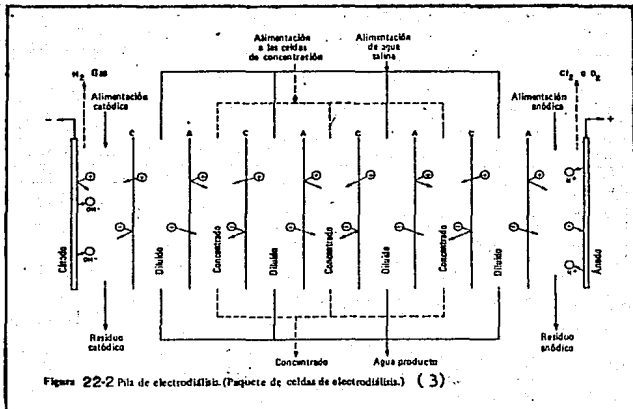
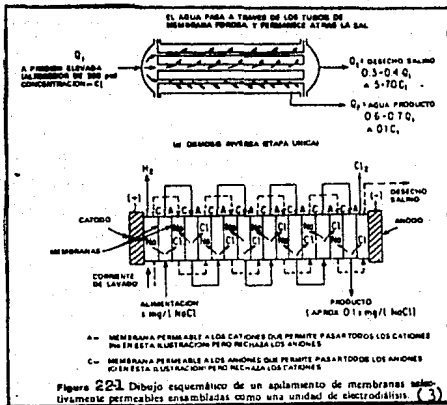
En el proceso de electrodiálisis, la corriente eléctrica induce la separación parcial de los componentes de una solución iónica. Esta separación puede llevarse a cabo, colocando alternativamente membranas selectivas catiónicas y aniónicas al paso de la corriente. Cuando se aplica la corriente, los cationes son atraídos eléctricamente y pasan a través de la membrana de intercambio catiónico en una dirección, y los aniones cruzan a través de la membrana de intercambio aniónico en la otra dirección. Como resultado neto obtenemos alternativamente compartimientos de elevada salinidad y de baja salinidad a través de todo el paquete de membranas paralelas. Entonces el agua pasa a través de varios paquetes de membranas hasta que se obtiene la reducción de salinidad deseada.

El desarrollo de las membranas selectivas a los iones, hizo posible operar los paquetes de membranas con gradientes de concentración y eficiencias de corrientes razonables.

## 22.2 PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS Y PREPARACION

Una buena membrana de electrodiálisis debe ser capaz de discriminar entre iones de carga opuesta, ha de tener un número de transporte de agua bajo y una conductividad eléctrica buena. También debe tener buena resistencia química (principalmente a la oxidación), adecuada resistencia mecánica y estabilidad dimensional. La propiedad más importante de la membrana es su permeaselectividad. La permeaselectividad es la capacidad que tiene la membrana para dejar pasar o discriminar un ión según su carga.

Existen tres métodos de fabricación. Un método implica la formación de láminas de membranas heterogéneas a partir de una mezcla de resinas de intercambio iónico, materia plástica inerte y disolventes. La materia plástica inerte da resistencia a la membrana,



pero generalmente aumenta su resistencia eléctrica. Otro método es similar a la fabricación de resinas de intercambio iónico. Este método consiste en formar previamente una película de polímero que es insoluble en el agua y entonces introducir grupos de intercambio iónico por reacción química. El tercer método consiste en la polimerización de monómeros que contienen grupos de intercambio iónico o grupos que pueden convertirse fácilmente en grupos de intercambio iónico. Todos estos métodos pueden controlarse con gran precisión para alcanzar una resistencia mecánica y conductividad electrolítica óptimas.

### 22.3 POLARIZACION POR CONCENTRACION

La polarización por concentración al igual que en la ósmosis inversa y ultrafiltración, constituye un factor muy importante en la electrodiálisis. En situación estacionaria, la llegada de la sal a la interfase de la membrana de intercambio iónico está equilibrada por su salida. La sal se transporta a la membrana por difusión molecular y torbellino de las partículas sólidas. La eliminación de la sal depende del flujo de la corriente y la diferencia del número de transporte en la interfase. La polarización puede limitarse a un valor razonable por control de la relación entre la densidad de corriente y la concentración de la corriente diluida y por la obtención de una capa límite en la membrana de pequeño espesor, por medio de un diseño de canal hidrodinámico. Este último procedimiento puede obtenerse utilizando espaciadores de canal, velocidades de circulación altas y promotores de turbulencia. En los procesos de ósmosis inversa y ultrafiltración, la selección del grado de control de la polarización por concentración es principalmente una cuestión de tipo económico. La polarización, más que optimización económica, generalmente limita la densidad de corriente en una pila de electrodiálisis.

## 22.4 POTENCIA Y ENERGIA NECESARIA

El consumo de potencia en función de la cantidad de sal separada, puede calcularse a partir de las leyes de Faraday y Ohm. En la electrodiálisis, la ley de Faraday se emplea para determinar la relación entre el flujo de corriente y la transferencia de electrólito a través de la membrana.

$$\text{equivalentes transferidos por unidad de tiempo} = NdQd Ni' = \frac{nINd}{F}$$

en donde Nd es el número de compartimientos de flujo diluido, Qd es el caudal a través de un compartimiento de fluido diluido, I es la corriente, Ni' es el número de equivalentes-gramo electroquímicos por unidad de volumen y F es la constante de Faraday. La capacidad de una instalación para desmineralización es proporcional a la corriente, número de pares de membranas y eficacia de la corriente.

Según la ley de Ohm, la potencia necesaria viene dada por el producto del cuadrado de la intensidad, I, y la resistencia eléctrica del paquete (pila) de membranas, Rs:

$$P = I^2 R_s = R_s \left( \frac{Qd Ni' F}{n} \right)^2$$

El consumo de energía por equivalente transferido viene dado por la siguiente ecuación:

$$\bar{E} = \frac{P}{QdANi'} = \frac{IR_s F^2}{nNd}$$

## 22.5 EFICACIA DE LA CORRIENTE

En los sistemas de electrodiálisis, la corriente necesaria sobrepasa a los valores teóricos, debido a los siguientes factores:

1. Las membranas no son perfectamente selectivas.
2. En la pila se establecen pasos de corriente paralelos.

3. El agua puede ser transportada a través de la membrana.
4. El agua puede disociarse en  $H^+$  y  $OH^-$  para densidades de corriente elevadas o concentraciones de sal bajas.

Por lo tanto, la eficacia de la corriente viene dada por el producto de las tres eficacias:

$$n = (n)s(n)m(n)w$$

El término  $(n)s$  considera que las membranas no son perfectamente selectivas. La pérdida de corriente a través del tubo de distribución viene representada por  $(n)m$ . El término  $(n)w$  considera que el transporte de agua a través de la membrana.

La ineficiencia de la corriente ocasionada por el transporte del agua a través de la membrana, puede ser importante cuando la alimentación es una disolución altamente concentrada, o cuando se elimina un porcentaje elevado de sal. Un transporte elevado de agua necesita de corriente adicional para obtener la calidad de producto deseado y reduce la cantidad de producto que pueda obtenerse a partir de una corriente de alimentación dada.

## 22.6 VOLTAJE

El voltaje que debemos aplicar está constituido por la suma de las diferencias de potencial asociadas con los electrodos, los potenciales de concentración a través de la membrana, y las caídas de voltaje en las soluciones y membranas.

Los principales componentes de la resistencia de la pila de electrodiálisis son las resistencias de las masas principales de las soluciones, las capas límites de las membranas y las propias membranas. La mayor parte de la resistencia de la masa principal de la disolución corresponden a los compartimientos de disolución diluida. La polarización por concentración da lugar a una fuerza contraelectromotriz fem, que afecta significativamente a la eficacia global.



## 22.7 DISEÑO

Un electrodiálizador comercial contiene una serie alternada de membranas permeables catiónicas y aniónicas y emplea flujo forzado para reducir la polarización por concentración. La distribución equitativa del flujo entre los distintos compartimientos de la pila se efectúa por medio de restringir las aperturas y salidas de descarga. Aunque desde el punto de operación eficaz es preferible el contraflujo, puede producirse la ruptura de la membrana debido a caídas desiguales de presión en ambos lados de la membrana. El flujo paralelo es el método de trabajo preferido para una pila simple, puesto que las presiones en cada lado de la membrana pueden equilibrarse más suavemente. El contraflujo es el sistema que se usa más corrientemente para las pilas múltiples.

Para el diseño del compartimiento también debemos efectuar balances de material para las corrientes diluidas y concentradas. El grado de desmineralización puede determinarse por el tiempo de permanencia en una celda y la cantidad de corriente que ha pasado a través de la solución en este tiempo.

## 22.8 PRINCIPIOS RELATIVOS AL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Las siguientes reglas son importantes para la construcción y el buen funcionamiento de los electrodiálizadores:

1. La superficie de electrolización debe ser tan grande como sea posible en relación con el volumen del líquido, pues la velocidad de la electrodiálisis varía en razón directa del área de membrana.
2. Las membranas serán tan delgadas como sea posible y su delgadez sólo será restringida por la necesaria resistencia mecánica. La velocidad de la electrodiálisis está en razón inversa del cuadrado del grueso de la membrana.
3. Las membranas estarán en posición vertical.

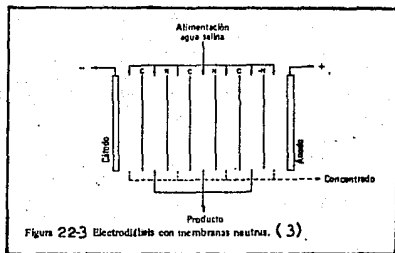


Tabla 22-1 Propiedades típicas de las membranas de intercambio iónico comerciales.

Tipo	Fabricante	Permeaselectividad (u(+,-))	Resistencia Área de la membrana (ohm-cm <sup>2</sup> )	Resistencia húmeda (En- sayo Mullen Burst, atm)	Espesor (mm, húmeda)
Estireno-DVB homógeno base	Asahi Chem Ind				
OK-1		(+)0.85	0.14-0.16	2-2.4	-
CA-1		(-)0.92	0.13-0.156	1.9-2.3	0.228
Material reforzado	Iónicos				
CR-61		(+)0.65	7.82-27.21	115-400	0.53-1.29
AR-111A		(-)0.57	7.48-23.81	110-350	0.53-1.37

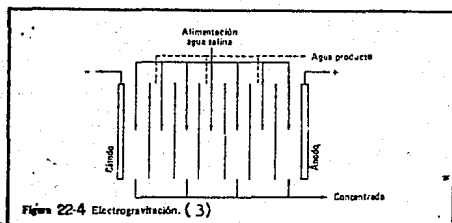


Tabla 22-2 Ablandamiento del agua durante la desmineralización del agua salobre.

	Concentración (ppm)		Porcentaje que permanece
	Alimentación	Producto	
Sodio, $\text{Na}^+$	670.0	145.0	21.7
Calcio, $\text{Ca}^{2+}$	128.0	9.0	7.7
Magnesio, $\text{Mg}^{2+}$	16.0	1.0	6.0
Dureza total, $\text{CaCO}_3$	385.0	24.0	6.2
Cloruro, $\text{Cl}^-$	1120.0	207.0	18.5
Sulfato, $\text{SO}_4^{2-}$	161.0	12.0	7.5
Bicarbonato, $\text{HCO}_3^-$	66.0	22.0	33.0
Nitrato, $\text{NO}_3^-$	4.0	1.0	-
Fluoruro, $\text{F}^-$	1.84	0.88	47.8
Sólidos totales disueltos	2163.0	398.0	18.3

4. En electrodiálisis intermitente, la temperatura del disolvente receptor debe ser tan baja como sea posible, y la del líquido que se electroliza la más alta posible. Sin embargo en electrodiálisis continua con estratificación por gravedad no se puede mantener eficientemente diferencias de temperaturas en las membranas. La mayoría de las veces se observa que la velocidad óptima de electrodiálisis se obtiene si ambos líquidos entran en el electrodiálizador aproximadamente a la misma temperatura, que debe ser lo más alto posible.
5. La concentración del líquido electrodiálizable debe ser lo más alta posible, y la del difusado lo más baja posible.
6. El electrodiálizador debe salir por la parte superior de la celda de manera continua si fuera posible.
7. El difusado se sacará solo por el fondo de una membrana continua.
8. Se evitará perturbaciones que ocasionen turbulencias en cualquiera de los líquidos. No se pondrán en ninguna de las celdas, represas ni desviadores de corriente.
9. La viscosidad debe ser baja.
10. En electrolizadores continuos de varias celdas el líquido entrará por el fondo de las celdas, y sólo fluirá hacia arriba; el agua ha de entrar por arriba en las celdas del difusado y fluirá hacia abajo; es decir, ambos líquidos pasarán en contracorriente y en dirección vertical por una sola celda y saldrán luego por el electrolizador.

#### 22.9 CONFIGURACION DE CELDA Y PILA (PAQUETES DE CELDAS)

El modelo de flujo dentro de cada compartimento en un diseño de flujo forzado viene determinado por el espaciador entre membranas. Actualmente se utilizan dos tipos: camino tortuoso y flujo la-

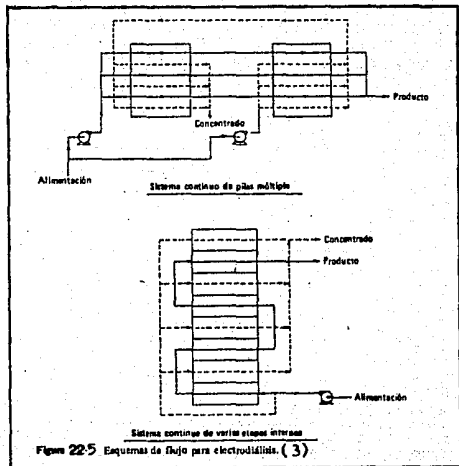
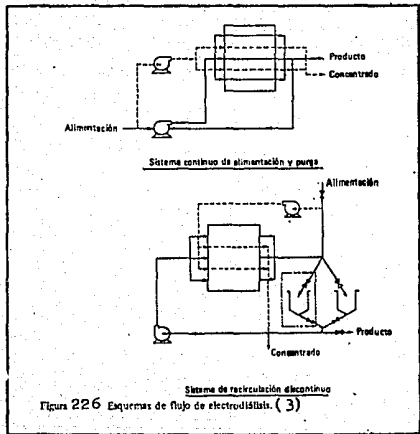
minar. El primer tipo utiliza un camino de flujo serpenteante largo, con el cual obtenemos un tiempo de permanencia largo para la solución. Para reducir al mínimo la polarización por concentración necesitamos una velocidad lineal y caídas de presión altas. El segundo tipo utiliza la porción activa de la celda como el camino de flujo. El espaciador de membrana es una pantalla plástica que también se utiliza como promotor de turbulencia.

Las pilas están construidas con láminas de membranas separadas por espaciadores, y juntas, y están acoplados como un filtro de placas y marco. El distribuidor está provisto de agujeros que corresponden a agujeros hechos en las juntas de cada celda, y algunas veces en las membranas; esto se efectúa antes de acoplar todo el conjunto.

Similarmente a la mayoría de procesos químicos, el proceso de desmineralización por electrodiálisis puede ser continuo o discontinuo. En el método continuo se utilizan corrientemente tres variaciones: multipilas, varias etapas internas, y alimentación y purga.

En el sistema continuo de pilas múltiples puede operarse con un contraflujo entre las pilas o con todas las corrientes de concentrado en paralelo. Este método de operación está diseñado para plantas grandes, en donde una pila simple no puede suministrarlos la capacidad total. Tiene la ventaja de que los tamaños de tubería y válvulas son mínimos, no existen recirculación y suministro mínimo de energía. La principal desventaja de esta configuración es que debemos efectuar un equilibrio cuidadoso entre las variables del proceso y que es sensible a pequeños aumentos en la resistencia de la membrana.

Si el caudal de producto es menor, resulta más económico utilizar una pila con varios pasos internos. Tiene la ventaja de flexibilidad en el grado de desalinización, no hace falta presurización,



un simple par de electrodos y un flujo continuo de producto. Las desventajas incluyen que la operación es sensible a la resistencia de membrana y caudal de alimentación, presión de trabajo alta y área de membrana grande para un caudal de agua producto determinado.

En una unidad de electrodiálisis, generalmente es necesario tratar previamente la alimentación. El taponamiento de los caminos tortuosos finos se produce por la materia en suspensión, y ésta debe eliminarse por una filtración previa. Como en el proceso de ósmosis inversa, el ensuciamiento de la membrana se atribuye principalmente a la materia coloidal y a la precipitación de sales poco solubles tales como carbonato cálcico, sulfato cálcico e hidróxido férrico. La mayor parte de los coloides presentes en las aguas naturales están cargados negativamente y se depositan sobre las membranas de intercambio iónico. Si la cantidad de estas sustancias es pequeña, la situación puede controlarse por una limpieza periódica. Sin embargo, cuando se desmineralizan aguas residuales tales como efluentes de una planta de fangos activados, es necesario efectuar un pretratamiento con carbón activado o resinas de barrido. El tratamiento posterior comprende ajuste del pH, cloración del agua producto y tratamiento de la salmuera antes del vertido final.

## 22.10 APLICACIONES

La desalinización del agua salobre (10 000 ppm) constituye la aplicación principal del proceso. Las industrias de alimentación y bebidas representan otra área activa de aplicación de la electrodiálisis. Se ha utilizado para desalinizar el suero de la leche, endulzar los jugos cítricos y aguas residuales de industrias conservadoras de pescado. En la industria química, la electrodiálisis se ha utilizado para recuperar muchos compuestos químicos diluidos en los residuos.

## 23.1 ESTIMACION DEL COSTO DE UNA PLANTA

Una de las primeras responsabilidades de un ingeniero químico al diseñar una planta, es la de estimar su costo total.

Los estimados de costos son hasta el presente un arte, más que el resultado de un procedimiento riguroso.

Un estimado de costo nunca coincide con el costo real de la planta; no obstante ello es necesario efectuar estimados de costo durante el desarrollo del proyecto de una nueva planta. Las razones para elaborar un estimado de costos son, principalmente, las siguientes:

- . determinar la viabilidad de un proyecto
- . obtener financiamiento para el proyecto
- . controlar el costo de la planta

En el primer caso sólo es necesario lo que se llama "estimado de magnitud", que generalmente tiene una aproximación de +30 a -20% con el costo real de la planta. En el segundo caso se tiene necesidad de lo que se conoce como "estimado definitivo" de una planta, el cual tiene una mayor aproximación con el costo real de la planta.

En el caso del control del costo del proyecto de una nueva planta es necesario contar con un "estimado detallado", que tiene una aproximación de +5 a -5% con el costo real de la planta. Estos estimados son necesarios para mantener un control estricto de costos a lo largo de un proyecto. Cuando no se tiene un control de costos adecuados, el costo real de la planta puede elevarse hasta el doble y aun hasta el triple del valor estimado.

Cuando los costos de una planta aumentan, las ganancias disminuyen. En el peor de los casos, la planta puede resultar no rentable y quebrar. Esto es lo que vuelve imprescindible la elabora-



ción de estimados de costos con apego a los costos reales, y la vigilancia del ajuste de los costos al estimado de costo.

Los estimados de costo más aproximados a los costos reales son los que se basan en datos estadísticos de costos reales. Esto implica una corrección por aumento de precios, puesto que los datos estadísticos son del pasado (varios años atrás) y la estimación es para el futuro (uno o dos años después).

Existen varias formas de hacer los ajustes de costo estimado. La forma más utilizada es la de los índices de precio. El más usado de estos índices, en la industria de procesamiento de materiales, es el establecido por Marshall y Stevens en 1937.

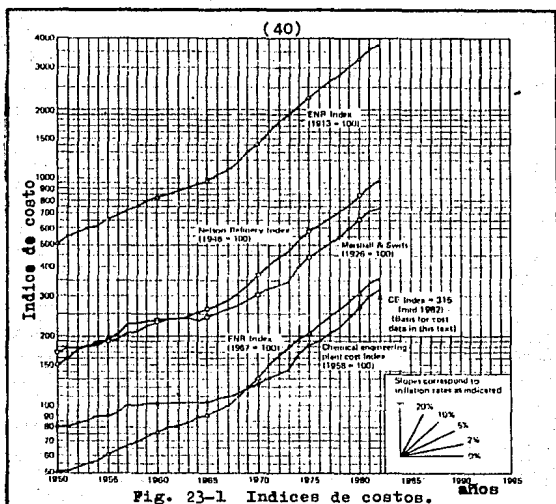


Fig. 23-1 Índices de costos.

Tabla 23-1 INDICE DE PRECIOS AL MENUDEO  
(PROMEDIOS ANUALES) (5)

<u>Año</u>	<u>Indice general</u>	<u>Año</u>	<u>Indice general</u>
1950	11.3	1970	28.3
1951	13.9	1971	29.0
1952	16.8	1972	30.6
1953	16.2	1973	35.7
1954	17.7	1974	45.3
1955	20.4	1975	49.6
1956	21.1	1976	66.9
1957	22.1	1977	83.7
1958	23.8	1978	100.0
1959	25.0	1979	134.5
1960	25.0	1980	149.3
1961	26.0	1981	191.1
1962	26.2	1982	303.6
1963	26.3	1983	612.9
1964	27.4	1984	1 014.1
1965	27.9	1985	1 599.7
1966	28.0	1986	2 979.2
1967	27.4	1987	5 906.6
1968	27.0	1988	14 791.2
1969	26.7	1989	16 542.6 (m)

(1) Base 1978=100

(m) Febrero 1989

(Indicadores Económicos; Banco de México)

Tabla 23-2 PARIDAD DEL PESO CON EL DOLAR  
ESTADOUNIDENSE (24)

Año	Promedio de pesos por dólar	Año	Promedio de pesos por dólar
1950	8.65	1970	12.50
1951	8.65	1971	12.50
1952	8.65	1972	12.50
1953	8.65	1973	12.50
1954	11.34	1974	12.50
1955	12.50	1975	12.50
1956	12.50	1976	15.69
1957	12.50	1977	22.69
1958	12.50	1978	22.76
1959	12.50	1979	22.82
1960	12.50	1980	22.98
1961	12.50	1981	24.51
1962	12.50	1982	57.44
1963	12.50	1983	120.16
1964	12.50	1984	167.76
1965	12.50	1985	256.87
1966	12.50	1986	611.62
1967	12.50	1987	1 381.79
1968	12.50	1988	2 273.05
1969	12.50	1989	2 500.00 (*)

(\*) Julio 1989

(Indicadores Económicos: Banco de México)

Fig. 23-2 COSTO DE PRECIPITADORES.

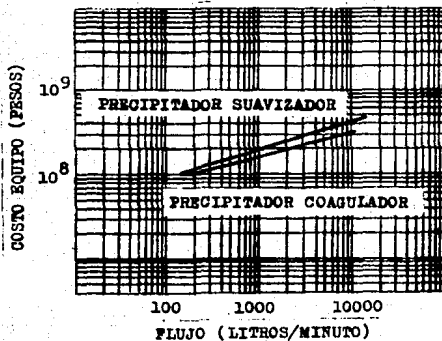


Fig. 23-3 COSTO DE CLARIFICADORES.

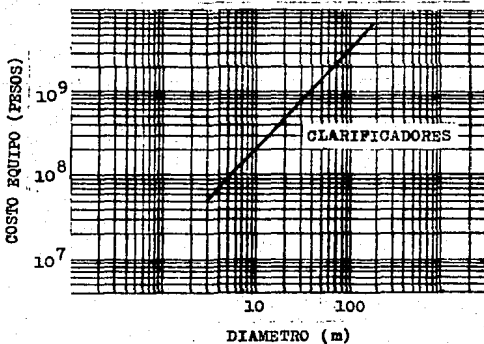


Fig. 23-4 COSTO DE PRETRATAMIENTO Y DESALACION

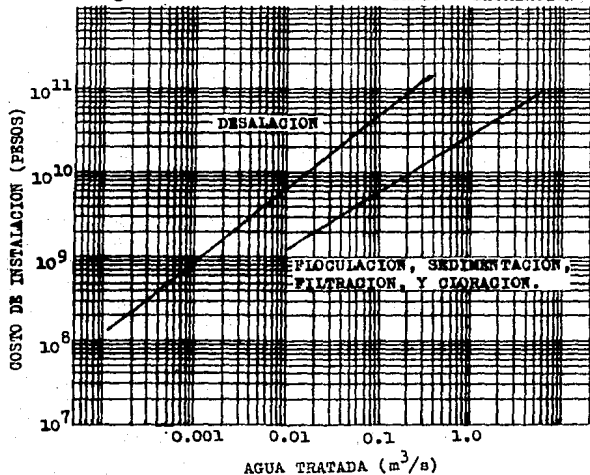


Fig. 23-5 LECHO PURIFICADOR.

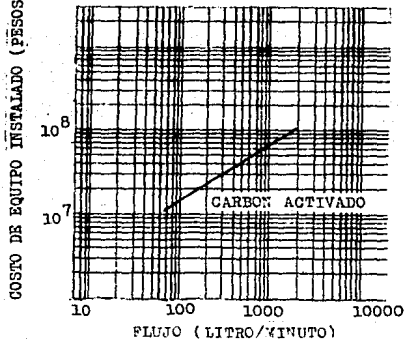
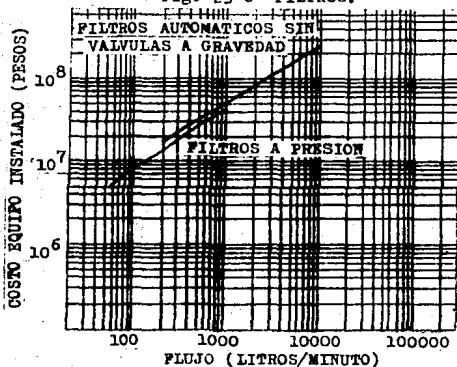


Fig. 23-6 FILTROS.



- NOTAS: 1. Los filtros están basados en una operación de 120 LPM/m<sup>2</sup>.  
 2. La construcción es en acero.  
 3. Presión de diseño de filtros a presión 5.3 Kg/cm<sup>2</sup>.

Fig. 23-7 SUAVIZADORES CICLO SODIO.

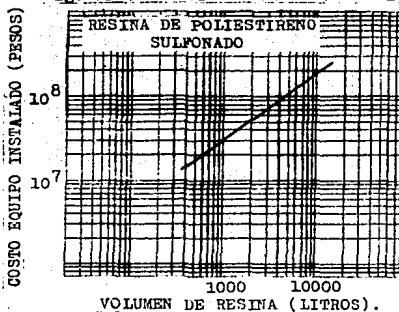


Fig. 23-8 FILTROS.  
 (1) Acero al carbón  
 (2) Acero inoxidable  
 (3) Hastelloy

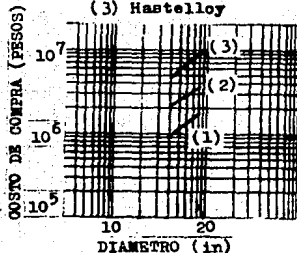
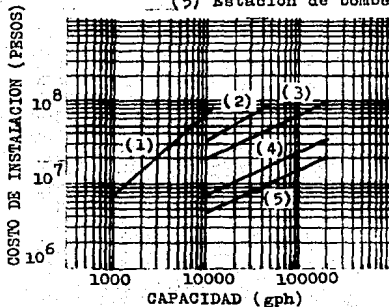


Fig. 23-9 SISTEMAS DE AGUA:  
 (1) Desmineralizada,  
 (2) Suavización,  
 (3) Filtración,  
 (4) Pozos,  
 (5) Estación de bombeo.



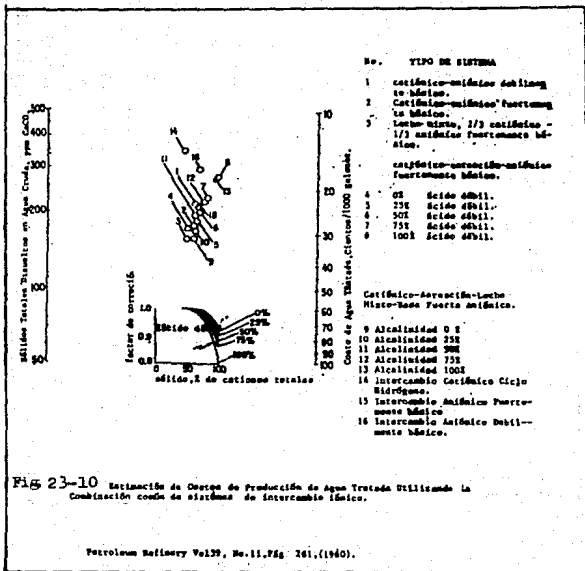
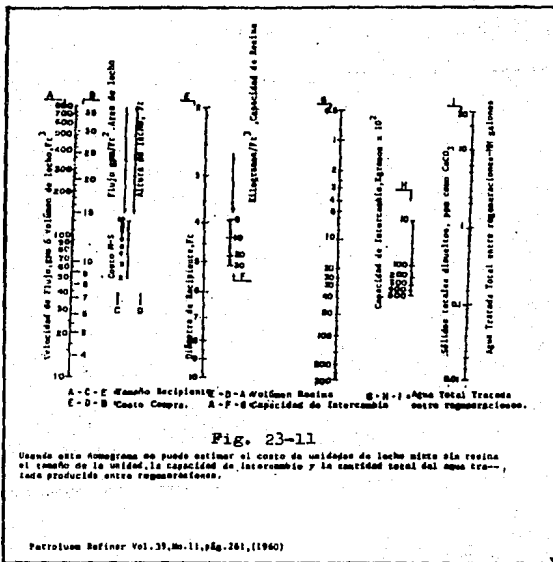


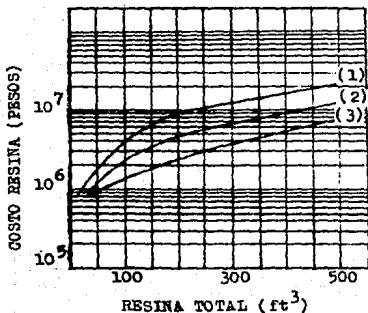
Fig 23-10 Estimación de Costos de Producción de Agua Tratada Utilizando la Combinación con de sistemas de intercambio iónico.





Nota: Para actualizar los datos de las figuras 23-10 y 23-11 se deberá multiplicar por el siguiente factor (662).

Fig. 23-12 COSTO DE INTERCAMBIADORES ANIONICOS Y CATIONICOS.



- (1) Aniónica fuertemente básica.  
 (2) Aniónica débilmente básica.  
 (3) Cationica.

Fig. 23-13 DESMINERALIZADORES.

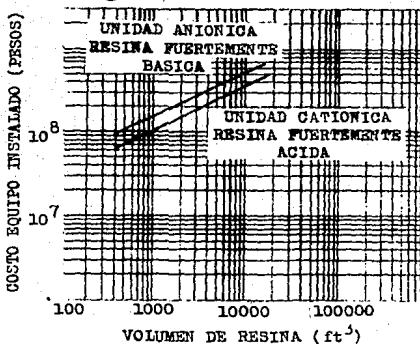


Fig. 23-14 AGUA DESMINERALIZADA.

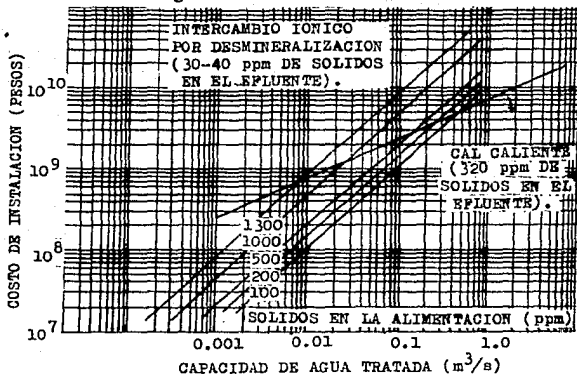
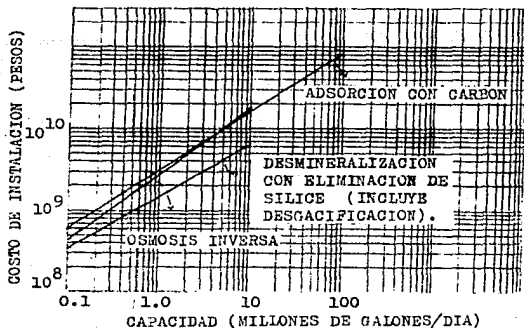
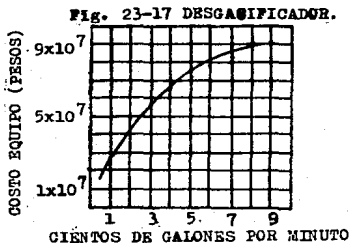
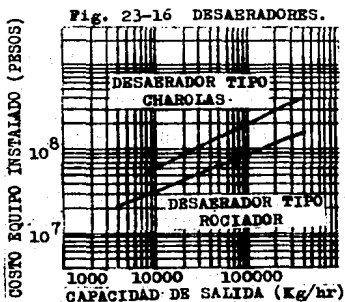


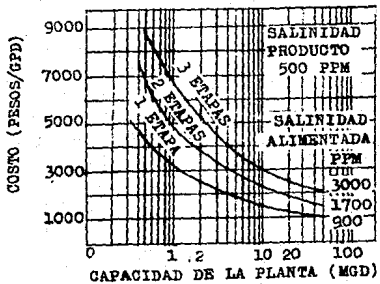
Fig. 23-15 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.





LOS DATOS SE BASAN EN UNO DE TIPO DE TIRO FORZADO DEL VENTILADOR E INCLUYE MOTOR, BASIN, VALVULAS DE CONTROL DE NIVEL Y 2 BOMBAS (ACERO INOXIDABLE). PARA DESAERADORES A VACIO SE MULTIPLICA EL COSTO POR LOS SIGUIENTES FACTORES DE CAPACIDAD:

gpm	factor
150- 250	2.0
250- 650	1.5
650-1000	1.25

Fig. 23-18 DESMINERALIZACION  
POR ELECTRODIALISIS

## 23.2 ACONDICIONAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL

Aeración. El costo de instalación depende del tipo de aereador, material de construcción, y forma de operación. El costo por galón por minuto de agua es de 14 000 a 56 500 pesos.

TIPO DE AERADOR:	(PESOS/ 1000 GALONES)
. Charolas, escalones, y cono estriado.	28 - 56
. Tiro forzado.	70 - 100
. Presión.	25 - 84
. Descarbonatadores.	260 - 840

Clarificación. El costo es función del grado de clarificación requerido y de las características del agua influente.

El rango de dosificación de coagulantes es de 0.5 a 5 granos por galón, y el costo de coagulante es de 42 a 421 pesos por cada 1000 galones de agua. Si se requiere otras substancias para el control del pH, esto incrementa el costo de un 50 a 100% adicional. Si se requiere arcilla, la dosificación varía de 1 a 3 granos por galón y su costo es de 37 a 112 pesos por cada 1000 galones de agua.

Filtración. El costo de instalación de los filtros a presión varía de 47 714 a 112 268 pesos por galón de agua por minuto.

Los filtros de gravedad incluyen: tanque, controladores, dosificador de químicos, equipo de cloración, limpiadores, etc., su costo es de  $168 \times 10^6$  a  $280 \times 10^6$  millones de pesos por millones de galones de agua por día.

Cloración. El costo de la cloración puede ser calculado de la dosificación requerida y del costo de las substancias químicas. El cloro líquido tiene un costo de 842 a 2 526 pesos por libra, dependiendo de la calidad y concentración usada; el hipoclorito de

### 316 COSTOS (1989)

calcio tiene un costo de 1403 a 1684 pesos por libra y contiene un 35% de cloro. En general, el costo de la cloración líquida varía de 9 a 20 pesos por cada 1000 galones de agua.

El costo de instalación de un hipoclorador es de 1 263 000 pesos. El costo de un dosificador de cloro líquido es aproximadamente:

Capacidad (lb/24 hr).	Costo (Pesos).
10	$2.2 \times 10^6$ - $2.8 \times 10^6$
50	$4.5 \times 10^6$ - $5.6 \times 10^6$
Varios cientos	$11.2 \times 10^6$ - $14.0 \times 10^6$

Intercambio iónico ciclo sodio. El principal costo de operación para el proceso por zeolita es la sal usada en la regeneración, y esta es de 0.45 lb de sal por cada 1000 granos de dureza removida. Con la sal a 50 500 pesos por tonelada, el costo de sal es de 114 pesos por cada 1000 galones de agua ablandada por grano por galón de dureza.

Intercambiadores aniónicos y catiónicos. El costo del equipo requerido depende de un número de variables, entre las cuales se mencionan, tamaño de la planta, calidad del agua requerida, tipo de desaerador empleado, etc. El costo de operación depende del precio del ácido y de la sosa caústica requerida para la regeneración y la neutralización.

Cal sodada en frío. Basados en costos promedios de sustancias químicas y del costo de eliminación de bicarbonato de calcio como la unidad, el costo relativo del tratamiento es el siguiente:

1. Costo de eliminación de bicarbonato de calcio = 1
2. Costo de eliminación de bicarbonato de magnesio = 2
3. Costo de eliminación de dureza no carbonatada de calcio = 5

4. Costo de eliminación de dureza no carbonatada de magnesio = 6

En general, el costo de instalación de una planta con capacidad de 1 millón de galones por día es de  $166 \times 10^6$  a  $280 \times 10^6$  pesos.

Cal sodada en caliente. El costo del equipo varía únicamente con la composición del agua. En general, el costo de instalación de una planta es de 5 614 a 14 033 pesos por galón/hora. El costo de operación es principalmente el costo de las sustancias químicas usadas.

Destilación. El costo de la destilación depende del número de efectos usados y de la fuente de calor. En el caso de plantas de fuerza en donde el calor es obtenido por la degradación del vapor, el costo del agua destilada es de 2 245 pesos por cada 1000 galones, pero donde se utiliza uno o dos efectos para producir agua destilada, el costo es de 5 613 a 22 454 pesos por cada 1000 galones. El costo del equipo usado depende del tamaño, número de efectos, etc.

Desaeración. El costo de instalación depende del tamaño, capacidad volumétrica, etc., el rango se encuentra entre 1 123 a 2 807 pesos por gal/hora.

Para desaeradores al vacío el costo de operación depende de la temperatura del agua y del grado de desaeración requerida. En general, el costo total es debido al vapor de agua y al bombeo requerido y su valor medio es de 393 pesos por cada 1000 galones.

Electrodialisis, ósmosis inversa y ultrafiltración. Los costos de operación se dividen equitativamente en tres áreas: (1) cargas fijas basadas en la recuperación de la inversión inicial, (2) reemplazamiento de la membrana, y (3) costes de operación, mano de



318 COSTOS (1989)

obra, pretratamiento, pretratamiento, limpieza, y (4) potencia eléctrica.

23.3 COSTOS DE SUBSTANCIAS QUIMICAS

Substancia:	Unidad:	Costo (pesos):
Carbonato de calcio	Ton.	53 327
Cloro (tanques)	Ton.	378 905
Cal hidratada	Kg.	561
Soda Ash (58%)	Ton.	151 562
Sulfato de Aluminio	Kg.	2 582
Acido sulfúrico (tanque)	Ton.	151 562
Hidróxido de sodio (bulto)	100 lb.	982 348

Con el fin de ilustrar el uso práctico de la información contenida en este trabajo, se realizará la evaluación de un proyecto.

Para tal fin se diseñará una planta de tratamiento de agua para la fabricación de plásticos, y la cual tendrá como suministro agua superficial. El agua se destinará a calderas, enfriamiento, proceso y usos generales.

#### 24.1 DATOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA

##### 1. CAPACIDADES REQUERIDAS

a. Capacidad total	250 gpm
b. Agua para calderas	50 gpm
c. Agua para enfriamiento	50 gpm
d. Agua para proceso	100 gpm
e. Agua para usos generales	50 gpm

##### 2. CALIDAD DEL AGUA

Tratamiento para eliminar:

- a. Turbiedad, materia orgánica y color del agua.
- b. Sólidos de gran tamaño.
- c. Gases indeseables.
- d. Dureza y alcalinidad.
- e. Fe y Mn.
- f. Ca y Mg.
- g. Si y óxidos insolubles.
- h. Iones indeseables.

## Calidad para agua de proceso.

Ca y Mg como CaCO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> como CaCO <sub>3</sub>	Fe como Fe	Mn como Mn	Turbi- dez	Color	Materia orgánica como O <sub>2</sub>	Cloro libre como Cl	Total de soli- dos
		0.02	0.02	2	2	10		200

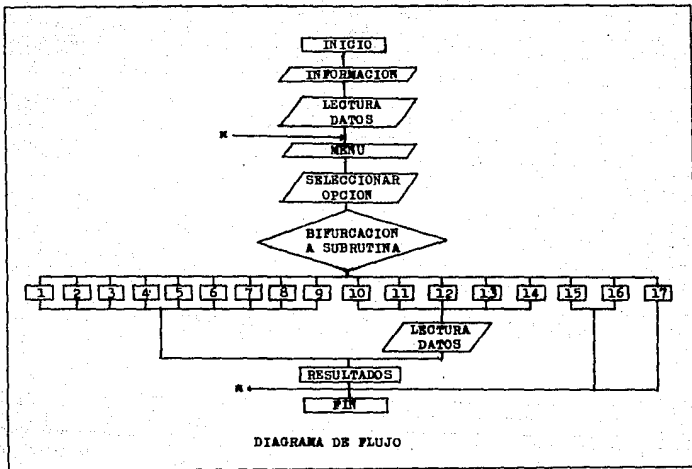
## Calidad en torres de enfriamiento.

Ca como CaCO <sub>3</sub>	Fe como CaCO <sub>3</sub>	Mn como CaCO <sub>3</sub>	Si como CaCO <sub>3</sub>	Total de sólidos disueltos	Sólidos suspen- didos	pH
20-50	0.5	0.5	100- 150	2500	100-150	6-8

## Calidad en calderas.

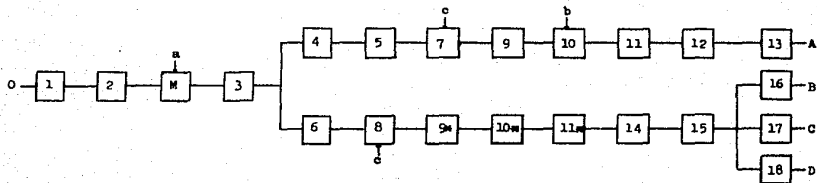
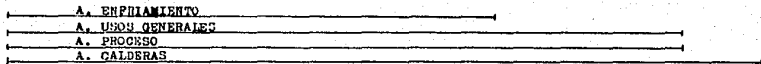
pH	TSD	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na K	Ca Mg	Fe Al	Cu	Mn	Conductividad (micromhs)
9	0.5			0	0.02		0		0.01		1

Calidad del agua para usos generales. Ver tabla de normas de calidad fisicoquímica del agua para uso doméstico.



TRATAMIENTO REQUERIDO

322



- 0. Agua cruda.
- 1. Rejillas.
- 2. Aeración.
- 3. Coagulación.
- 4. Floculación.
- 5. Sedimentación.
- 6. Clarificación.
- 7. Cal sodada en frío.
- 8. Cal sodada en caliente.
- 9. Filtración.
- 10. Cloración.

- 11. Adsorción.
- 12. Desmineralización.
- 13. Ultrafiltración.
- 14. Suavización ciclo sodio.
- 15. Desgasificación.
- 16. Osmosis Inversa.
- 17. Electrodialisis.
- 18. Evaporación.
- M. Mezclado.
- a. Sulfato de Aluminio.
- b. Cloro gaseoso.
- c. Cal hidratada.

**RESULTADOS DE OPERACION**

		Partes por millón (ppm) como CaO <sub>3</sub>									
Substancia		0	1	2	3	4	5	7	9	10	11
Calcio	Ca (2+)	150	150	150	150	150	150	35	35	35	35
Magnesio	Mg (2+)	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50
Sodio	Na (+)	50	50	50	50	50	50	120	120	120	63
Hidrógeno	H (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cationes totales		300	300	300	300	300	300	205	205	205	148
* Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> (-)	209	209	209	155	155	155	0	0	0	0
* Carbonatos	CO <sub>3</sub> (2-)	0	0	0	0	0	0	35	35	28	28
* Hidróxidos	OH <sup>-</sup> (-)	0	0	0	0	0	0	16	16	16	16
* Fosfatos	PO <sub>4</sub> (3-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloruros	Cl (-)	50	50	50	50	50	50	50	50	57	0
Sulfatos	SO <sub>4</sub> (2-)	41	41	41	95	95	95	104	104	104	104
Nitratos	NO <sub>3</sub> (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aniones totales		300	300	300	300	300	300	205	205	205	148
Dureza total		250	250	250	250	250	250	85	85	85	85
& Alcalinidad A		209	209	209	155	155	155	51	51	44	44
- Alcalinidad B		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dureza no carbonatada		41	41	41	95	95	95	50	50	57	57
Alcalinidad de sodio		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	10	10	0	48	48	48	0	0	6.5	6.5
Sílice	SiO <sub>2</sub>	90	90	90	90	90	90	90	90	90	72
Hierro	Fe <sup>2+</sup>	5	5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Manganeso	Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Turbidez		1100	1100	1100	11	11	11	0.11	0.03	0.03	0
Color		35	35	35	0	0	0	0	0	0	0
Sólidos totales		1495	1495	1490	401	401	401	295.16	295.08	295.08	220.05
pH		7	7	7.4	6.8	6.8	6.8	6	6	6	6
Oxígeno disuelto	O <sub>2</sub>	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6

\* Alcalinidad

& Anaranjado de metilo

- Fenolftaleina

**RESULTADOS DE OPERACION**

Substancia	Partes por millón (ppm) como CaCO <sub>3</sub>											34	
	12	13	6	8	9M	10M	11M	14	15	16	17		18
Calcio	Cu (2+)	0.7	0	150	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Magnesio	Mg (2+)	1	0.01	100	5	5	5	5	0	0	0	0	0
Sodio	Na (+)	1.26	0.01	50	145	145	145	93.6	99.6	99.6	1	0.4	0.1
Hidrógeno	H (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cationes totales		2.96	0.02	300	151	151	151	99.6	99.6	99.6	1	0.4	0.1
Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> (-)	0	0	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carbonatos	CO <sub>3</sub> (2-)	0.56	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Hidróxidos	OH <sup>-</sup> (-)	0.32	0	0	5	5	4.6	4.6	4.6	4.6	0.05	0.03	0.01
Fosfatos	PO <sub>4</sub> (3-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloruros	Cl (-)	0	0	50	50	50	51.4	0	0	0	0	0	0
Sulfatos	SO <sub>4</sub> (2-)	2.08	0.02	95	95	95	95	95	95	95	0.95	0.37	0.09
Nitratos	NO <sub>3</sub> (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aniones totales		2.96	0.02	300	151	151	151	99.6	99.6	99.6	1	0.4	0.1
Dureza total		1.7	0.01	250	6	6	6	6	0	0	0	0	0
Alcalinidad A		0.88	0	155	6	6	4.6	4.6	4.6	4.6	0.05	0.03	0.01
Alcalinidad B		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dureza no carbonatada		1.14	0.01	95	5	5	6	6	0	0	0	0	0
Alcalinidad de sodio		0	0	0	0	0	0	0	4.6	4.6	0.05	0.03	0.01
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0	0	48	48	48	49.3	49.3	0	0	0	0	0
Sílice	SiO <sub>2</sub>	1.44	0.01	90	34	34	34	27.2	27.2	0.2	0.1	0.01	0.01
Hierro	Fe <sup>2+</sup>	0	0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0
Manganeso	Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Turbidez		0	0	11	0.11	0.11	0.11	0.02	0.02	0	0	0	0
Color		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sólidos totales		4.4	0.03	401	185.1	185.1	185.1	126.9	126.8	126.8	1.2	0.5	0.11
pH		7	7	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	7	7	7
Oxígeno disuelto		O <sub>2</sub>	0	0	6	6	6	6	0	0	0	0	0

## 4. DISEÑO

Los cálculos y el diseño se realizarán en una computadora PC. Para mayor información consultar el paquete.

## 1. Rejillas

Tipo: Barras.

## 2. Aeración

Tipo: Charolas con coque.

Temperatura (°C) = ?	25
Número de unidades = ?	2
Flujo superficial de diseño (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	10
Tiempo de retención (min) = ?	15
Hierro presente en agua aerada (ppm) = ?	0.05
Manganeso presente en agua aerada (ppm) = ?	0
Oxígeno disuelto (ppm) = ?	6
pH = ?	7.4
Flujo (gpm) =	250
Area (ft <sup>2</sup> ) =	12.5
Diámetro (ft) =	4

## 3. Coagulación

Coagulante: Sulfato de Aluminio (34 ppm y pH=6.8)

Reducción de Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub> = ?	0.45
Incremento de CO <sub>2</sub> como CO <sub>2</sub> = ?	0.40
Incremento de SO <sub>4</sub> como CaCO <sub>3</sub> = ?	0.45
Dosificación de Coagulante (Kg/min) =	0.0815
Dosificación de Alkali (Kg/min) =	0

## 4. Floculación

Tipo: Hidráulico horizontal.

Número de unidades = ?	1
Número de secciones = ?	3
Tiempo de retención (min) = ?	20



Profundidad del tanque (ft) = ?			3.281
Relación largo/ancho = ?			1.487
Coefficiente de rugosidad = ?			0.3
Temperatura (°C) = ?			25
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) = ?			1000
Viscosidad (Kg/m.seg) = ?			1.14E-3
Flujo (gpm) =			250
Flujo/unidad (gpm) =			250
Area del floculador (ft <sup>2</sup> ) =			203.748
Volúmen del floculador (ft <sup>3</sup> ) =			668.5
Longitud del floculador (ft) =			17.35
Ancho del floculador (ft) =			11.74
Ancho/sección (ft) =			3.91
Tiempo/sección (min) =			6.66
	Primera sección	Segunda sección	Tercera sección
Gradiente de velocidad (seg-) = ?	5	4	3
Número de baffles =	11	9	8
Espacio entre baffles (ft) =	1.53	1.78	2.15
Pérdida de carga (ft) =	0.0038	0.0024	0.0013
<b>5. Sedimentación</b>			
Tipo: Arreglo horizontal de tubos.			
Número de unidades = ?			1
Flujo superficial de diseño (ft/min) = ?			0.1428
Tiempo de retención (min) = ?			84
Factor de eficiencia = ?			1.38
Número de Reynolds = ?			280
Relación largo/ancho = ?			2
* Características de los módulos de tubos:			
Angulo de inclinación (°) = ?			60
Ancho del módulo (ft) = ?			0.17
Longitud del módulo (ft) = ?			0.17

Altura del módulo (ft) = ?	2
Distancia de colocación (ft) = ?	10
Flujo (gpm) =	250
Flujo/unidad (gpm) =	250
Area del sedimentador	233.96
Longitud del sedimentador (ft) =	21.63
Ancho del sedimentador (ft) =	10.82
Profundidad del sedimentador (ft) =	12
Area del arreglo (ft <sup>2</sup> ) =	108.15
Longitud crítica en el arreglo =	11.8
Efectividad relativa de profundidad =	8.1
Rapidez en el arreglo (ft/min) =	0.309
Rapidez superficial en tubos (ft/min) =	0.0086

## 6. Clarificación

Tipo: Circular.

Número de unidades = ?	1
Flujo superficial de diseño (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	0.40
Tiempo de retención (min) = ?	120
Temperatura (°C) = ?	25
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> ) = ?	1000
Viscosidad (Kg/m.seg) = ?	1.14E-3
Diámetro del impulsor (ft) = ?	7.5
Constante del impulsor = ?	5
Velocidad de rotación (RPS) = ?	0.10
Flujo (gpm) =	250
Flujo/unidad (gpm) =	250
Area (ft <sup>2</sup> ) =	625
Volúmen (ft <sup>3</sup> ) =	4000
Diámetro (ft) =	28.5
Altura (ft) =	6.4
Potencia del agitador (Hp) =	0.42

## 7. Cal sodada en frío

Coagulante: Sulfato de Aluminio (ppm) = ?	20
Reducción de Alcalinidad como $\text{CaCO}_3$ = ?	0.45
Incremento de $\text{CO}_2$ como $\text{CO}_2$ = ?	0.40
Incremento de $\text{SO}_4$ como $\text{CaCO}_3$ = ?	0.45

\* Tipo: Puede usarse para reducir Alcalinidad de Ca, dureza de Ca no carbonatada y dureza de Mg no carbonatada.

\* Composición en el efluente:

Dureza de magnesio deseada (ppm) = ?	50
Causticidad en el efluente (ppm) = ?	16
Dosificación de cal hidratada 93% ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	0.3497
Dosificación de cal viva 90% ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	0.2736
Dosificación de soda ash 98% ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	0.188

## 8. Cal sodada en caliente

Tipo: Tanque sedimentador.

Magnesio agregado (ppm) como $\text{CaCO}_3$ = ?	3
Dureza resultante (ppm) como $\text{CaCO}_3$ = ?	6
Causticidad resultante (ppm) como $\text{CaCO}_3$ = ?	5
Sílice (ppm) como $\text{SiO}_2$ en el efluente = ?	34
Número de unidades = ?	5
Flujo superficial de diseño ( $\text{gpm}/\text{ft}^2$ ) = ?	2
Flujo (gpm) =	250
Flujo/unidad (gpm) =	50
Flujo de vapor (gpm) =	7.34
Area ( $\text{ft}^2$ ) =	25
Diámetro (ft) =	5.64
Altura (ft) =	8.46
Cal hidratada agregada ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	8.7E-3
Cal viva agregada ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	6.8E-3
Soda ash agregada ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) =	0
Dosificación de óxido de magnesio ( $\text{Kg}/\text{min}$ ) =	2.85E-3

## 9 y 9m. Filtración

Medio filtrante: Arena.

Tipo de lecho: Simple.

Tipo de filtro: Vertical a presión.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) = ? 25

Número de unidades = ? 2

Flujo de diseño ( $\text{gpm}/\text{ft}^2$ ) = ? 3Flujo ( $\text{gpm}$ ) = 250Flujo/unidad ( $\text{gpm}$ ) = 125Area ( $\text{ft}^2$ ) = 42

Diámetro (ft) = 7.28

## Cloración

Tipo: Cloro gaseoso.

Reducción de Alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  = ? 1.4Incremento de  $\text{CO}_2$  como  $\text{CO}_2$  = ? 1.3Incremento de Cl como  $\text{CaCO}_3$  = ? 1.4

10. Cantidad de Cloro (ppm) = ? 5

Dosificación de Cloro ( $\text{Kg}/\text{min}$ ) = 3.8E-3

10x. Cantidad de Cloro (ppm) = ? 1

Dosificación de Cloro ( $\text{Kg}/\text{min}$ ) = 7.6E-4

## 11 y 11m. Adsorción

Medio filtrante: Carbón Activado.

Tipo de lecho: Simple.

Tipo de filtro: Gravedad.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) = ? 25

Número de unidades = ? 2

Flujo de diseño ( $\text{gpm}/\text{ft}^2$ ) = ? 3Flujo ( $\text{gpm}$ ) = 200Flujo/unidad ( $\text{gpm}$ ) = 100Area ( $\text{ft}^2$ ) = 33.33

## 12. Desmineralización

	Unidad Catiónica	Unidad Aniónica
Tipo: Amberlite	IR-120	IRA-410
Concentración de regenerante:	1-5% $H_2SO_4$	4% NaOH
Número de unidades = ?	2	2
Número de regeneraciones/unidad = ?	2	2
Flujo superficial de diseño ( $gpm/ft^2$ ) = ?	12	12
Capacidad de la resina ( $Kgr/ft^3$ ) = ?	18	12.2
Nivel de regeneración ( $lb/ft^3$ ) = ?	7.5	6
Factor de expansión (%) = ?	70	70
Presión lineal ( $Psi/ft$ ) = ?	0.5	0.5
Temperatura ( $^{\circ}C$ ) = ?	25	25
Tiempo de retrolavado (min) = ?	10	25
Relación de enjuague ( $gal/ft^3$ ) = ?	100	50
Flujo superficial de retrolavado ( $gpm/ft^2$ ) = ?	5	3
Flujo volumétrico de regeneración ( $gpm/ft^3$ ) = ?	0.5	0.25
Flujo superficial de enjuague ( $gpm/ft^2$ ) = ?	5	5
Flujo (gpm) =	200	200
Flujo/unidad (gpm) =	100	100
Area de la resina ( $ft^2$ ) =	16.7	16.7
Volúmen de la resina ( $ft^3$ ) =	41.6	50.97
Diámetro de la resina (ft) =	4.6	4.6
Profundidad del lecho (ft) =	2.5	3.0
Altura de la columna (ft) =	4.25	5.2
Cantidad de regenerante (lb) =	312.5	305.8
Caída de presión (Psi) =	1.25	1.53
Tiempo de enjuague (min) =	50	30.58
Tiempo de desplazamiento (min) =	9	18
Tiempo de inyección (min) =	44.1	68.96
Rapidez de retrolavado (gpm) =	83.3	50
Rapidez de regenerante diluido (gpm) =	20.83	12.74

Rapidez de regenerante concentrado (gpm) =	20.83	0.697
Rapidez de agua para dilución (gpm) =	20.60	12.742
Oxígeno disuelto (mg/lit) =	0	0
Dióxido de Carbono (ppm) como CO <sub>2</sub> =	0	0

## 13. Ultrafiltración

Membranas: Acetato de Celulosa.

Temperatura (°C) = ?	25
Número de unidades = ?	1
Flujo superficial de diseño (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	0.021
Factor de recuperación (%) = ?	99
Presión de trabajo (atm abs.) = ?	7
Flujo (gpm) =	50
Flujo producto (gpm) =	49.5
Flujo residuo (gpm) =	0.5
Area (ft <sup>2</sup> ) =	2380.95
Potencia de bombeo (Hp) =	0.003

## 14. Suavización ciclo sodio

Número de unidades = ?	2
Número de regeneraciones/unidad = ?	2
Flujo superficial de diseño (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	10
Capacidad de la resina (Kgr/ft <sup>3</sup> ) = ?	17.8
Nivel de regeneración (lb/ft <sup>3</sup> ) = ?	5
Factor de expansión (%) = ?	70
Presión lineal (psi/ft) = ?	0.5
Temperatura (°C) = ?	25
Relación de enjuague (gal/ft <sup>3</sup> ) = ?	12
Tiempo de retrolavado (min) = ?	10
Flujo superficial de retrolavado (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	10
Flujo volumétrico de enjuague (gpm/ft <sup>3</sup> ) = ?	1.5

\* Se usa NaCl al 10% a 120 °F.

Flujo (gpm) =	200
---------------	-----

## 332 EVALUACION DE UN PROYECTO

Flujo/unidad (gpm) =	100
Area resina (ft <sup>2</sup> ) =	20
Diámetro resina (ft) =	5
Volúmen resina (ft <sup>3</sup> ) =	50
Profundidad del lecho (ft) =	2.5
Altura de la columna (ft) =	4.25
Cantidad de regenerante (lb) =	250
Caída de presión (psi) =	1.25
Volúmen de enjuague (gal) =	600
Volúmen de retrolavado (gal) =	2000
Tiempo de enjuague (min) =	20
Rapidez de enjuague (gpm) =	30
Rapidez de retrolavado (gpm) =	200

## 15. Desgasificación

Tipo: Desuereador al vacío.

Oxígeno disuelto (mg/lit) = ?	0
Dióxido de carbono (ppm) como CO <sub>2</sub> = ?	0
Número de unidades = ?	1
Altura (ft) = ?	22
Diámetro (ft) = ?	4

## 16. Osmosis Inversa

Módulo: Fibras finas-huecas de acetato de Celulosa.

Densidad de empaquetamiento (cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>): 2500

Rechazo de Cloruro Sódico: Bien.

Facilidad de limpieza: Regular.

Flujo superficial de diseño (gpm/ft <sup>2</sup> ) = ?	2.1E-3
Temperatura (°C) = ?	25
Número de unidades = ?	1
Factor de recuperación (%) = ?	99
Presión de trabajo (atm abs.) = ?	17
Flujo (gpm) =	50

Flujo producto (gpm) =	49.5
Flujo residuo (gpm) =	0.5
Area (ft <sup>2</sup> ) =	23809
Potencia de bombeo (Hp) =	7.3E-3

## 17. Electrodialisis

Resina: Estireno-DVB.

Corriente de celda (amp) = ?	19.3
Longitud de la membrana (cm) = ?	100
Anchura de la membrana (cm) = ?	50
Espesor de la membrana (cm) = ?	0.05
Total de sólidos disueltos en el efluente (ppm) =	0.5
Velocidad en el compartimiento diluido (cm/seg) =	9.5
Normalidad de la corriente diluida (eq/lt) = ?	0.0096
Eficacia de la corriente = ?	0.891
Resistencia-área de la membrana (ohm-cm <sup>2</sup> ) = ?	1035
Número de unidades =	331
Flujo (gpm) =	50
Flujo/unidad (gpm) =	0.15
Area (ft <sup>2</sup> ) =	5054
Potencia (Hp) =	3.94

## 18. Evaporación

Flujo (gpm) =	50
Coefficiente de diseño (Btu/(hr)(ft <sup>2</sup> )(°F)):	700
Caída de presión (lb/in <sup>2</sup> ):	5
Temperatura de alimentación (°C) = ?	25
Temperatura de vapor saturado (°C) = ?	149
Agua destilada a producir (lb/hr) = ?	25011
Carga térmica (°C) = ?	3
Temperatura en la coraza 1er. evaporador (°C) =	146
Temperatura en la coraza 2do. evaporador (°C) =	143
Temperatura en la coraza 3er. evaporador (°C) =	140



## 334 EVALUACION DE UN PROYECTO

Calor latente del vapor de saturación (Btu/lb) =	910
Calor latente 1er. evaporador (Btu/lb) = ?	914
Calor latente 2do. evaporador (Btu/lb) = ?	918
Calor latente 3er. evaporador (Btu/lb) = ?	922
Coefficiente de evaporación comercial (%) = ?	74
Agua alimentada (lb/hr) =	25050
Agua destilada 1er. evaporador (lb/hr) =	8327.7
Agua destilada 2do. evaporador (lb/hr) =	8346.1
Agua destilada 3er. evaporador (lb/hr) =	8337.1
Vapor alimentado (lb/hr) =	8281.8
Area de transferencia (ft <sup>2</sup> ) =	2694.2

## ESTUDIO ECONOMICO (PESOS)

	PROCESO			
	A	B	C	D
Rejillas	5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>6</sup>
Aeración	9x10 <sup>6</sup>	9x10 <sup>6</sup>	9x10 <sup>6</sup>	9x10 <sup>6</sup>
Mezclado	3x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>7</sup>
Floculación	3x10 <sup>8</sup>			
Sedimentación				
Clarificación		3x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>8</sup>
Cal sodada en frío	2x10 <sup>8</sup>			
Cal sodada en caliente		3x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>8</sup>	3x10 <sup>8</sup>
Filtración				
Gloración	1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>8</sup>
Adsorción				
Desmineralización	2x10 <sup>8</sup>			
Ultrafiltración	2x10 <sup>7</sup>			
Suavización (Na)		1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>8</sup>	1x10 <sup>8</sup>
Desgasificación		3x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>7</sup>	3x10 <sup>7</sup>
Osmosis Inversa		3x10 <sup>7</sup>		
Electrodíálisis			8x10 <sup>7</sup>	
Evaporación				2x10 <sup>8</sup>
Costo total	8.6x10 <sup>8</sup>	9x10 <sup>8</sup>	9.5x10 <sup>8</sup>	11x10 <sup>8</sup>

1. El suministro adecuado de agua para la industria es uno de los servicios más importantes en esta época de expansión urbana e industrial. Requiere soluciones eficaces y seguras.  
En este sentido, el presente manual constituye un aporte valioso porque ofrece a los ingenieros de plantas de tratamiento de aguas los conocimientos más acordes con las necesidades actuales. Su objeto primordial es proporcionar los principios científicos en que se basan el funcionamiento de tales plantas y los distintos procedimientos que se efectúan en las mismas.
2. La calidad de agua requerida depende de su uso o usos finales.
3. Para la gran mayoría de los usos, la calidad del agua requerida no es tan alta y sería innecesario y antieconómico proceder a remover todas las impurezas en tales casos.
4. En los procesos de ingeniería en general, la consideración clave es la del costo. El ingeniero que se ocupa del tratamiento de aguas tiene la responsabilidad de cumplir dichos requerimientos a un mínimo de costo.
5. Una de las soluciones al problema del agua sería el uso y reuso de la misma a lo largo de su trayectoria.

6. Análisis de los resultados de la evaluación de un proyecto:

- a. El proceso A es el que mejor cumple con la reducción a márgenes no perjudiciales de las impurezas.
- b. El proceso A es el mejor viable para su utilización, debido a que tiene un bajo costo, en comparación a los demás procesos.
- c. No es económico el proceso D, debido a los elevados costos de operación de los evaporadores.
- d. En el proceso B la ósmosis inversa requiere mayor superficie de membrana que la electrodiálisis (proceso C), lo cual sugiere que el coste inicial de la planta sea mayor. Sin embargo, la potencia que se precisa en la electrodiálisis es mayor, lo cual implica un coste de operación superior.

1. Acuña Flores: Electrodialisis, Tesis, U.N.A.M., 1976.
2. Aguilar Martínez: Diseño de un Sistema de Filtración para Plantas de Agua Potable, Tesis, U.N.A.M., 1977.
3. American Society for Testing and Materials Philadelphia, Pennsylvania: Manual de Aguas para Usos Industriales, 3a. Ed., LIMUSA, 1976.
4. American Water Works Association, Inc.: Water Quality and Treatment, 3a. Ed., Mc Graw-Hill, 1980.
5. Banco de México: Indicadores Económicos, Agosto 1989.
6. Christopher R. Schulz & Daniel A. Okun: Surface Water Treatment for Communities in Developing Countries, Interscience Publication John Wiley & Sons, 1985.
7. Cortez Valtierra: Tratamiento de Agua en una Corriente Lateral en una Torre de Enfriamiento, Tesis, U.N.A.M., 1982.
8. Cosío Tenorio: Selección de Equipo y Determinación de Sistemas para la Aplicación de Cloro en Tratamiento de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1976.
9. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, Albany: Manual de Tratamiento de Agua, 9a. Ed., CECSA, 1987.
10. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, Albany: Manual de Tratamiento de Aguas Residuales, 9a. Ed., CECSA, 1987.
11. Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, Secretaría de Recursos Hidráulicos: Operación de Plantas de Tratamiento Primario de Aguas Residuales, Volumen II, 1980.
12. Donald Q. Kern: Procesos de Transferencia de Calor, 18a. Ed. CECSA, 1965.
13. Eskel Nordell: Tratamiento de Agua para la Industria y otros Usos, 9a. Ed., CECSA, 1984.
14. E. W. Steel & Terence J. Mc Ghee: Water Supply and Sewerage, 9a. Ed., Mc Graw-Hill, 1979.
15. Feliciano Arevalo: Diseño de una Planta Desmineralizadora para Agua de Repuesto a Calderas de Alta Presión, Tesis, U.N.A.M., 1977.
16. Flores Silva: Propiedades Selectivas en Membranas Semipermeables de Acetato de Celulosa, Tesis, U.N.A.M., 1976.
17. Fong Castañeda: Construcción, Operación y Mantenimiento de la Planta Potabilizadora del Acueducto Río Colorado, Tesis, U.N.A.M. 1979.

18. González López: Diseño de Equipos de Desaeración Térmica para Agua de Alimentación de Calderas, Tesis, U.N.A.M., 1982.
19. González Muñoz: Utilización de Resinas Intercambiadoras de Iones en el Tratamiento de Condensados, Tesis, U.N.A.M., 1984.
20. Gordon Maskew Fair & Daniel Alexander Okun; Elements of Water Supply & Wastewater Disposal, 2a. Ed., John Wiley & Sons, 1975.
21. Guzmán Mendez: Diseño y Construcción de un Equipo para Desmineralización de Agua Mediante el Uso de Resinas, Tesis, U.N.A.M., 1980.
22. Hardam Singh Azad: Industrial Wastewater Management Handbook, 2a. Ed., Mc Graw-Hill, 1976.
23. Hernández Alvarado: Diseño de un Sistema Desmineralizador para Obtener Agua Destilada para la Fabricación de Hilo Latex, Tesis, U.N.A.M., 1984.
24. INEGI: Estadísticas Históricas de México, 1989.
25. Irigoyen R.: Desaeración de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1980.
26. James W. Mc Coy: The Chemical Treatment of Coaling Water, Chemical Publishing Company, New York, 1974.
27. J. Rodier: Análisis de las Aguas, 3a. Ed., Omega, 1981.
28. Justiniani Roque: Producción de Agua Libre de Pirógenos para el Uso Farmacéutico por medio de Osmosis Inversa, Tesis, U.N.A.M., 1984.
29. K.S. Spiegler: Salt-Water Purification, 2a. Ed., Plenum Press., 1977.
30. Landeros Caballero: Metodología para el cálculo de Floculadores, Tesis, U.N.A.M., 1980.
31. Larry Joel Goldstein: IBM PC, PHH, 1986.
32. Linsley/Franzini: Water-Resources Engineering, 3a. Ed., Mc Graw-Hill, 1979.
33. Lugo Flores: Costo de Tratamiento de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1971.
34. Mata Franco: Filtración Rápida Sobre Lechos de Arena, Tesis, U.N.A.M., 1988.
35. Mc Cabe/Smith: Operaciones Básicas de Ingeniería Química, 10a. Ed., REVERTE, 1982.
36. Mogollón Rivera: La Ingeniería Química Aplicada al Control de Calidad de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1975.

37. Nalco Chemical Company: Manual del Agua, 5a. Ed., Mc Graw-Hill, 1983.
38. Olivares de Lachica: Criterios Generales para el Diseño de Equipo de Tratamiento de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1982.
39. Olivares Maldonado: Anteproyecto para el Suministro de Agua a una Planta Productora de Leche Ultra-Pasteurizada y Leche en Polvo, Tesis, U.N.A.M., 1980.
40. Peters & Timmerhaus: Plant Design & Economics for Chemical Engineers, 3a. Ed., Mc Graw-Hill, 1980.
41. Pérez Zambrano: Diseño y Construcción de una Planta Piloto de Destilación de Agua de Mar, Tesis, U.N.A.M., 1982.
42. Quintanilla Pérez: Análisis de un Sistema de Tratamiento de Agua por Intercambio Iónico, Tesis, U.N.A.M., 1982.
43. Rojo Morán: Aplicación de las Resinas en el Tratamiento de Agua, Tesis, U.N.A.M., 1979.
44. Sánchez Cruz: Determinación y Selección de los Parámetros Fisi-coquímicos Optimos para el Proceso de Coagulación y Floculación, Tesis, U.N.A.M., 1986.
45. Stone Aguilar: Diseño de un Sistema para la Producción de Agua Ultrapura, Tesis, U.N.A.M., 1988.
46. Ulrich Merten: Desalination by Reverse Osmosis, Massachusetts I. Technology, 1966.
47. Vazquez López: Cálculo y Selección de Sistemas de Tratamiento de Agua por medio de Resinas de Intercambio Iónico, Tesis, U.N.A.M. 1984.
48. Walter J. Weber: Control de la Calidad del Agua, 3a. Ed., REVERTÉ, 1979.
49. Woo Rosas: Anteproyecto de una Planta Desaladora de Osmosis Inversa para Agua de Mar, Tesis, U.N.A.M., 1984.

TABLA A-1 CARBONATO DE CALCIO: FACTORES DE CONVERSION

Convertir a CaCO <sub>3</sub>	Multiplicar por	Nombre	Convertir a Ca CO <sub>3</sub>	Multiplicar por
Ca	0.60	Calcio	Ca	0.60
Mg	4.13	Magnesio	Mg	0.243
Na	2.17	Sodio	Na	0.460
K	1.38	Potasio	K	0.729
HCO <sub>3</sub>	0.830	Bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	1.22
CO <sub>3</sub>	1.68	Carbonato	CO <sub>3</sub>	0.600
OH	1.84	Hidróxido	OH	0.540
Cl	1.41	Cloruro	Cl	0.709
NO <sub>3</sub>	0.807	Nitrato	NO <sub>3</sub>	1.24
SO <sub>4</sub>	1.04	Sulfato	SO <sub>4</sub>	0.950
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.617	Bicarbonato de calcio	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.62
CaCl <sub>2</sub>	0.562	Hidróxido de calcio	CaCl <sub>2</sub>	1.11
Ca(OH) <sub>2</sub>	1.85	Cloruro de calcio	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.740
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.610	Nitrato de calcio	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.64
CaO	1.79	Oxido de calcio	CaO	0.560
CaSO <sub>4</sub>	0.756	Sulfato de calcio	CaSO <sub>4</sub>	1.32
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.684	Bicarbonato de magnesio	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.46
MgCO <sub>3</sub>	1.19	Carbonato de magnesio	MgCO <sub>3</sub>	0.845
MgCl <sub>2</sub>	1.04	Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>	0.960
Mg(OH) <sub>2</sub>	1.73	Hidróxido de magnesio	Mg(OH) <sub>2</sub>	0.580
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.674	Nitrato de magnesio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.48
MgO	2.48	Oxido de magnesio	MgO	0.403
MgSO <sub>4</sub>	0.881	Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub>	1.13
Na <sub>2</sub> HCO <sub>3</sub>	0.586	Bicarbonato de sodio	Na <sub>2</sub> HCO <sub>3</sub>	1.70
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.844	Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.18
NaCl	0.586	Cloruro de sodio	NaCl	1.71
NaOH	1.13	Hidróxido de sodio	NaOH	0.890
NaNO <sub>3</sub>	0.586	Nitrato de sodio	NaNO <sub>3</sub>	1.70
Na <sub>2</sub> O	1.81	Oxido de sodio	Na <sub>2</sub> O	0.550
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.706	Sulfato de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.43
Cal viva	1.61	Cal viva 88% CaO	Cal viva	0.622
Cal hidratada	1.36	Cal hidratada 88% Ca(OH) <sub>2</sub>	Cal hidratada	0.736
Soda ash	0.538	Soda ash 88% Na <sub>2</sub> O = 88.2% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Soda ash	1.07
Soda óptica	1.53	Soda óptica 75% Na <sub>2</sub> O = 88.1% NaOH	Soda óptica	0.816
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 100%	1.02	Acido sulfúrico 100%	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 100%	0.980
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%	1.00	Acido sulfúrico 98%	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%	1.00
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 83.2%	0.930	Acido sulfúrico 83.2% = 88% Be	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 83.2%	1.08
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 77.7%	0.793	Acido sulfúrico 77.7% = 80% Be	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 77.7%	1.26
SO <sub>3</sub>	1.33	Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	0.750

TABLA A-2 EQUIVALENTES POR MILLON: FACTORES DE CONVERSION

Convertir ppm a eq/m	Multiplicar por	Nombre	Convertir eq/m a ppm	Multiplicar por
Ca	0.0500	Calcio	Ca	20.0
Mg	0.0622	Magnesio	Mg	12.2
Na	0.0435	Sodio	Na	23.0
K	0.0256	Potasio	K	39.1
HCO <sub>3</sub>	0.0164	Bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	61.0
CO <sub>3</sub>	0.0332	Carbonato	CO <sub>3</sub>	30.0
OH	0.0588	Hidróxido	OH	17.0
Cl	0.0282	Cloruro	Cl	35.5
NO <sub>3</sub>	0.0161	Nitrato	NO <sub>3</sub>	62.0
SO <sub>4</sub>	0.0208	Sulfato	SO <sub>4</sub>	48.0
CaCO <sub>3</sub>	0.0200	Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	50.0

TABLA A-3 BICARBONATOS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	Multiplicar por		Para convertir	a	Multiplicar por
HCO <sub>3</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.83	Bicarbonatos aniones y cationes	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	0.753
HCO <sub>3</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.20		Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	0.834
HCO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	1.22		NaHCO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	0.720
Ca	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4.05		Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca	0.247
Mg	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.02		Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg	0.166
Na	NaHCO <sub>3</sub>	8.68		NaHCO <sub>3</sub>	Na	0.274

TABLA A-4 CARBONATOS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	multiplicar por		Para convertir	a	Multiplicar por
CO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	1.67	Carbonatos aniones y cationes	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	0.600
CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	1.41		MgCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	0.712
CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.77		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	0.566
Ca	CaCO <sub>3</sub>	2.80		CaCO <sub>3</sub>	Ca	0.400
Mg	MgCO <sub>3</sub>	3.47		MgCO <sub>3</sub>	Mg	0.288
Na	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.80		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na	0.484

TABLA A-5 CLORUROS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	Multiplicar por		Para convertir	a	Multiplicar por
Cl	CaCl <sub>2</sub>	1.57	Cloruros aniones y cationes	CaCl <sub>2</sub>	Cl	0.639
Cl	MgCl <sub>2</sub>	1.34		MgCl <sub>2</sub>	Cl	0.745
Cl	NaCl	1.65		NaCl	Cl	0.607
Ca	CaCl <sub>2</sub>	2.77		CaCl <sub>2</sub>	Ca	0.361
Mg	MgCl <sub>2</sub>	2.92		MgCl <sub>2</sub>	Mg	0.255
Na	NaCl	2.54		NaCl	Na	0.398

TABLA A-6 HIDROXIDOS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	Multiplicar por		Para convertir	a	Multiplicar por
OH	Ca(OH) <sub>2</sub>	2.18	Hidróxidos aniones y cationes	Ca(OH) <sub>2</sub>	OH	0.459
OH	Mg(OH) <sub>2</sub>	1.72		Mg(OH) <sub>2</sub>	OH	0.583
OH	NaOH	2.25		NaOH	OH	0.425
Ca	Ca(OH) <sub>2</sub>	1.85		Ca(OH) <sub>2</sub>	Ca	0.541
Mg	Mg(OH) <sub>2</sub>	2.40		Mg(OH) <sub>2</sub>	Mg	0.417
Na	NaOH	1.74		NaOH	Na	0.575

TABLA A-7 NITRATOS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	Multiplicar por		Para convertir	a	Multiplicar por
NO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.32	Nitratos aniones y cationes	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	0.756
NO <sub>3</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.19		Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	0.828
NO <sub>3</sub>	NaNO <sub>3</sub>	1.87		NaNO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	0.730
Ca	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4.10		Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca	0.244
Mg	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.10		Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg	0.164
Na	NaNO <sub>3</sub>	3.70		NaNO <sub>3</sub>	Na	0.271



TABLA A-8 SULFATOS: FACTORES DE CONVERSION ANIONES Y CATIONES

Para convertir	a	Multipli-car por		Para convertir	a	Multipli-car por
SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	1.42	Sulfatos, aniones y cationes	CaSO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	0.705
SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	1.25		MgSO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	0.798
SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.48		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>	0.676
Ca	CaSO <sub>4</sub>	3.40		CaSO <sub>4</sub>	Ca	0.294
Mg	MgSO <sub>4</sub>	4.95		MgSO <sub>4</sub>	Mg	0.202
Na	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.09		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na	0.224

TABLA A-9 DIOXIDO DE CARBONO-CARBONATOS: FACTORES DE CONVERSION

Para convertir	Multipli-car por	Reacciones (para formar carbonatos)	Para convertir a CO <sub>2</sub>	Multipli-car por
Ca(OH) <sub>2</sub>	1.66	Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.464
CaO	1.28	CaO + CO <sub>2</sub> → CaCO <sub>3</sub>	CaO	0.785
Mg(OH) <sub>2</sub>	1.33	Mg(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> → MgCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	Mg(OH) <sub>2</sub>	0.754
MgO	0.916	MgO + CO <sub>2</sub> → MgCO <sub>3</sub>	MgO	1.09
NaOH	1.82	2NaOH + CO <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	NaOH	0.550
Na <sub>2</sub> O	1.41	Na <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	0.710

TABLA A-10 DIOXIDO DE CARBONO-BICARBONATOS: FACTORES DE CONVERSION

Para convertir	Multipli-car por	Reacciones (para formar bicarbonatos).	Para convertir a CO <sub>2</sub>	Multipli-car por
CaCO <sub>3</sub>	2.27	CaCO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	0.440
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.842	Ca(OH) <sub>2</sub> + 2CO <sub>2</sub> → Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	1.19
CaO	0.637	CaO + 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaO	1.67
MgCO <sub>3</sub>	1.92	MgCO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgCO <sub>3</sub>	0.522
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.863	Mg(OH) <sub>2</sub> + 2CO <sub>2</sub> → Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>	1.31
MgO	0.458	MgO + 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	MgO	2.18
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.41	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → 2NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.415
NaOH	0.909	NaOH + CO <sub>2</sub> → NaHCO <sub>3</sub>	NaOH	1.10
Na <sub>2</sub> O	0.704	Na <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → 2NaHCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	1.42

TABLA A-11 ACIDO CLORHIDRICO: FACTORES DE CONVERSION

Para convertir	Multipli-car por	Reacciones (para formar cloruros)	Para convertir a HCl	Multipli-car por
CaCO <sub>3</sub>	1.87	CaCO <sub>3</sub> + 2HCl → CaCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	0.729
Ca(OH) <sub>2</sub>	1.02	Ca(OH) <sub>2</sub> + 2HCl → CaCl <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.985
CaO	0.769	CaO + 2HCl → CaCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	CaO	1.30
CaCl <sub>2</sub>	1.52		CaCl <sub>2</sub>	0.657
MgCO <sub>3</sub>	1.16	MgCO <sub>3</sub> + 2HCl → MgCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	MgCO <sub>3</sub>	0.865
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.799	Mg(OH) <sub>2</sub> + 2HCl → MgCl <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	Mg(OH) <sub>2</sub>	1.25
MgO	0.552	MgO + 2HCl → MgCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	MgO	1.81
MgCl <sub>2</sub>	1.31		MgCl <sub>2</sub>	0.766
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.45	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 2HCl → 2NaCl + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.688
NaOH	1.10	NaOH + HCl → NaCl + H <sub>2</sub> O	NaOH	0.912
Na <sub>2</sub> O	0.849	Na <sub>2</sub> O + 2HCl → 2NaCl + H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	1.18
NaCl	1.80		NaCl	0.524
Cl	0.973		Cl	1.03

TABLA A-11 ACIDO SULFURICO: FACTORES DE CONVERSION

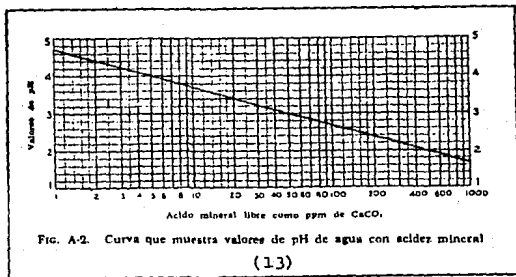
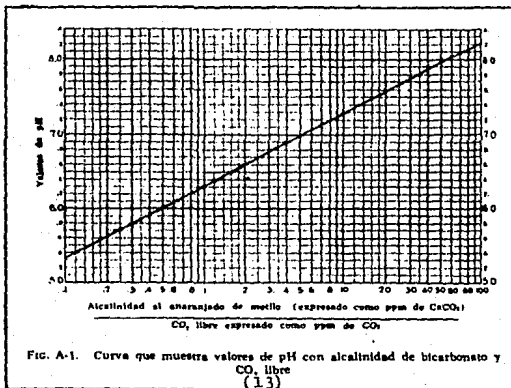
Para convertir	Multipli- car por	Reacciones (para formar sulfatos)	Para con- vertir	Multipli- car por
CaCO <sub>3</sub>	1.02	CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → CaSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	0.990
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.755	Ca(OH) <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → CaSO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	1.32
CaO	0.673	CaO + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → CaSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	CaO	1.75
CaSO <sub>3</sub>	1.29		CaSO <sub>3</sub>	0.771
MgCO <sub>3</sub>	0.990	MgCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → MgSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	MgCO <sub>3</sub>	1.10
Mg(OH) <sub>2</sub>	0.594	Mg(OH) <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → MgSO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O	Mg(OH) <sub>2</sub>	1.68
MgO	0.411	MgO + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → MgSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	MgO	2.45
MgSO <sub>3</sub>	1.23		MgSO <sub>3</sub>	0.815
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.08	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.925
NaOH	0.816	2NaOH + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O	NaOH	1.23
Na <sub>2</sub> O	0.652	Na <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> → Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	1.58
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	1.45		Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	0.691
SO <sub>3</sub>	0.979		SO <sub>3</sub>	1.03

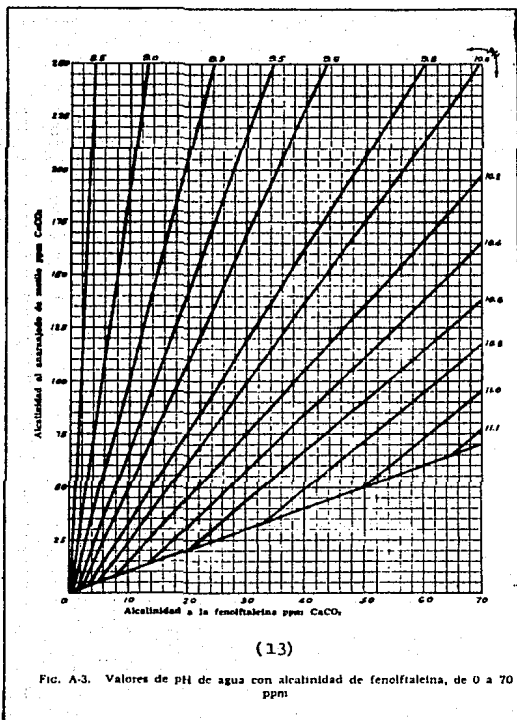
TABLA A-12 COAGULANTE, ACIDO, SO<sub>3</sub> Y BISULFATO-SO<sub>3</sub>: FACTORES DE CONVERSION

A	B	Nombre	Mult. por a (A ÷ B)	a (B × A)
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Sulfato de aluminio	0.433	2.31
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·24H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Alumbre de aluminio	0.424	2.36
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·24H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Alumbre de potasio	0.405	2.47
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Sulfato férrico	0.720	1.39
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Sulfato ferroso	0.346	2.89
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 100%	SO <sub>3</sub>	Acido sulfúrico 100%	0.979	1.02
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%	SO <sub>3</sub>	Acido sulfúrico 98%	0.960	1.04
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 93.2%	SO <sub>3</sub>	Acido sulfúrico 93.2%	0.913	1.10
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 77.7%	SO <sub>3</sub>	Acido sulfúrico 77.7%	0.781	1.31
SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Trióxido de azufre	1.20	0.833
NaHSO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Bisulfato de sodio	0.801	1.25

TABLA A-13 CALCIO-SODIO Y MAGNESIO-SODIO: FACTORES DE CONVERSION

Para convertir	a	Multipli- car por	Para convertir	a	Multipli- car por
Ca	Na	1.15	Na	Ca	0.871
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	1.04	NaHCO <sub>3</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.965
CaCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.06	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	0.944
CaCl <sub>2</sub>	NaCl	1.05	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	0.949
Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	1.08	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.925
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaNO <sub>3</sub>	1.04	NaNO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.965
CaO	Na <sub>2</sub> O	1.11	Na <sub>2</sub> O	CaO	0.905
CaSO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	1.04	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>3</sub>	0.938
Mg	Na	1.89	Na	Mg	0.529
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	1.15	NaHCO <sub>3</sub>	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.871
MgCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.26	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	0.795
MgCl <sub>2</sub>	NaCl	1.23	NaCl	MgCl <sub>2</sub>	0.815
Mg(OH) <sub>2</sub>	NaOH	1.37	NaOH	Mg(OH) <sub>2</sub>	0.729
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	NaNO <sub>3</sub>	1.15	NaNO <sub>3</sub>	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.873
MgO	Na <sub>2</sub> O	1.64	Na <sub>2</sub> O	MgO	0.650
MgSO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	1.18	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	MgSO <sub>3</sub>	0.847





( 13 )

FIG. A-3. Valores de pH de agua con alcalinidad de fenolftaleína, de 0 a 70 ppm