

2 E. No. 100



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química

CALCULO Y SELECCION DE SISTEMAS DE
TRATAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE
RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE;
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

JULIO VAZQUEZ LOPEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

CAPITULO I. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.	7
1.1 Calidad del agua a tratar.	9
1.2 Calidad del agua requerida en el efluente.	40
1.3 Demandas de la planta.	55
CAPITULO II. PROCESOS FUNDAMENTALES.	59
2.1 Características de los intercambiadores.	59
2.2 Descripción procesos fundamentales.	75
CAPITULO III. SELECCION DE SISTEMAS DE INTERCAMBIO IONICO.	81
3.1 Criterios de selección.	81
3.2 Secuencia de regeneración.	85
3.3 Especificación general	90
CAPITULO IV. PROCEDIMIENTO DE CALCULO GENERAL EN SISTEMAS DE SUAVIZACION Y DESMINERALIZACION.	111
4.1 Criterios generales de diseño.	111
4.2 Procedimiento de cálculo.	116
4.3 Ejemplos.	118
CONCLUSIONES.	147
APENDICE.	150
BIBLIOGRAFIA.	170

I N T R O D U C C I O N

En la mayoría de las industrias, se requiere que al agua que consumen se les de un tratamiento para acondicionarla a las necesidades de su proceso y a las necesidades de sus servicios auxiliares como calderas y/o torres de enfriamiento.

Para tal efecto los procesos de suavización y desmineralización por medio de intercambio iónico son los tratamientos más utilizados para suministrar agua desmineralizada que se requiere por ejemplo en las calderas, o bien agua suavizada que se requiere en las torres de enfriamiento, mediante este proceso se eliminan los iones de calcio, magnesio y otros, así como la alcalinidad que provocan problemas de incrustación en los equipos que requieren agua para su enfriamiento.

Es por esto que el tratamiento de agua por medio de las resinas de intercambio iónico, es uno de los procesos más importantes a considerar en el área de servicios auxiliares de una planta, por lo cual es importante el conocimiento de los principales criterios que intervienen en la evaluación de estos sistemas.

En términos generales el intercambio iónico es un proceso por medio del cual las resinas sintéticas denominadas in

tercambiadores de iones, cuando se ponen en contacto con un líquido, tienen la capacidad de reaccionar químicamente con los iones de las sales disueltas en el líquido, ocurriendo de este modo su eliminación.

El campo de aplicación de estas resinas sintéticas es diverso, para los fines de la presente tesis es empleado únicamente en los procesos de suavización y desmineralización del agua.

O B J E T I V O

La presente tesis tiene como objetivo principal indicar la metodología a seguir en la selección y cálculo de los sistemas de tratamiento de agua cruda por medio de las resinas de intercambio iónico, en las plantas de proceso, mencionando:

- a) Sistemas precedentes de tratamiento.
- b) Metodología de cálculo.
- c) Arreglos de tratamiento empleados.
- d) Ventajas y desventajas.
- e) Equipo e instrumentos complementarios.
- f) Materiales de construcción empleados.
- g) Normas y estándares aplicables.
- h) Terminología empleada.

La presente tesis no trata de resolver ningún caso en especial, dado que son diferentes los problemas y los requerimientos de una planta a otra, pero presenta alternativas de selección y los principales criterios tanto teóricos, como --prácticos que se requieren para seleccionar y especificar este tipo de sistemas. Con lo cual se espera que cuando se presente cualquier problema de tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico se cuente con los elementos para proponer y seleccionar el sistema adecuado a los requerimientos de la planta.

C A P I T U L O I

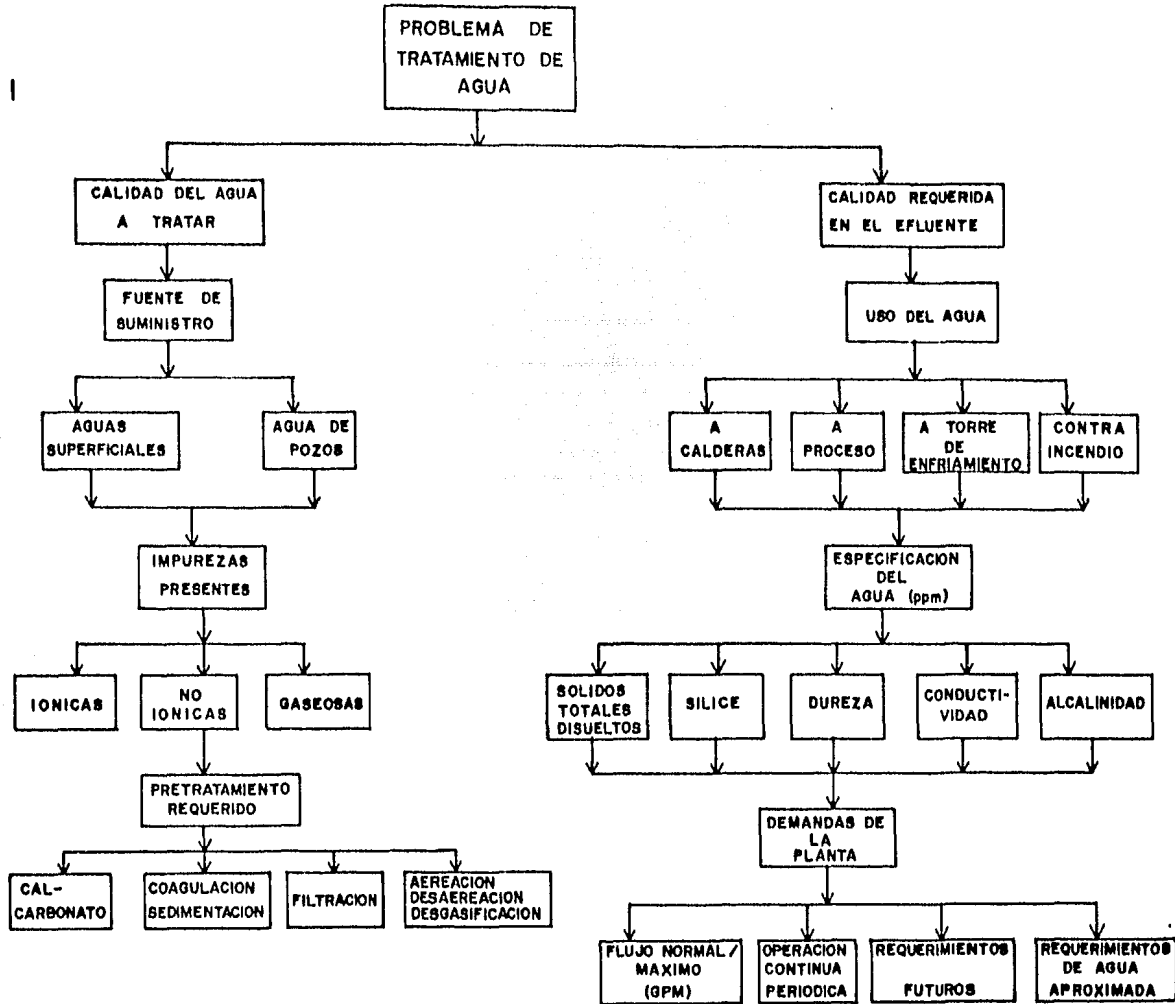
CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Antes de proceder a la selección y cálculo de los sistemas de intercambio iónico, se deberá tener un conocimiento real del problema de tratamiento de agua. Por lo cual se hace necesario evaluar todos aquellos factores que condicionan el problema de una u otra forma, con el objetivo de poder contar con las bases de diseño más completas y dar la solución más adecuada al problema de tratamiento de agua.

Es por ello que este primer capítulo hace referencia a aquellos factores que deberán tenerse en consideración. Tales factores varían de unos casos a otros y puede darse el caso de que una misma planta requiera no sólo de una calidad de agua, sino de varias, por lo que es aún más importante un análisis detallado.

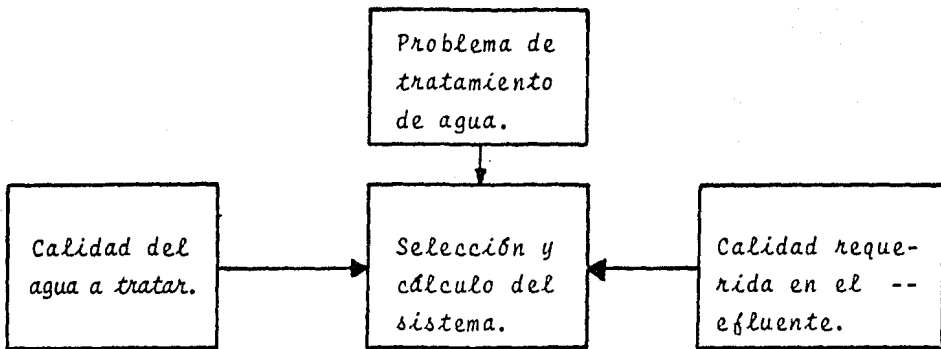
La figura 1 indica el procedimiento a seguir, como primer paso antes de seleccionar el sistema de tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico.

Figura. 1



El problema de seleccionar el sistema de tratamiento de agua, adecuado para un caso en particular estará condicionado por dos factores:

- 1.- Calidad del agua a tratar.
- 2.- Calidad requerida en el efluente.



1.1. Calidad del agua a tratar.

1.1.1. Fuente de suministro.

Es el primer factor a considerar para evaluar si en la eliminación de las impurezas presentes el intercambio iónico será el único método a emplear, o bien si es necesario un pretratamiento para proteger a los lechos de resina; dado que será diferente la composición del agua a tratar de una fuente a otra.

Las principales fuentes de suministro son las siguientes:

- | | | |
|------------------------|---|---|
| a) Aguas superficiales | { | Río
Lagunas
Canales
Lagos |
| b) Aguas subterráneas | { | Pozos profundos
Manantiales
Filtraciones subterráneas |

Generalmente es preferible el suministro de agua subterránea, dado que este tipo de agua, generalmente es clara, -baja en contenido orgánico y más constante en composición, -- por lo cual algunas veces este tipo de agua puede ser alimentada a las unidades de intercambio, sin tratamiento alguno.

Si es utilizada agua superficial se deberá efectuar un análisis de la composición en un rango de un mínimo a un máximo, y tomar una base para la determinación del tiempo de servicio, entre regeneraciones, en todos los casos. Un análisis simple puede ser engañoso, debido a que la composición es afectada por la lluvia, erosión y contaminación.

Algunas veces es recomendable tener un sistema de bom

beo desde la mejor fuente de suministro, ya que esto puede disminuir los costos de operación y los costos de pretratamiento en algunos casos.

1.1.2. Impurezas presentes.- Una vez seleccionada la mejor fuente de suministro de agua, se procede a identificar las impurezas presentes y los problemas que éstas causen en el uso a que se destine el agua.

Las impurezas principales que se encuentran en los tipos de agua que se mencionaron anteriormente se indican en la tabla 1.1.

Impurezas no iónicas.- De las impurezas, en términos generales, en primer lugar las sustancias más indeseables -- son las correspondientes al grupo de las no iónicas.

Los principales problemas que causan este tipo de impurezas se indican en la tabla 1.2.

Impurezas iónicas.- En lo referente a las impurezas iónicas, serán tratadas más a fondo, dado que se eliminan generalmente por medio de las resinas de intercambio iónico.

a) Durezas.- La dureza total se debe a la presencia de sales de calcio y de magnesio, principalmente, aunque pue-

T A B L A 1. 1.

PRINCIPALES IMPUREZAS EN EL AGUA

I O N I C A S		NO IONICAS	GASEOSAS
CATIONICAS	ANIONICAS		
Ca^{++}	HCO_3^-	TURBIDEZ Y POLVO	CO_2
Mg^{++}	CO_3^{--}	MATERIA SUSPENDIDA	O_2
Na^+	OH^-	COLOR	NH_4
K^+	SO_4^{--}	MATERIA ORGANICA	CH_4
NH_4^+	Cl^-	SILICE COLOIDAL	H_2S
Fe^{++}	NO_3^-	MICROORGANISMOS	
Mn^{++}	PO_4^{--}	BACTERIAS	
	$(HSiO_3)^-$	ACEITE	
		CONDENSADO	

(Ref. 2 p. 9)

T A B L A 1. 2.

IMPUREZAS COMUNES EN EL AGUA NO IONICAS Y
PRINCIPALES PROBLEMAS CAUSADOS

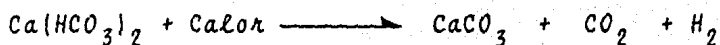
I M P U R E Z A	P R O B L E M A S C A U S A D O S
<p>Aceites y grasas (Coloide, se expresa como materia extraible en éter).</p>	<p>Causa espuma en calderas y corrosión al descomponerse en glicerina y ácidos grasos, forma partículas aislantes que impiden la transferencia de calor.</p>
<p>Turbidez (En los análisis se expresa como SiO₂).</p>	<p>Apariencia desagradable al agua, origina depósitos en las líneas, equipo de proceso y calderas.</p>
<p>Color (En los análisis se expresa como unidades de color).</p>	<p>Formación de espuma en calderas, interfiere con los métodos de precipitación, tales como los de separación de hierro.</p>
<p>Sólidos en suspensión.</p>	<p>Obturan las líneas, causan depósitos en el equipo.</p>

den estar presentes también, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , etc que también son incrustantes y constituyen parte de la dureza. Se expresan en ppm como $CaCO_3$.

Forman dureza temporal o permanente, las cuales se deben a los bicarbonatos en solución, que por la ebullición precipitan en forma de carbonatos de los iones incrustantes señalados; y a las sales solubles de calcio y magnesio que permanecen en solución después de la ebullición del agua, respectivamente.

La combinación de dureza temporal y permanente es conocida como dureza total, y se clasifica de acuerdo a su rango de concentración, como indica la tabla 1.3.

Las sales como el $Ca(HCO_3)_2$ y $Mg(HCO_3)_2$ son descompuestas por la acción del calor, para producir carbonatos, los cuales forman incrustaciones en calderas, además de producir agua y vapor corrosivo. La reacción que ocurre es la siguiente:



Por otro lado las sales que producen dureza permanente (sulfatos de calcio y magnesio) forman incrustaciones cuando su límite de solubilidad es excedido, además estas sales -

T A B L A 1. 3.
CLASIFICACION DE DUREZA DE AGUA

RANGO DE DUREZA (p.p.m. como CaCO_3)	DESCRIPCION DE DUREZA
0 - 60	SUAVE
61 - 120	MODERADAMENTE DURA
121 - 180	DURA
> 180	MUY DURA

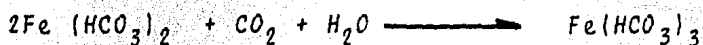
(Ref. 15 p. 3)

cuando se alimentan a el agua de calderas donde existe un pH-alto precipitan.

b) Alcalinidad.- Los grupos iónicos responsables de la alcalinidad presente en el agua son los iones carbonato, bicarbonato, así como oxhidrilos y silicatos. La principal objeción de esta impureza proviene de las calderas, ya que es estas sales bajo la acción del calor se descomponen de acuerdo a las siguientes reacciones:



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



Existen otras objeciones del agua alcalina, pues un alto contenido produce turbidez.

Se consideran aguas con alta alcalinidad aquellas -- que contienen arriba de 250 p.p.m.

c).- Acidez mineral libre.- La acidez mineral libre - se debe a la presencia de aquellos ácidos fuertes (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) usualmente se expresa como $CaCO_3$, los principales problemas que originan es la corrosión, aparte del mal sabor y olor del agua.

d).- Cloruros (Anión cloruro Cl^-).- Se suma al contenido de sólidos totales disueltos (STD) del agua, e incrementa las características corrosivas de ésta, en equipos de acero inoxidable.

e).- Sulfatos (Anión sulfato $SO_4^{=}$).- Se suma al contenido de STD del agua, pero por lo general, por si mismo esta ion no es significativo. Se combina con el calcio para formar incrustaciones de sulfato de calcio.

f).- Nitrato (Anión nitrato NO_3^-).- Se suma al contenido de STD del agua, por lo general no es significativo industrialmente. Da utilidad para el control de fragilización metálica en calderas.

g). - Fluoruro (Anión fluoruro F^-). - Por lo general no es significativo industrialmente, generalmente se elimina por absorción con hidróxido de magnesio, fosfato de calcio, negro de humo o bien por coagulación con alumbre.

En cuanto a las impurezas gaseosas las más comunes -- son las siguientes:

a). - Oxígeno (O_2). - El principal problema de tener -- oxígeno en las líneas de agua, es la corrosión que éste produce en los equipos de intercambio de calor, líneas de retorno de agua etc. El método para la eliminación de oxígeno es la deaeración o bien la adición de sulfito de sodio o inhibidor de corrosión.

b). - Acido sulfhídrico (H_2S). - La presencia de ácido sulfhídrico causa olor a huevos podridos y corrosión, puede eliminarse por medio de los siguientes métodos:

- 1.- Por aereación con gran tiempo de contacto.
- 2.- Por degasificación cuando contiene arriba de -- 10 p.p.m.
- 3.- Por purificación con carbón activado.

Amoníaco (NH_4^+). - El amoníaco produce corrosión en -- las aleaciones de cobre y cinc, por formación de ion complejo

soluble, puede ser eliminado por deaeración.

En las plantas de proceso generalmente se presentan, otro tipo de impurezas, principalmente, en el agua de retorno de enfriamiento, debido a las rupturas que se presentan en los tubos de cambiadores de calor, por lo cual es necesario cuando se efectúa el mantenimiento de estos equipos hacer prueba hidrostática y taponar los tubos rotos.

El tipo de impurezas que se presenten dependerá del producto manejado en estos equipos.

TABLA 1.4

IMPUREZAS IONICAS EN EL AGUA Y PROBLEMAS MAS COMUNMENTE CAUSADOS

I M P U R E Z A S	PRINCIPALES PROBLEMAS CAUSADOS .
<p>Alcalinidad</p> <p>$CO_3^{=}$ HCO_3^{-} OH^{-}</p>	<p>1.- Espuma en calderas</p> <p>2.- Formación de CO_2 en el vapor lo que causa corrosión en las lneas.</p> <p>3.- Arriba de 500-700 p.p.m. en agua de calderas de baja presión origina:</p> <p>a).- Acarreo de sólidos</p> <p>b).- Condensado corrosivo</p> <p>c).- Fragilidad caustica.</p> <p>4.- Mal sabor en el agua potable arriba de 400 p.p.m.</p>
<p>Dureza</p> <p>Todas las sales de calcio magnesio, fierro, aluminio, etc. tales como:</p> <p>$Ca (HCO_3)_2$ $CaSO_4$ $Ca Cl_2$ $Mg (HCO_3)_2$ $Mg SO_4$ $Mg Cl_2$</p>	<p>1.- Formación de incrustaciones en las calderas y tuberías.</p> <p>2.- Destruye el jabón y forma grumos.</p> <p>3.- Destruye los detergentes y tinturas.</p> <p>4.- Interfiere en el teñido.</p>

I M P U R E Z A	PRINCIPALES PROBLEMAS CAUSADOS
Sílice SiO_2	1.- Incrustaciones en calderas (Silicato de calcio) 2.- Depósitos en los alaves de turbinas debido al -- arrastré de la sílice coloidal.
Hierro y Manganeso Fe^{++} Mn^{++}	1.- En las tuberías causa obstrucciones. 2.- Manchas de óxidos. 3.- Da al agua sabor astringente.
Sodio y Potasio Na^+ K^+	1.- Afectan al agua potable. 2.- Por su solubilidad no afectan a la mayoría de los procesos industriales.
Nitratos NO_3^-	1.- Causan daño en la sangre. 2.- Generalmente no interfieren en la mayoría de los- procesos industriales. (Es rara su presencia).
Fluoruros F^-	1.- Afecta el esmalte dental arriba de 1 p.p.m.

I M P U R E Z A	PRINCIPALES PROBLEMAS CAUSADOS
<p>Cloruros Cl⁻</p>	<p>2.- No afecta a los procesos industriales.</p> <p>1.- Produce sabor salado al encontrarse presente en grandes cantidades.</p> <p>2.- Corrosión en equipos de acero inoxidable.</p>
<p>Nitritos NO₂⁻</p>	<p>1.- En pequeñas cantidades afecta la potabilidad del agua.</p> <p>2.- El producto en si es venenoso.</p> <p>3.- En cantidades mínimas no afecta a la mayoría de los procesos industriales.</p> <p>4.- Actúa como inhibidor de corrosión.</p>

(Ref. 8 p. 21)

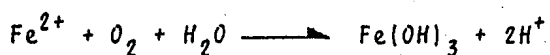
1.1.3 *Sistemas de pretratamiento.*- Es importante --- considerar que normalmente el agua al ser tratada por medio de las resinas de intercambio generalmente requiere de un sistema de pretratamiento, para la eliminación de sustancias indeseables que no son eliminadas por medio de este procedimiento, como es el caso de las impurezas no iónicas que fueron ya mencionadas con anterioridad.

En primera instancia es necesario reducir la concentración de estas impurezas de acuerdo a la calidad del efluente - deseado y en segunda para evitar problemas de oxidación o ata- que orgánico en las resinas, lo cual haría que disminuyera la eficiencia de éstas.

Es por ello que a continuación se hará referencia a -- los sistemas de pretratamiento de agua cruda más comúnmente -- utilizados.

El tipo de pretratamiento dependerá del origen del - -- agua dado que, como ya se mencionó este factor determina su -- composición, si el origen del agua es subterráneo generalmente presenta alto contenido de sólidos disueltos. Existen aguas - subterráneas las cuales contienen altas cantidades de fierro y manganeso. En este caso puede ocurrir lo siguiente al alimen- tar a las unidades de intercambio iónico.

- 1.- Si el fierro se encuentra en estado divalente puede oxidarse a Fe^{++} dentro de la resina, durante el período de regeneración; debido a que la solución del regenerante, puede contener suficiente oxígeno para oxidar el ion ferroso.



- 2.- Si el fierro se encuentra en estado trivalente al entrar a la cama de resina, cubrirá las partículas de resina con una capa de hidróxido insoluble, disminuyendo así la eficiencia de la misma.
- 3.- Si el agua no contiene oxígeno disuelto, y el fierro y el manganeso están en estado divalente, el intercambio iónico será adecuado para eliminar el fierro y el manganeso efectivamente.
- 4.- Si el fierro y el manganeso se encuentran en estado trivalente, o si el agua contiene oxígeno disuelto, y éste no puede ser eliminado, el fierro y el manganeso deberán ser completamente eliminados antes de tratar el agua por medio de las resinas de intercambio iónico. En este caso el fierro y el manganeso podrán ser eliminados por alguno de los siguientes métodos:

1.- Fierro soluble:

Por aereación y precipitación con cal y coagulante.

2.- Fierro Coloidal:

Por coagulación asentamiento y filtración.

3.- Fierro suspendido:

Por filtración.

En el caso de las aguas superficiales las impurezas -- más comunes son las materias en suspensión tales como:

Lodo

Polvo

Turbidez

Materia orgánica

Color

Aceite, etc.

Siendo además su composición muy variable, como ya se mencionó. Los principales métodos utilizados en el tratamiento de estas impurezas se indican en la tabla 1.5.

TABLA 1.5

MÉTODOS GENERALES DE PRETRATAMIENTO
DE AGUA (ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS NO IONICAS)

I M P U R E Z A	TRATAMIENTO EMPLEADO
1.- Materia suspendida y turbidez	a) Filtración para valores pequeños de turbidez, adición de coagulantes, si un efluente claro es deseado. b) Coagulación, asentamiento y filtración, para altos valores de turbidez y adición de cal si es necesario para un ajuste de pH.
2.- Color	a) Igual que en el caso 1b pero con adición de arcilla.
3.- Materia Orgánica	a) Igual que en el caso 1b. b) Adición de agentes oxidantes tales como permanganato o cloro, c) Absorción por medio de carbón activado.
4.- Aceites y grasas	a) Igual que en el caso 1b.

De las impurezas mencionadas, las más comunes que se -- presentan, antes de alimentar a las unidades de intercambio iónico son la turbidez y las trazas de materia orgánica, los cuales son compuestos de materia coloidal orgánica e inorgánica y ácidos orgánicos de alto peso molecular respectivamente.

Los procesos utilizados para la eliminación de tales - impurezas son la filtración y la sedimentación, como se puede observar en la tabla 1.5. Generalmente estos procesos son combinados con la coagulación, proceso en el cual algunos productos químicos son agregados con el propósito de agrupar los coloides finamente dispersados, acelerando el proceso de sedimentación.

Tales coagulantes pueden ser ácidos como: Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$); o bien alcalinos como el aluminato de sodio (Na AlO_2); normalmente el cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) al igual que el Sulfato Férrico no se emplean por ser - higroscópicos. (La tabla 1.6 indica los cambios en el análisis del agua causados por la adición de 1 p.p.m. de los principales coagulantes).

Desde un punto de vista de un funcionamiento adecuado es deseable que la alimentación a las unidades de intercambio iónico contenga 0 p.p.m. como sólidos suspendidos y turbidez -

TABLA 1.6

CAMBIOS EN EL ANALISIS DE AGUA (en p.p.m) CAUSADO POR LA ADICION DE 1(p.p.m;) DE COAGULANTES

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

(Ref. 2 p. 27)

menor a 1 ó 2 unidades.

Sin embargo tal condición muchas veces no es práctica en la realidad, debido a que un pretratamiento requiere de una área mayor y de una inversión adicional en equipo y preparación del terreno, por lo que sería necesario evaluar si el pretratamiento es requerido o no.

Si en el agua que se alimenta a las unidades de intercambio iónico, existiera materia en suspensión, ésta sería acumulada en la superficie de la cama de la resina, provocando, - serios problemas durante la operación, debido a que la cama de la resina estaría siendo la función de filtro. Los principales problemas causados serían los siguientes:

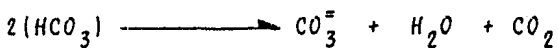
- 1.- Disminución en la capacidad de la resina (por un periodo de tiempo).
- 2.- Gradual incremento en la conductividad del efluente debido a fugas.
- 3.- Aumento en la carga de presión.
- 4.- Formación de acanalamientos.

Tales problemas deberían entonces ser eliminados o minimizados, durante la operación del equipo mediante el proceso de

retrolavado, el cual será discutido posteriormente.

Un caso especial de pretratamiento, es la reducción de dureza temporal y dureza permanente (suavización) por medio -- del proceso de cal carbonato en frío y en caliente, llevados - a cabo a temperatura ambiente y calentando el agua mediante va por respectivamente.

El término de dureza "temporal" se refiere a la dureza carbonatada, preferentemente a la bicarbonatada y es expresada así por el carácter transitorio de ésta cuando el agua es ca - lentada y precipita los carbonatos:



El término de dureza "permanente" se refiere a la dureza no carbonatada (sulfatos de calcio y magnesio y otros catio nes incrustantes) la cual permanece en solución después de la ebullición del agua.

El proceso de cal-carbonato en frío se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:





El Ca^{2+} que se libera en las reacciones 2 y 3 se trata según la reacción 1.- El ion CO_3^{2-} de la reacción 4, contribuye precipitando los epm proporcionales de los liberados en las reacciones 2 y 3.

De esta forma se obtiene agua suavizada, debiendo eliminar posteriormente los precipitados, por medio de la sedimentación y filtración.

Por otro lado en el proceso de cal-carbonato en caliente, el agua es precalentada con vapor antes de la adición de químicos.

El calor acelera la reacción, produciendo un efluente-suavizado, por lo cual este proceso puede ser usado para producir agua suavizada de repuesto, para calderas de presión media. Este proceso reduce la dureza residual aproximadamente de 17 a 25 p.p.m. como CaCO_3 con menor exceso de reactivos, siendo además agua suavizada, más estable, debido a que evita reacciones

posteriores. Este proceso puede tratar aguas superficiales de turbidez moderada, debido a que los precipitados tienen poder-coagulante. Para aguas de turbidez mayor, deberán ser agregados coagulantes junto con la cal y el carbonato.

La calidad de agua típica obtenida por medio de los -- procesos anteriores se indica en la Tabla 1.7.

De los dos procedimientos anteriores, el más importante, es el ablandamiento por el proceso en caliente, el cual se emplea para el tratamiento de agua de calderas, debido a que -- normalmente se agrega fosfato de sodio.

Las principales ventajas de este proceso de ablanda--- miento son las siguientes:

a). - la mayor insolubilidad del $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ permite pro-
ducir aguas con dureza de 17 a 25 p.p.m.

b). - Es mejor para aguas de dureza baja.

Sus desventajas son:

a). - Más difícil de controlar que el proceso de inter-
cambio iónico.

b). - El agua ablandada puede producir depósitos si el-
pH no está apropiadamente ajustado.

TABLA 1.7

PROCESO DE CAL-CARBONATO EFLUENTE TIPICO

<p>CONCEPTO PROCESO</p>	<p>Dureza en el efluente como CaCO_3</p>	<p>Reducción de alcalinidad</p>	<p>CO_2</p>	<p>Total de sólidos reducidos</p>	<p>Silice en el efluente (ppm)</p>
<p>Cal Carbonato en frío</p>	<p>34-85</p>	<p>Reducción por el grado de elim. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ Mg</p>	<p>0.44 X</p>	<p>Reducidos con la alcalinidad.</p>	<p>2-3</p>
<p>Cal Carbonato en caliente</p>	<p>17-25</p>	<p>Más que en el anterior</p>	<p>Más que en el anterior</p>	<p>Más que en el anterior</p>	<p>Hasta 1 ppm con agentes absorbentes de silice.</p>

Para evaluar el empleo de este proceso, en relación -- con el proceso de intercambio iónico, será necesario efectuar un estudio económico, para determinar si es conveniente emplear uno u otro procedimiento.

Con el objetivo de ilustrar y describir los diferentes procesos que son empleados en el pretratamiento de agua se elaboró el diagrama de flujo. Al suponiendo un sistema de pretratamiento de aguas superficiales.

Como ya se mencionó este tipo de aguas contienen materia suspendida: turbidez, color, materia orgánica, sólidos en suspensión etc, lo cual para su eliminación requiere de un proceso de pretratamiento completo, antes de ser el agua alimentada a las unidades de intercambio iónico, mediante los procesos de sedimentación, coagulación y filtración.

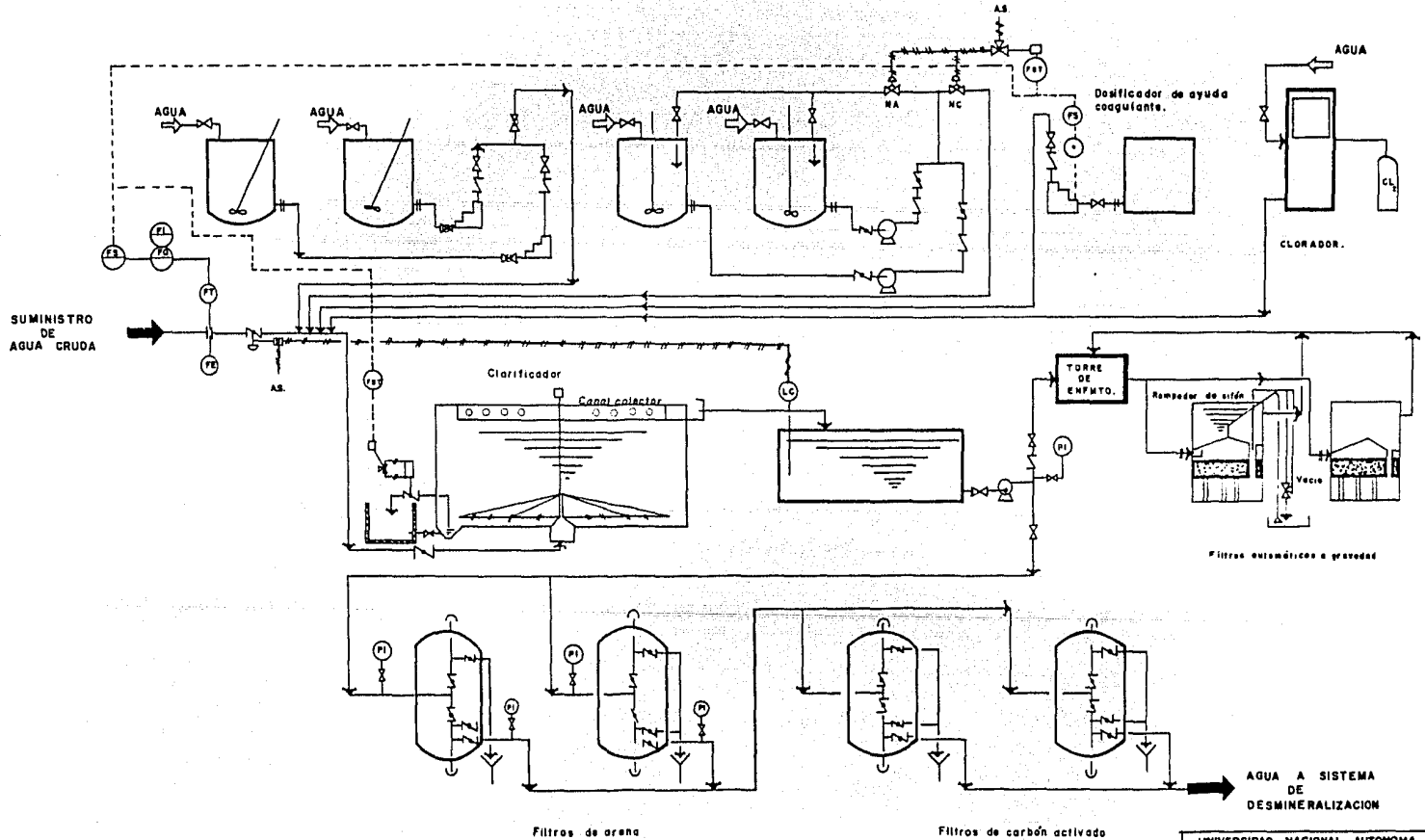
Los procesos de sedimentación y coagulación son llevados a cabo generalmente en un clarificador, en el cual mediante la dosificación de reactivos precipitan algunos minerales disueltos, así como la materia en suspensión, formándose partículas densas que finalmente se asientan y son separadas del -- agua.

El equipo en el cual se llevan a cabo estos procesos -- generalmente son tanques de concreto o acero al carbón: agita-

DIAGRAMA DE FLUJO A-1

Sistema de dosificación de Sulfato de Aluminio

Sistema de dosificación de Cal



dores de acero al carbón y partes internas de acero al carbón o fibra de vidrio.

Este proceso de clarificación es normalmente el paso inicial en un sistema de tratamiento cuando se parte de aguas superficiales, por lo cual se ha mencionado brevemente dado que no es el objetivo de la presente tesis involucrarse en este proceso más a fondo.

El sistema de pretratamiento posterior a la clarificación, es la filtración, el cual protege generalmente a las unidades de intercambio iónico, evitando los problemas mencionados en el primer capítulo.

La filtración es el proceso por medio del cual se eliminan sólidos suspendidos en el agua al hacerla pasar a través de un medio poroso. Se utiliza generalmente para completar la eliminación de turbidez y sólidos suspendidos después del proceso de coagulación y sedimentación.

Condiciones de operación:

Los filtros empleados en el tratamiento de agua pueden ser:

- 1.- Filtros a gravedad
- 2.- Filtros a presión.

Las velocidades recomendadas para la operación de estos equipos es de 2-4 gpm/ft².

El filtro tiene un tiempo de operación útil, a medida que trabaja se van rellorando los poros de materia suspendida (atascamiento del filtro) una vez que el filtro ha llegado a -- cierto atascamiento es necesario retrolavarlo. La velocidad -- superficial de esta operación varla normalmente de 12-25 gpm/ft² para filtros de arena y de 8-12 gpm/ft² para filtros de antracita.

Equipo:

Tanto los filtros gravimétricos como los de presión --- constan del cuerpo del filtro en si y del medio filtrante.

Filtros por gravedad.- En este tipo de equipo el flujo de agua a tratar es debido exclusivamente a la fuerza de gravedad, se usan para capacidades grandes, hasta 2000 gpm.

Filtros a presión.- La diferencia principal es que el material filtrante está contenido en un tanque y el agua es forzada a través del mismo bajo una presión; regularmente son de forma cilíndrica y construidos de acero al carbón.

La capacidad es relativamente menor que la de los gravita

métricos (hasta 700 gpm) pudiendo ser verticales u horizontales.

Medios filtrantes: Los más utilizados son la arena, la antracita y el carbón activado.

Arena.- Es el medio más utilizado para la filtración de agua cruda, debe de estar libre de barro, arcilla u otro material soluble en ácido, tiene el inconveniente de dar problemas de contaminación de sílice.

Antracita.- Sus ventajas sobre la arena son: menor densidad y forma irregular, esto da como resultado un lecho que no se agrieta y se retrolava con facilidad. Se obtienen ciclos de filtración más largos, tiene mayor capacidad para remover turbidez y el flujo de retrolavado es menor.

Se utiliza en la filtración de aguas alcalinas, para la alimentación de calderas, para evitar contaminación de sílice y para remoción de aceite principalmente.

Carbón activado.- Se utiliza generalmente para proteger a las unidades de intercambio iónico, dado que absorbe desechos orgánicos que dan color, sabor y olor, así como el exceso de cloro libre disuelto.

Hasta aquí, se ha hecho referencia de una forma muy general, de los procesos más comúnmente empleados en el pretratamiento de agua, con el objetivo de hacer énfasis en la necesidad, cuando así se requiera, de un pretratamiento para proteger a las unidades de intercambio iónico, aumentando de esta forma su tiempo de vida útil y la eficiencia de las mismas.

1.2 CALIDAD DEL AGUA REQUERIDA EN EL EFLUENTE.

1.2.1 Usos y especificaciones del agua.- El agua generalmente se clasifica por su aplicación:

a).- Agua para uso municipal o potable.

b).- Agua para usos industriales.

Agua de enfriamiento.
 Agua para calderas.
 Agua para proceso.
 Agua para usos generales.

El grado requerido de pureza del agua depende del uso particular. Si el agua cruda es impura, como normalmente acontece, contendrá varios sistemas separados de agua, para que no sea necesario purificar toda el agua que entra a la planta. El tratamiento de toda el agua cruda que entra a la planta puede incluir adición de coagulantes, sedimentación y filtración, para separar los sólidos suspendidos, pero el tratamiento subsecuente dependerá del uso final de cada sistema de agua. El suministro típico de agua para una planta podría ser dividido en sistemas de: Agua de enfriamiento, alimentación de calderas, a proceso, contra incendio, servicios varios y agua para usos sanitarios.

Agua de enfriamiento: (Sistema de agua de repuesto) -

En las plantas de proceso se usan grandes cantidades de agua con el propósito de enfriar, como es en las refinerías o las plantas químicas en donde el agua es usada por los condensadores enfriados por agua o bien para el enfriamiento de los sellos de la caja de baleros y el pedestal de las bombas, o bien el enfriamiento del aceite de lubricación de los compresores y de las turbinas, etc.

El sistema de enfriamiento típico utilizado en este tipo de plantas es el sistema de recirculación abierta, en donde el agua es recirculada y enfriada por evaporación, esto significa que como en una caldera, los sólidos en el agua son concentrados y éstos precipitan cuando la solubilidad de una sal es excedida.

Es por esto que uno de los principales problemas que se tienen en los sistemas de agua de enfriamiento, es la incrustación por carbonato de calcio que proviene de la descomposición del bicarbonato de calcio en dióxido de carbono y agua, además de la incrustación que se obtiene por la formación de sulfato de calcio.

Por lo consiguiente los principales iones que propici-an la tendencia a la formación de incrustación en los siste-

mas de enfriamiento son:

Calcio

Bicarbonato

Sulfato

En la operación de las torres de enfriamiento del tipo de recirculación abierta, la purga de la misma es el medio --- principal para prevenir la concentración de las sales de calcio, manteniendo niveles de concentración que reduzcan a un ni vel aceptable el problema de incrustaciones.

Existen varios métodos para reducir las tendencias incrustantes de los iones arriba señalados, siendo los más utili zados los siguientes:

- (a).- Suavización de agua en frío por medio de cal-carbonato y dosificación de un ácido para ajustar el pH y la alcalinidad.
- (b).- Suavización de agua por intercambio iónico y dosificación de ácido cuando sea necesario.
- (c).- Dosificación de ácido sulfúrico cuando se traten aguas con alta alcalinidad y baja dureza.

Cualquiera de los métodos anteriores mencionados, al -- igual que la dosificación de los diferentes inhibidores de co-- rrosión tales como: cromatos, fosfatos y nitratos en la torre - de enfriamiento producirán resultados diferentes y los mismos - deberán aplicarse en función directa de las características del agua a tratar y del factor económico.

Suponiendo que se está familiarizado con los métodos-- anteriores de tratamiento la tabla 1.8 menciona los límites per-- misibles de concentración de iones, para la correcta operación-- de las torres de enfriamiento.

TABLA 1-8

LIMITES DE CONCENTRACION RECOMENDADOS PARA DETERMINAR CICLOS DE CONCENTRACION ACEPTABLES EN TORRES DE ENFRIAMIENTO DE AGUA.

Parametro	Límites		Comentarios
	Mínimo	Máximo	
Indice de Langelier	+ 0.5	+ 1.5	Sin programa de cromatos
Indice de Ryznar	+ 6.5	+ 7.5	Sin programa de cromatos
pH.	6.0	8.0	
Ca ²⁺ ppm. como CaCO ₃	20-50	300	Sin programa de cromatos
		400	Programa de cromatos
Total de Fe ²⁺ . ppm.		0.5	
Manganeso ppm.		0.5	
Cobre ppm.		0.08	
Aluminio ppm.		1.0	
Silice ppm.		150	Para pH < 7.5
		100	Para pH > 7.5
(Ca).(SO ₄) producto		5000000	Expresado como CaCO ₃
(TSD) ppm.		2500	
Cond. micromhos/cm		4000	
Sólidos susp. ppm.		100-150	

AGUA DE ALIMENTACION A CALDERAS.- El tratamiento de -- agua de alimentación a calderas dependerá fundamentalmente de la presión a la cual opere la caldera.

La principal impureza indeseable en el agua de alimentación es la sílice, la cual no sólo causa depósitos en las -- calderas sino también en los álabes de las turbinas, los cuales son vidriosos y duros. La dificultad de eliminar estos depósitos, causan significantes pérdidas en la eficiencia de la turbina y costos excesivos de mantenimiento.

Las condiciones bajo las cuales el arrastre de sílice ocurre ha sido estudiada por diversos investigadores. Jacklin y Brower encontraron lo siguiente (Ref. 16. p. 90):

a).- La concentración de la sílice en el vapor es una función de la presión de la caldera y de la concentración de ésta en el agua de calderas.

b).- La relación de sílice en el vapor a la sílice en el agua de calderas es llamada relación de distribución, la -- cual dependerá de la presión del sistema y del pH del agua.

c).- El único método de prevenir los depósitos, es limitar el valor de sílice en el vapor a niveles mínimos aproximadamente de 0.02 a 0.05 p.p.m., tal nivel de vapor requerirá

de bajo nivel de sílice en el agua de la caldera, el cual estará determinado por la relación de distribución de la figura -- 2.

La concentración de sílice permisible en el agua de -- calderas podrá ser estimada de las curvas de la figura 3, para cada caso en particular.

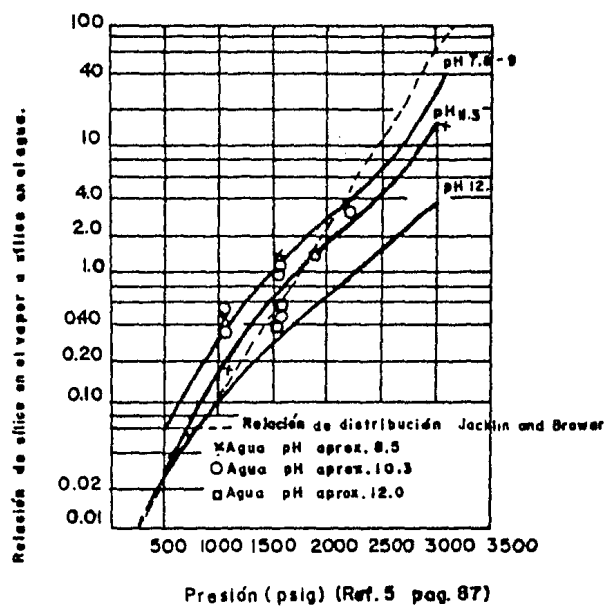
El vapor de sílice en el agua de calderas, puede ser controlado por la purga, la cual limitará el número de ciclos de concentración de la sílice presente en el agua de alimentación, sin embargo, al incrementarse la presión de operación, -- las purgas resultan más costosas, por lo cual el valor de la purga deberá mantenerse razonable baja (menos del 5% del agua de alimentación).

La tabla 1.12 indica los límites de sílice permisibles en el agua de alimentación para calderas a diversas presiones, basada en 20 concentraciones, las cuales corresponden a aproximadamente el 5% de purgas.

En algunas plantas de proceso, como las refinerías se requiere de vapor de alta presión de aproximadamente 900 psig. por lo cual el valor de sílice en el agua de alimentación deberá de ser de 0.3 a 1.0 p.p.m. para lo cual se deberá utilizar-

Figura 2

RELACION DE DISTRIBUCION



el proceso de desmineralización.

Cuando la presión excede de 2000 psig (calderas de alta presión) la sílice en el agua de alimentación deberá ser limitada a un rango de 0.005 a 0.06 p.p.m.

La tabla 1.13 indica la calidad recomendada de agua de alimentación y agua de calderas, para calderas de aproximadamente 2000 psig.

TABLA 1.10

LIMITES DE SOLIDOS Y OTRAS CARACTERISTICAS
RECOMENDABLES EN EL AGUA DE CALDERAS

CONCEPTO (ppp)	PRESION OP. Hasta "						
	(psig)	301-450	451-600	601-750	751-900	901-1000	1000 y
	300						
Sólidos totales	3500	3000	2500	2000	1500	1250	1000
Sólidos disueltos	2500	2300	2100	1900	1430	1200	980
Sólidos suspendidos	1000	700	400	100	70	50	25
Alcalinidad a la (fenoftaleína)	500	420	340	260	180	120	80
Alcalinidad al ana- ranjado de metilo	600	500	400	300	220	150	100
Fosfatos como PO_4^{3-}	100	80	60	40	20	10	5
Sulfatos como SO_4^{2-}	80	60	40	30	20	10	5

(Ref. 5 p. 89)

TABLA 1.9

LIMITES DE CONCENTRACION RECOMENDADOS DE
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

(Ref. 2 p. 62)

TABLA 1.12

TOLERANCIA DE SILICE EN EL AGUA DE ALIMENTACION
 PARA CALDERAS, PRODUCIENDO VAPOR QUE CONTIENE -
 MENOS DE 0.02 P.P.M. DE SiO_2

PRESION DE OPERACION (psig)	SiO_2 EN EL AGUA DE CALDERA (p. p. m.)	SiO_2 EN EL AGUA DE ALIMENTA- CION BASADA EN EL 5% DE PURGAS (20 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	0.02 - 0.04
3000	0.1 - 0.2	0.005 - 0.01

(Ref. 2 p. 57)

TABLA 1.13

CALIDAD DE AGUA RECOMENDADA POR BABCOCK AND
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 ₃ PO ₄	3 - 10
COBRE	0.005	OH -	1
DUREZA	0	pH	9.0 - 10.0
CO ₂	0	SiO ₂	0.8 - 1.2
MAT. ORGANICA	0		
pH	8.5 - 9.2		

(Ref. 2 p. 264)

TABLA 1.14

CALIDAD DE AGUA DE ALIMENTACION DESEADA EN CALDERAS

CONCEPTO IMPUREZAS (p.p.m.)	CALIDAD DESEADA				
	PRESION DE OPERACION (psig)				
	150	400	2000	3200	SEMICON- DUCTORES
pH	8.0	9.0	9.0	9.0	7.5
TSD	500	100	0.5	0.05	1
Cl ⁻	---	---	---	---	---
SO ₄ ²⁻	---	---	---	---	---
HCO ₃ ⁻	50	5	0	0	---
SiO ₂	40	0.5	0.02	0.01	---
Na ⁺ + K ⁺	---	---	---	---	---
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (DUREZA COMO CaCO ₃)	80	10	0	0	---
Fe ²⁺ + Al ³⁺	5	0.05	---	---	---
Cu ²⁺	---	---	0.01	0.005	---
Mn ²⁺	---	---	---	---	---
CONDUCTIVIDAD (MICROMHOS)	---	---	1	0.	0.06
MATERIA SUSPENDIDA	20	5	---	---	TRAZAS

(Ref. 14 No. 95)

Agua de proceso.- Algunos procesos usan el agua como uno de los compuestos reaccionantes o como disolvente, y para evitar la contaminación de productos o el envenenamiento de catalizadores, con frecuencia se necesita una agua altamente purificada.

Para tal propósito el agua, en primer instancia, puede ser ablandada por el proceso de cal carbonato y posteriormente ser desmineralizada por intercambio iónico.

Agua contra incendio y servicios varios.- En una planta de proceso los requerimientos de agua contra incendio son intermitentes, ya que su empleo estará determinado por la presencia de siniestros o bien por los simulacros de incendios -- que se realizan en la planta.

Algunas veces este tipo de agua se emplea en servicios varios, como es la utilización de hidrantes en la limpieza de productos que son derramados al piso, durante la operación de las plantas, o bien se utiliza el agua para la limpieza y pruebas hidrostáticas de algunos equipos, principalmente de cambiadores de calor durante las reparaciones de las plantas.

Debido a este tipo de empleo, el agua no requiere de un tratamiento especial de suavización o adición de algunos --

productos químicos.

Agua para usos sanitarios.- El agua para usos sanitarios deberá de ser potable y estar libre de bacterias patógenas.

En las plantas de proceso una parte del agua tratada de la planta suavizadora puede ser destinada para usos sanitarios.

El agua suavizada deberá posteriormente ser clorada para destruir las bacterias y después ser bombeada a un sistema independiente.

1.3.- DEMANDAS DE LA PLANTA.

Una vez que se ha especificado claramente la calidad del agua requerida en el efluente y la composición del agua a tratar se deberán de considerar aquellos factores que están en relación directa con las demandas de la planta de proceso y que influirán en el diseño de la planta y posteriormente en la adecuada operación de ésta.

Es decir se deberán de especificar los requerimientos del flujo máximo esperado, además del flujo normal de operación.

Así mismo se deberá de analizar, si se requiere que la operación, sea continua o periódica, o bien si se requiere o no de almacenamiento de agua.

Estas consideraciones deberán de estar de acuerdo con las necesidades de la planta, por lo que no se puede hacer una recomendación general en este aspecto.

Sin embargo en las plantas de proceso o en las plantas termoeléctricas en donde el agua es un servicio crítico, el proceso de tratamiento es continuo, para lo que generalmente - mientras un tren de tratamiento se encuentra en operación el otro se regenera.

En el caso, por ejemplo, de que no cuente con el almacenamiento de agua desmineralizada las unidades catiónicas necesitarán suministrar el flujo de retrolavado y de enjuague, - requerido por las unidades aniónicas, además del flujo máximo de servicio, lo cual repercute aumentando el área de las unidades primarias de tratamiento.

Por otra parte deberán de considerarse los planes futuros de expansión de la planta, por lo que será necesario tomar en consideración, si esto sucede, que el área destinada a servicios auxiliares sea programada para la instalación del equi-

po futuro, lo cual deberá de ser especificado en el arreglo -- del equipo (plot-plan) indicando en forma punteada la localización del equipo futuro y el área probable que este equipo necesitará. La figura, 3 indica en una forma esquemática el arreglo empleado en la planta desmineralizadora del complejo petrolmico Tabasco II, en el cual se consideró la instalación futura de 2 unidades aniónicas y 2 catiónicas en la forma en que se indica.

Los datos generales de operación de esta planta son -- los siguientes:

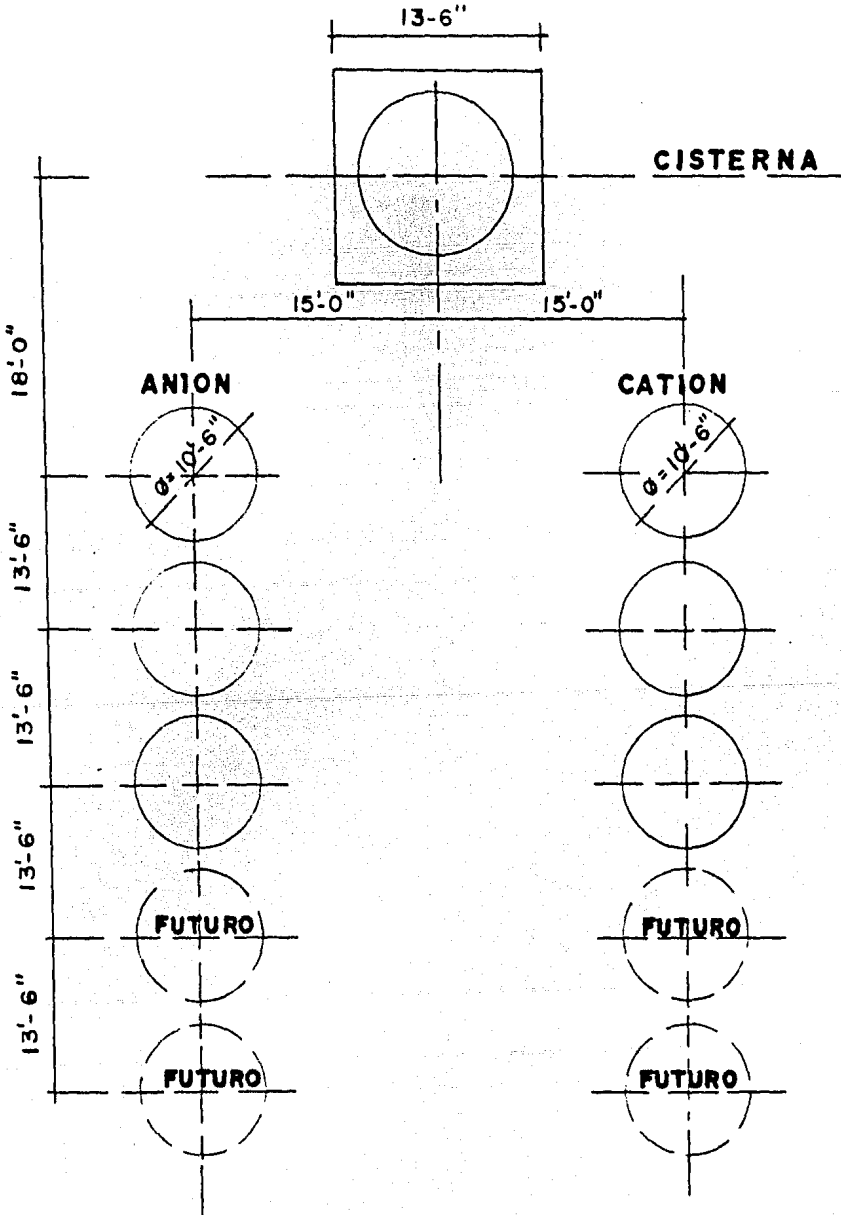
Duración del ciclo de operación:	11 h.
Capacidad de diseño	750 g.p.m. (por <u>unidad</u>).
Máximo tiempo de regeneración:	3 h.

Hasta aquí se ha mencionado de una forma general, aquellas consideraciones preliminares que deberán de ser analizadas, con el objeto, de especificar las bases de diseño, más -- completas, antes de proceder al cálculo y selección del sistema.

Figura 3

Arreglo unidad desmineralizadora de agua.

Complejo Petroquimico Tabasco II



CAPITULO I I

PROCESOS FUNDAMENTALES

Una vez que han sido mencionadas las principales impurezas presentes en el agua, los problemas causados por éstas y la calidad de agua requerida en algunos usos particulares y generales; se procederá a mencionar en el presente capítulo las características de las resinas de intercambio iónico, involucradas en el tratamiento industrial de agua, así como los procesos fundamentales de dicho tratamiento y la descripción de los sistemas mediante una especificación general que cubra los requerimientos mínimos de éstos para su correcta operación.

2.1. CARACTERISTICAS DE LOS INTERCAMBIADORES.

Actualmente en el mercado existen cuatro tipos básicos de resinas de intercambio iónico involucradas en el tratamiento de agua, las cuales son: a) resina catiónica fuertemente ácida, b) resina catiónica débilmente ácida, c) resina aniónica fuertemente básica, y d) resina aniónica débilmente básica, de las cuales en cada caso existen dos categorías; -

las resinas tipo gel y las resinas tipo macrorreticulares.

El presente capítulo menciona las características generales de cada uno de estos tipos de resinas, dado que no es el objetivo involucrarse en la química de éstas.

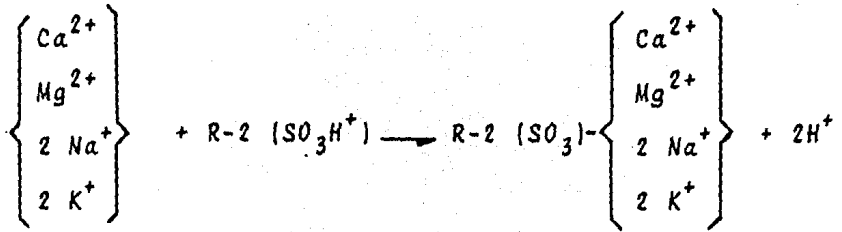
Las resinas tipo gel presentan una fase continua con pequeñas porosidades, en cambio las resinas macrorreticulares presentan una fase discontinua con poros del diámetro medibles, las resinas macrorreticulares generalmente tienen mayor estabilidad que las resinas tipo gel, por lo cual poseen mayor resistencia a la atrición y a la oxidación, en el caso de las resinas aniónicas estas poseen mayor resistencia al ataque orgánico.

2.1.1. Resina fuertemente ácida

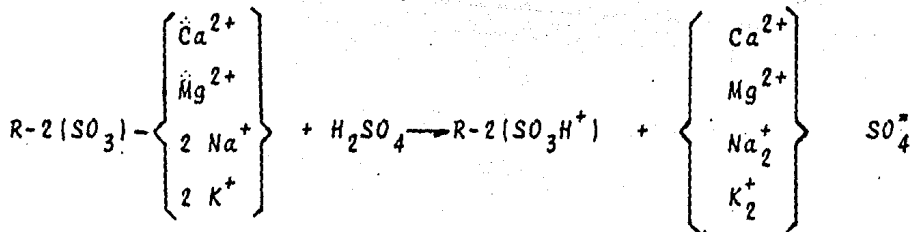
Este grupo de resinas presentan las siguientes características generales: operan a cualquier valor de pH, disociando sales fuertes o débiles, requieren de un exceso de regenerante (Las eficiencias de regeneración varían de un 25-45% en regeneración a contracorriente), lo cual permite que presenten bajas fugas, rápida velocidad de intercambio y estabilidad, presentan un hinchamiento de menos del 7% de la forma Na^+ a la forma H^+ .

La reacción general que efectúan las resinas de este tipo es la siguiente:

Servicio



Regeneración



(H_2SO_4 exceso 110 - 354 %)

Durante la regeneración con flujo descendente de ácido, la parte superior de la cama de la resina es la más completamente convertida a la forma hidrógeno, y la parte inferior de la cama generalmente contiene una banda de sodio al final de la regeneración como se observa en la figura 8.

Al siguiente comienzo del servicio, los cationes en el influente son intercambiados por los iones hidrógeno, en-

la parte superior de la cama de resina y en el fondo los iones Na^+ son intercambiados por los iones hidrógeno, liberando el sodio en el efluente. Conforme avanza el servicio la fuga de sodio decrece, debido a que la banda del sodio en el fondo es gradualmente consumida. *

Durante el servicio los cationes del influente son convertidos a sus correspondientes ácidos pero como dicha -- conversión no es completa, la diferencia entre la acidez mineral total (correspondientes a los sulfatos y cloruros en el influente) y la acidez mineral libre en el efluente es -- igual a la fuga de cationes, como se observa en la figura 4.

El valor de la fuga de cationes puede ser reducido por incremento en el nivel de regeneración, para lo que es necesario utilizar un gran exceso de ácido.

El valor de la fuga de cationes está determinada también por la naturaleza del influente, aguas con alto contenido de sodio (en por ciento del total de cationes) causan alta fuga y aguas con alto contenido de alcalinidad por bicarbonatos causan baja fuga de cationes.

Esto es importante principalmente para los procesos de desmineralización dado que la resina fuertemente básica elimina la acidez y no el sodio, convirtiendo la sal de so--

dio a hidróxido de sodio, con lo cual aumenta la conductividad y el valor del pH en el efluente.

Diversos métodos son utilizados para eliminar la fuga de cationes:

- 1.- Mezclado con aire después de la regeneración.
- 2.- Regeneración a contracorriente.
- 3.- Desmineralización en serie.
- 4.- Cama mixta.

1.- En el caso de mezclado con aire, éste distribuye la banda de sodio a través de la cama de la resina disminuyendo la fuga de sodio y manteniendo más constante la acidez mineral libre durante el servicio. Sin embargo el mezclado con aire requiere una considerable cantidad de aire (5 a 10-SCFM por pie cuadrado de área) involucrando además pasos adicionales de operación que incrementan el tiempo fuera de operación de la unidad y el costo del equipo, por estas razones esta técnica es raramente empleada.

- 2.- Regeneración a contracorriente.

Dicha técnica elimina la banda de sodio de la cama - al regenerar con el flujo ascendente, sin embargo presenta - el problema de la expansión de la cama (si la velocidad de -

flujo es alta). La regeneración a contracorriente es justificada, si el influente es alto en cantidad de sólidos y de sodio, debido a que tales aguas presentan fugas de sodio excesivas, pero para influentes que no son altos en contenido de sodio, la regeneración con flujo descendente de la misma calidad de efluente es usualmente preferida.

3.- Desmineralización en serie.

En el cálculo de desmineralización como se observará posteriormente, el primer paso involucra la consideración de la pureza deseada en el efluente. Esta pureza es expresada en p.p.m. de electrolitos como sólidos totales disueltos. -- Sin embargo los sólidos totales disueltos (STD) es determinado por la fuga de cationes y como sílice (para resinas fuertemente básicas), durante el cálculo se selecciona un nivel de regeneración (libras de ácido por pie cúbico de resina) - el cual deberá mantener las fugas suficiente bajas, pero si el nivel de regeneración es excesivo, el remedio usual será desmineralizar el agua dos o más veces en serie. ~

La fuga de cationes en el efluente del primer par -- (catión-anión) será removida por el segundo par.

Este procedimiento es análogo a la doble y triple -- destilación, en la cual el agua es purificada progresivamente.

4.- Cama mixta.

Este proceso consiste en alimentar el agua a una cama mixta de resina catiónica y aniónica, las cuales están -- contenidas en el mismo recipiente, reduce la fuga de cationes produciendo agua pura, con menor cantidad de sólidos totales disueltos que un sistema en serie de 4 unidades. Dicho sistema opera de la siguiente forma: Antes de la regeneración los dos sistemas son separados por retrolavado, la diferencia en densidades de los dos tipos hace posible la separación por medio del retrolavado; después de esta operación -- las dos resinas son independientemente regeneradas. Una mampa localizada entre las dos resinas, colecta al efluente - del regenerante. El ácido fluye hacia arriba y la sosa hacia abajo. La regeneración del catión precede a la del anión, pero las dos regeneraciones pueden efectuarse simultáneamente.

La ventaja de la regeneración secuencial es que los cationes de calcio son eliminados de la resina catiónica antes que los carbonatos de la resina aniónica, lo cual previene la precipitación del carbonato de calcio, posteriormente a esta operación, le sigue el enjuague y el mezclado de las dos resinas mediante aire comprimido.

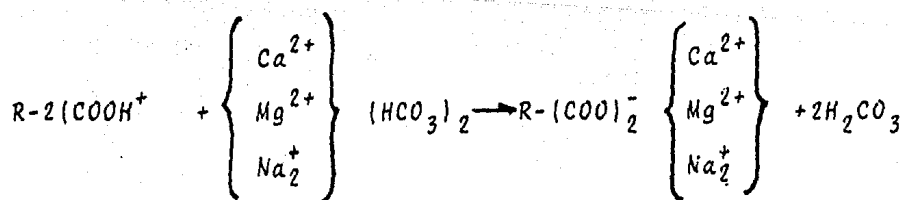
Generalmente este tipo de sistemas es usado como pulidor, como se observará posteriormente.

2.1.2 Resina débilmente ácida.

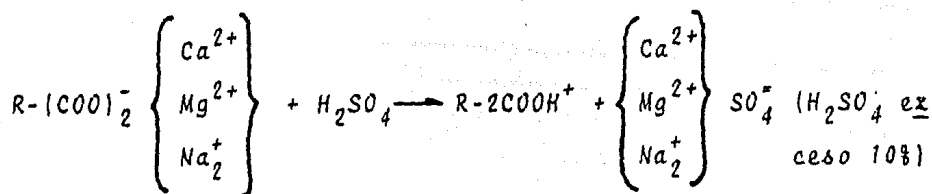
Las resinas débilmente ácidas no remueven los cationes satisfactoriamente abajo de un pH de 7, por lo consi--- guiente no eliminan cationes de sales de electrolitos fuer-- tes, puede ser regenerada con ácidos fuertes o débiles, con alta eficiencia (usualmente más del 90%), tienen una alta -- afinidad por el calcio, lo cual permite bajas fugas de cal-- cio, pero debido a que es una resina débilmente ácida presen ta grandes fugas de sodio; en resumen remueve solamente par te de los cationes que es equivalente en el valor de la alca linidad de bicarbonatos presente.

Las reacciones que se llevan a cabo son las siguien tes:

Servicio.



Regeneración.



Por lo cual cuando una agua contiene una relación de

$$\frac{\text{Dureza}}{\text{Alcalinidad}} > 1$$

La dureza adicional es presentada como permanente y pasará a través de la resina débilmente ácida. Sin embargo - la afinidad de la resina por la dureza es mayor que la afinidad por el sodio, por lo que el valor total de sodio en el - influente también fugará.

Durante la parte inicial del servicio la resina romperá las sales neutras, resultando en la generación de acidez mineral libre, esta acidez generada inicialmente disminuye rápidamente hasta el 20% del ciclo del servicio, y en algún punto, usualmente del 65-70% del servicio, no más acidez mineral libre es generada y solamente las sales neutras de sodio fugarán a través de la cama de resina. Sin embargo también en este punto la alcalinidad de sodio comenzará y continuará incrementándose, hasta que el 10% de alcalinidad sea alcanzado, como se observa en la figura 5.

Si la resina débilmente ácida es usada para la eliminación de alcalinidad, con el propósito de ahorrar ácido en el proceso de desmineralización, está deberá ir seguida por una unidad aniónica, la cual removerá satisfactoriamente el-

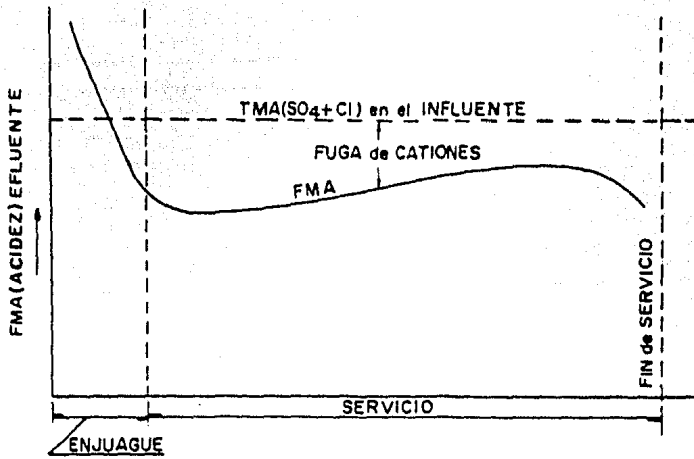


FIGURA 4

CURVAS DE SERVICIO TIPICO RESINA CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA (FMA) ACIDEZ MINERAL LIBRE Y (TMA) ACIDEZ MINERAL TOTAL

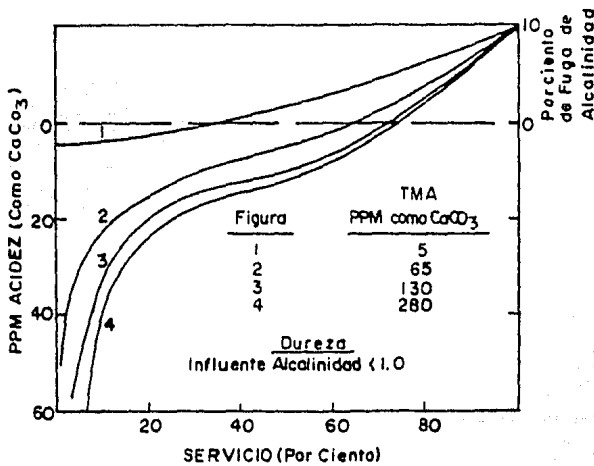


FIGURA 5

CURVAS DE SERVICIO TIPICO RESINA CATIONICA DEBILMENTE ACIDA CON VARIOS VALORES DE TMA. EL PUNTO FINAL DE SERVICIO MUESTRA UNA FUGA DE ALCALINIDAD DEL 10 % DE LA ALCALINIDAD DEL INFLUENTE.

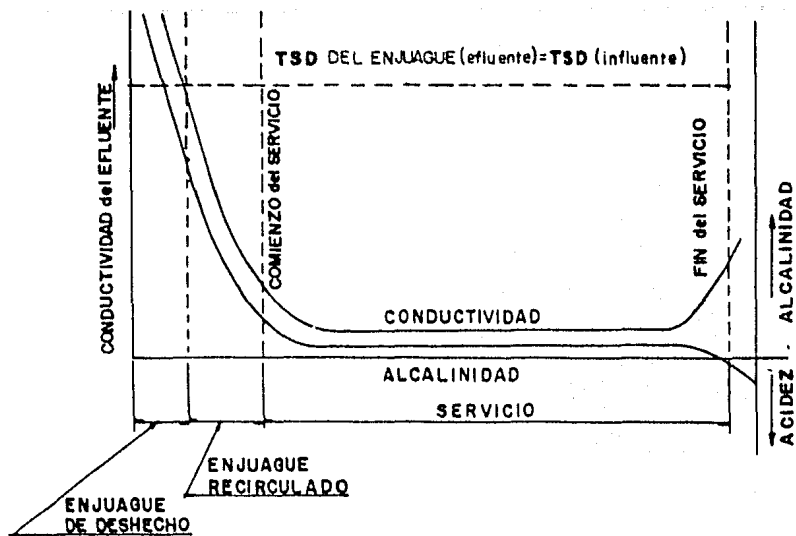


FIGURA 6

CURVAS DE SERVICIO TÍPICO RESINA ANIONICA DEBILMENTE BASICA

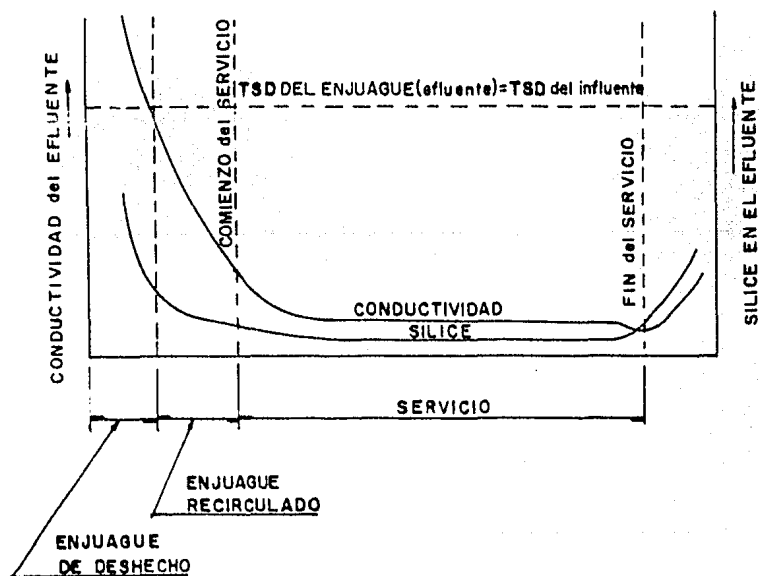


FIGURA 7

CURVAS DE SERVICIO TÍPICO RESINA ANIONICA FUERTEMENTE BASICA.

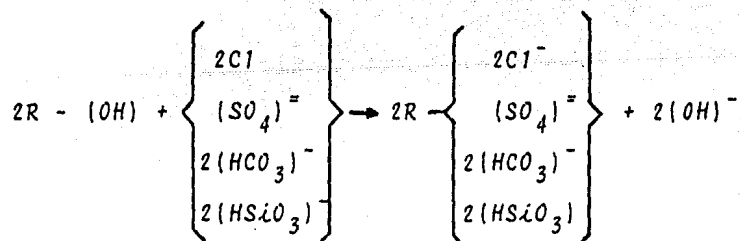
ácido del efluente del catión. Y si es empleada para desalcalinización, la acidez del efluente deberá ser neutralizada por la adición de un álcali controlada por un medidor de pH.

2.1.3 Resina fuertemente básica.

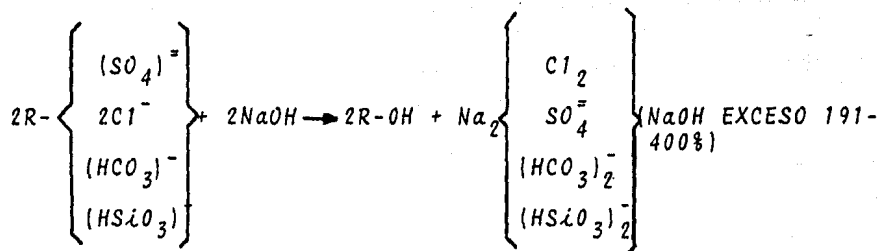
Este tipo de resinas operan a cualquier valor de pH - disociando sales fuertes o débiles, requieren de un exceso - de NaOH de alto grado de concentración para su regeneración. Son empleadas cuando se requiere de agua de alta pureza, por ejemplo para calderas de alta presión.

La reacción que llevan a cabo es la siguiente:

Servicio.



Regeneración.



Dichas resinas son empleadas cuando la eliminación de sílice es requerida, en este caso el valor de las fugas de sílice durante la fase de servicio estará en función de la relación de sílice al total de aniones intercambiados en el influente. Si dicha relación es alta será alta la fuga de sílice (la relación usualmente es expresada en por ciento de SiO_2 por el total de aniones intercambiados, ambos como CaCO_3). Para un mínimo de fuga de sílice, el nivel de regeneración, en libras por pie cúbico de resina aniónica, necesitará ser incrementado si el nivel de regeneración de sosa cáustica necesaria para dar el deseado nivel de fuga de sílice es excesivo, cuatro unidades de intercambio, dos unidades más o el lecho mixto podrán ser empleados, pero la resina fuertemente aniónica deberá ser empleada tanto en la primera etapa como en la segunda.

El prematuro punto de agotamiento por sílice puede ser evitado con tres unidades de desmineralización, en el cual la resina débilmente básica y la fuertemente básica son regeneradas simultáneamente a contracorriente con sosa cáustica. La regeneración de ambos intercambiadores puede ser iniciada por el aumento en la conductividad en el efluente de la resina débilmente básica, la resina fuertemente básica estará entonces parcialmente agotada y el prematuro punto de agotamiento puede ser prevenido.

La fuga de iones en este tipo de resinas se puede deber a dos factores: a) Si la velocidad superficial es demasiado baja (aproximadamente 1 gal/min/ft²) la conductividad del efluente es incrementada, debido a la fuga de iones o -- también si el flujo a través de la desmineralizadora es interrumpido, la calidad del efluente es inferior cuando el servicio es iniciado de nuevo, esto es atribuido a un efecto de regeneración, causando alguna eliminación de los iones indeseables. Frecuentemente un corto enjuague es necesario antes de restaurar el servicio.

El enjuague extra no será necesario, si el efluente puede ser recirculado a la entrada de la resina catiónica -- por una bomba durante los periodos de bajo flujo o en el reincio de la operación. La bomba puede estar conectada automá--ticamente a un medidor de flujo.

b) Las resinas fuertemente básicas en virtud de su capacidad para eliminar los ácidos débilmente disociados absorben los ácidos grasos y las sales del efluente del intercambiador catiónico. Estos compuestos orgánicos son derivados de la materia orgánica en las aguas superficiales.

Después del pretratamiento del agua, alguna materia orgánica residual es esperada.

Desgraciadamente estos compuestos orgánicos absorbidos por la resina fuertemente básica no son satisfactoriamente eliminados en la regeneración, y son acumulados en bloque en los poros de los lugares de intercambio, disminuyendo la capacidad de la resina. Consecuentemente la resina debe de ser cambiada cada vez que es necesario.

Sin embargo la resina puede ser limpiada orgánicamente pasando una solución de sosa cáustica caliente y de salmuera, primeramente la resina es regenerada con sosa cáustica aproximadamente de 1.5 a 2.0 lb/ft³, entonces la salmuera es pasada a través de la resina de 6.5 a 8.0 lb/ft³. Si la gran intensidad de color café es observado en la salmuera, el ciclo es repetido, hasta que el color café ha sido eliminado suficientemente.

Por otra parte las resinas aniónicas macrorreticulares, con mayor porosidad y largos poros discretos son más caras y algunas con menor capacidad, pero son más resistentes al ataque orgánico y permiten una mejor eliminación de compuestos orgánicos, aunque cabe recalcar que no es la solución completa a este problema.

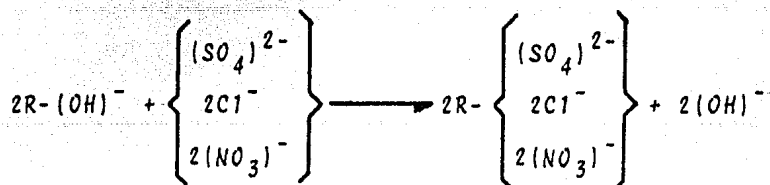
Finalmente para terminar las características de este grupo de resinas la figura 7 indica su curva típica de servicio.

2.1.4 Resina débilmente básica.

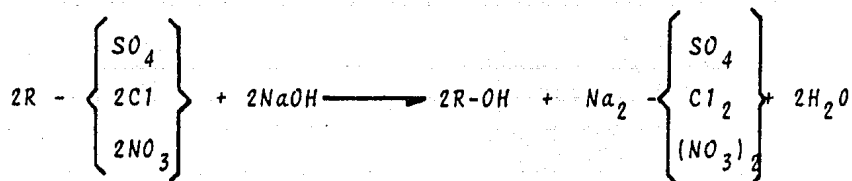
Este grupo de resinas presentan las siguientes características generales:

No remueven los aniones satisfactoriamente arriba de un pH de 6 pueden remover solamente los ácidos fuertemente disociados del efluente del primer intercambiador y no puede eliminar los débilmente disociados como ácido carbónico o silícico.

Las siguientes reacciones son las que se llevan a cabo en el intercambiador débilmente básico en su forma hidróxido.



El regenerante empleado para un intercambiador débilmente básico generalmente es el hidróxido de sodio. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



La fuga de aniones en este tipo de resina, en el efluente consiste principalmente de bicarbonatos y cloruros. La figura 6 indica la curva típica de enjuague y servicio. - El enjuague está dado en dos pasos: En el primero el enjuague se efectúa hasta que el total de sólidos disueltos en el efluente del enjuague, es igual al agua del influente; y en el segundo paso el agua del efluente del enjuague es recirculada a la entrada del catión, hasta que la conductividad cae al límite deseado para empezar la siguiente corrida.

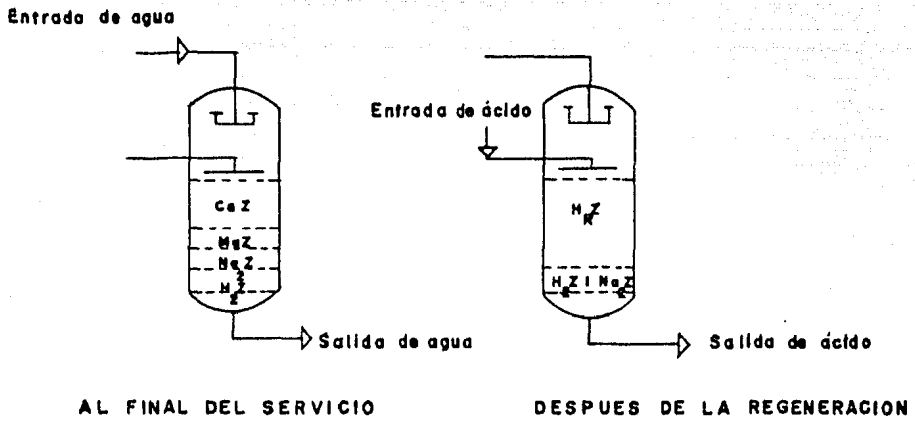
2.2 PROCESOS FUNDAMENTALES

Los procesos fundamentales de tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico son la suavización y la desmineralización.

2.2.1 Suavización.- Este proceso se utiliza principalmente para reducir el contenido de calcio, magnesio, el hierro y el manganeso presentes. (dureza), al límite deseado.

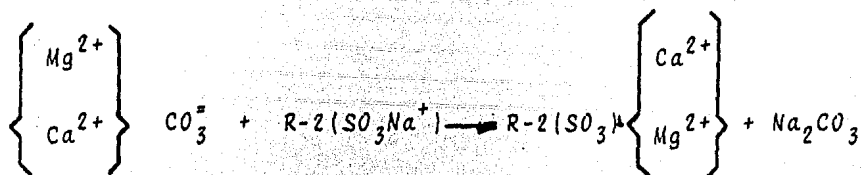
La presencia de las sales de calcio y magnesio y otros cationes incrustantes provoca problemas de incrustación en calderas, y en equipos de transferencia de calor, por lo cual es necesario remover dichas sales por el proceso

Figura 8



que denominamos suavización.

Este proceso de intercambio es relativamente simple; el agua cruda es pasada a través de un tanque que contenga - resina catiónica fuerte ciclo sodio, la cual substituye las iones de calcio, magnesio y otros cationes incrustantes por iones de sodio que inocuos y solubles. La reacción que se -- lleva a cabo es la siguiente:



El proceso de suavización consiste básicamente en -- cuatro principios básicos de operación:

- a) Servicio
- b) Retrolavado
- c) Regeneración
- d) Enjuague

Servicio.- Se refiere o considera cuando la unidad - de intercambio iónico efectúa el ablandamiento de agua, esta es alimentada por la parte superior de la unidad y fluye - - hacia abajo a través de la resina.

Retrolavado.- Se efectúa antes de proceder a la rege-
neración de la unidad, con el fin de aflojar el lecho, des--
cargando agua que fluye en forma ascendente.

Regeneración.- La regeneración consiste en agregar -
una solución concentrada de cloruro de sodio, con el fin de-
que la resina intercambie los iones de Ca^{++} , Mg^{++} y otros --
por iones sodio y quede en las condiciones originales de ser-
vicio, la cantidad de regenerante requerido dependerá de la-
dureza intercambiada.

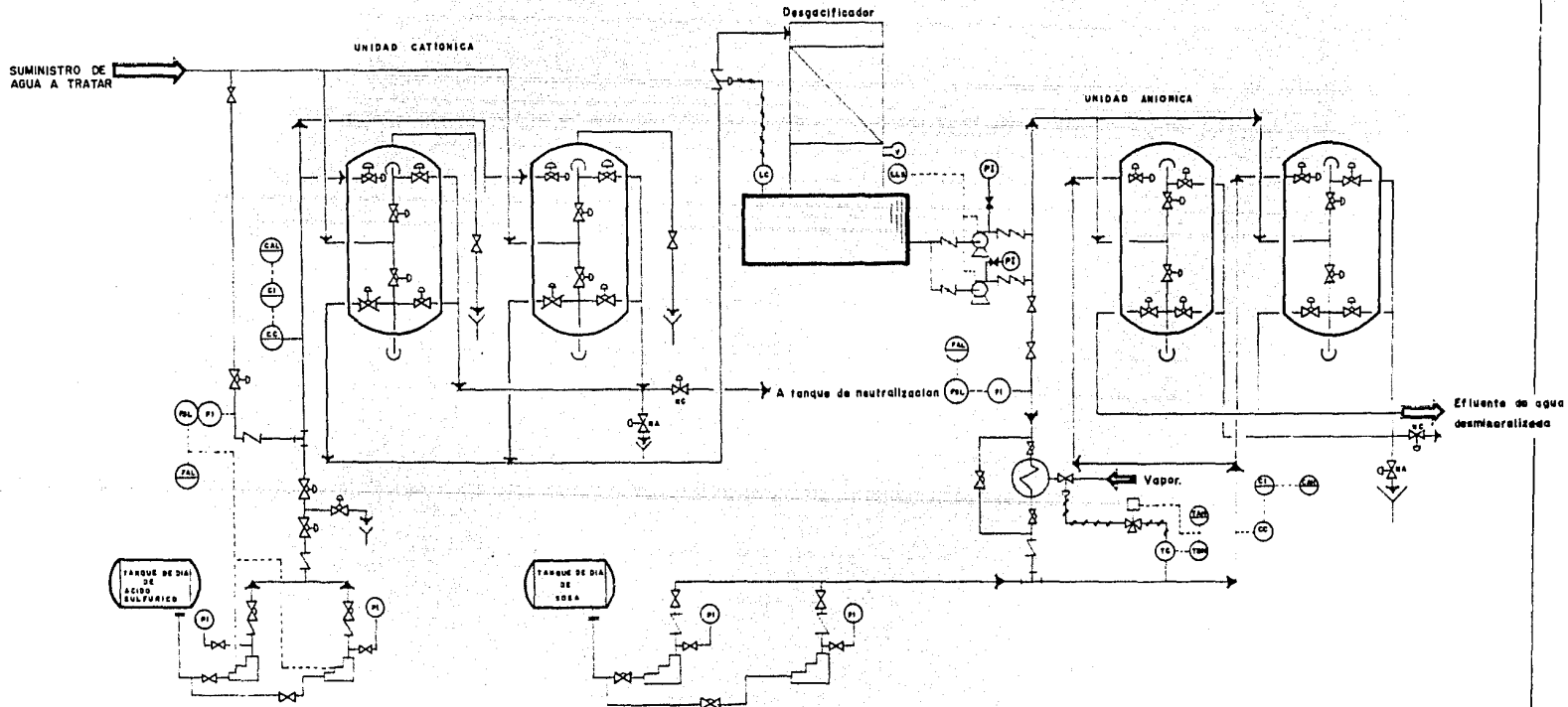
Enjuague.- Consiste como paso siguiente, en agregar-
agua por la parte superior, en sentido descendente a través-
de la resina para eliminar el regenerante residual.

2.2.2 Desmineralización.- La desmineralización invo-
lucra el uso de una resina catiónica y de una aniónica, en -
secuencia o en combinación dependiendo de la naturaleza de -
los iones a ser removidos y de la calidad requerida en el --
efluente.

La resina catiónica (ciclo hidrógeno) efectúa la con-
versión de las sales a sus correspondientes ácidos, mientras
que la resina aniónica efectúa la eliminación de estos áci--
dos.

La secuencia operacional a seguir en el proceso de desmineralización es básicamente similar al de la suavización, sin embargo, a pesar de tener la misma secuencia operacional, existen diferencias dadas por las características de las resinas que en este proceso intervienen; tales diferencias son mencionadas en los criterios de diseño de cada una de las unidades catiónicas y aniónicas en el capítulo siguiente. El diagrama A2 indica el diagrama de Flujo típico de estos sistemas.

DIAGRAMA DE FLUJO A-2



C A P I T U L O I I I

SELECCION DE SISTEMAS DE INTERCAMBIO IONICO

3.1 CRITERIOS DE SELECCION.

Es claro que para la selección de un sistema en particular es necesario conocer y comparar las características fundamentales y las principales ventajas y desventajas de cada uno de los diferentes arreglos que pudieran ser aplicables a los requerimientos de la planta.

Para resolver este problema que comúnmente se presenta, se elaboró el cuadro 3.1 "Cuadro de selección de arreglos combinados de tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico"; el cual incluye los principales criterios de selección, indicando los resultados de operación esperados de los principales arreglos, que son empleados en el tratamiento de agua por medio de este proceso.

Los criterios mencionados son los siguientes:

- 1).- Características del influente.
- 2).- Arreglo de tratamiento propuesto.
- 3).- Características típicas del efluente.

- a).- Dureza
- b).- Alcalinidad
- c).- Silice
- d).- Conductividad
- e).- Sólidos totales disueltos.

4).- Principales ventajas y desventajas.

El cuadro 3.1 se elaboró en base a la recopilación bi
bliográfica y de campo de diversas fuentes, por lo que se es-
pera que junto con las consideraciones y la información de --
los capítulos anteriores, se complementen los criterios y se-
establezcan los elementos técnicos para proponer un determinado
arreglo.

Antes de estudiar el cuadro 3.1 se pueden tomar en --
consideración las siguientes recomendaciones generales para -
irse introduciendo en la selección del sistema propuesto.

- 1.- En el caso de suavización es obvio que sólo resi-
nas catiónicas pueden ser utilizadas, la resina -
empleada más comúnmente es la ciclo sodio.
- 2.- Para desmineralizar una combinación de resinas ca
tiónicas y aniónicas deberá ser empleado.
- 3.- Si el total de sólidos disueltos en el efluente -

es mayor de 2 p.p.m. un sistema de 2 unidades ---
(catión - anión) puede ser suficiente.

- 4.- Si la sílice no es problema en el efluente una re
sina débilmente básica puede ser empleada, sin em
bargo si se desea eliminar la sílice una resina -
fuertemente básica deberá ser empleada.
- 5.- Para menos de 2 p.p.m. del total de sólidos di---
sueitos en el efluente, un sistema de varias uni-
dades generalmente es usado, con unidades pulido-
ras al final.
- 6.- Si el efluente contiene altos valores de alcalini-
dad un desgasificador podría reducir el dióxido -
de carbono del efluente del intercambiador catión-
nico.
- 7.- La alta alcalinidad sólo justifica el uso de un -
intercambiador débilmente ácido, para ahorro del-
regenerante ácido.
- 8.- Si altos valores de acidez mineral están presen-
tes una resina débilmente básica, precediendo a -
la resina fuertemente básica ahorrará regenerante
este sistema puede efectuarse mediante tres unida-
des o bien empleando la resina débilmente básica-
y la fuertemente básica en la misma unidad.

CUADRO DE SELECCION DE ARREGLOS COMBINADOS DE TRATAMIENTO DE AGUA POR MEDIO DE INTERCAMBIO IONICO

Características de la composición del influente (o ppm)	Arreglo de Tratamiento	CARACTERISTICAS TIPICAS DE EFLUENTE (o ppm)						COMENTARIOS	
		REDUCCION DUREZA	REDUCCION DE ALCALINIDAD	REDUCCION DE ACIDEZ MINERAL	REDUCCION DE SUELVES	CONDUCTIVIDAD MICROMOHMS/CM	PH	RESIDUOS SOLIDOS	Principales Ventajas
Dureza presentada por sales de Ca ⁺⁺ y Mg ⁺⁺ La sílice y la alcalinidad no son un problema, baja conductividad (500 µS/cm)		0-8	No se remueve	No	No se remueve	---	---	1. Costo inicial del equipo bajo	1. Este mineral del equipo bajo
Alta concentración de alcalinidad Bajo contenido de dureza Bajo contenido de sulfatos = sulfatos = cloruros 500		0-2	5-10	No	No se remueve	---	---	1. El efluente de la resina sodada puede ser neutralizado con una porción del agua cruda hasta obtener el grado deseado de acidez libre.	1. Este mineral del equipo bajo
Bajo contenido de alcalinidad Bajo contenido de dureza = sulfatos = cloruros		0-2	5-10	No	No se remueve	---	---	1. El principal desventaja con respecto al sistema anterior es que requiere más resina y con eso un costo más alto de regeneración.	1. El principal desventaja con respecto al sistema anterior es que requiere más resina y con eso un costo más alto de regeneración.
Alta concentración de alcalinidad Bajo contenido de dureza = sulfatos 250		0-2	5-10	No	No se remueve	---	---	1. Se requiere equipo anticorrosivo.	1. Se requiere equipo anticorrosivo.
Alta concentración de alcalinidad Bajo contenido de dureza permanente.		No aplica	5-10	No	No se remueve	---	---	1. Se requiere menor cantidad de regenerante y por lo consiguiente poca neutralización.	1. Se requiere menor cantidad de regenerante y por lo consiguiente poca neutralización.
Alta concentración de alcalinidad Alta concentración de dureza		0-2	5-10	No	No se remueve	---	---	1. Requiere menor cantidad de regenerante.	1. Requiere menor cantidad de regenerante.
Baja alcalinidad del agua y eliminación de sílice requerida.		0	0	0	0.02 a 0.10	5-15	2-3	1. Costo bajo del equipo	1. Costo bajo del equipo
Baja alcalinidad del agua La sílice y el CO ₂ no son problema en el efluente		0	No se remueve	Como es deseado	No se remueve	10-30	---	1. Costo bajo del regenerante.	1. Costo bajo del regenerante.
Alta concentración de alcalinidad La sílice no es problema en el efluente, no aplicable para eliminación de coloración		0	0	Como es deseado	No se remueve	10-20	2-10	1. Costo bajo del regenerante.	1. Costo bajo del regenerante.
Alta alcalinidad del agua y eliminación de sílice requerida.		0	0	0	0.2 a 0.1	5-15	2-3	1. Costo alto en químicos para regeneración.	1. Costo alto en químicos para regeneración.
Alta concentración de sodio mg/l Alta concentración de alcalinidad y eliminación de sílice requerida		0	0	0	0.2 a 0.1	5-15	2-3	1. Bajo costo de químicos para regeneración, al disminuir la carga de regeneración en la resina de sodio.	1. Bajo costo de químicos para regeneración, al disminuir la carga de regeneración en la resina de sodio.
Alta concentración de alcalinidad Alta porcentaje de sodio Este sistema puede ser utilizado cuando el rendimiento necesario de los regenerados para el proceso de intercambio iónico es menor al contenido de sílice.		0	0	0	0.1 a 0.5	1-5	0.2 a 1.0	1. Costo bajo del equipo.	1. Costo bajo del equipo.
Bajo contenido de sulfato en suspensión y alto porcentaje de sodio del agua		0	0	0	0.1 a 0.5	0.5 a 1.5	0.2 a 0.5	1. Este sistema se puede usar para eliminar la carga de regeneración, en la práctica se requiere menor cantidad de sílice para la regeneración, lo que reduce el costo del equipo, para alto costo de regeneración.	1. Este sistema se puede usar para eliminar la carga de regeneración, en la práctica se requiere menor cantidad de sílice para la regeneración, lo que reduce el costo del equipo, para alto costo de regeneración.
Alta alcalinidad del agua Alta pureza requerida del agua.		0	0	0	0.1 a 0.5	0.5 a 1.5	0.2 a 0.5	1. Este sistema requiere el uso de resina catiónica cambiada con ácido sulfúrico, el agua que sale de la columna de intercambio iónico debe ser tratada con una unidad de pretratamiento para proteger la resina.	1. Este sistema requiere el uso de resina catiónica cambiada con ácido sulfúrico, el agua que sale de la columna de intercambio iónico debe ser tratada con una unidad de pretratamiento para proteger la resina.
Alta concentración de sodio mg/l total.		0	0	0	0.2 a 0.1	0.10 a 0.25	0.4 a 0.1	1. Las ventajas principales de este sistema es el alto grado de regeneración, principalmente de base para el agua con alto contenido en acidez mineral total.	1. Las ventajas principales de este sistema es el alto grado de regeneración, principalmente de base para el agua con alto contenido en acidez mineral total.
Alta concentración de alcalinidad Alta pureza requerida del agua.		0	0	0	0.1 a 0.5	0.10 a 0.25	0.4 a 0.1	1. La resina aniónica protege a la mezcla del agua orgánica.	1. La resina aniónica protege a la mezcla del agua orgánica.
Bajo contenido de alcalinidad Alta porcentaje de sodio.		0	0	0	0.2 a 0.1	1-5	0.2 a 1.0	1. La resina aniónica reduce el valor de sodio como regenerante, en agua con alto contenido de acidez mineral, las unidades aniónicas son más pequeñas que las unidades primarias.	1. La resina aniónica reduce el valor de sodio como regenerante, en agua con alto contenido de acidez mineral, las unidades aniónicas son más pequeñas que las unidades primarias.
Alta concentración de alcalinidad y de acidez mineral.		0	0	0	0.2 a 0.1	5-15	2-3	1. Bajo costo de químicos al disminuir la carga de regeneración, principalmente de base para el agua con alto contenido en acidez mineral total.	1. Bajo costo de químicos al disminuir la carga de regeneración, principalmente de base para el agua con alto contenido en acidez mineral total.

NOTAS:

1. El presente tabla se basa en agua de salinidad moderada aproximadamente 500 ppm de sólidos totales disueltos.

2. Resina catiónica Ciclo soda.

3. Desagregador.

4. Resina aniónica doblemente catiónica.

5. Resina aniónica Feoromonte sodio.

6. Resina aniónica Feoromonte bari.

7. Resina aniónica doblemente básica.

REFERENCIAS:
1. Res 2 P P 102-100
2. Res 17 P P 22-50
3. Res 7 P P 21-37

3.2 SECUENCIA DE REGENERACION RECOMENDADA.

La secuencia de regeneración recomendada para cada uno de los diferentes tipos de resinas y para las combinaciones comúnmente empleadas de éstas, en los diferentes arreglos (a regeneración convencional o sea a flujo descendente) es la siguiente:

a) Resina catiónica (fuertemente ácida).

PASO	OPERACION
1	Retrolavado
2	Dilución de agua ácida
3	Concentración de ácido al 2%
4	Concentración de ácido al 4%
5	Concentración de ácido al 6%
6	Concentración de ácido al 8%
7	Enjuague lento (Desplazamiento de ácido)
8	Enjuague rápido No. 1
9	Retrolavado
10	Enjuague rápido No. 2

b) Resina Aniónica (fuertemente básica)

PASO	OPERACION
1	Retrolavado No. 1
2	Precalentamiento
3	Dilución sosa cáustica 4%
4	Concentración sosa cáustica 50%
5	Enjuague lento
6	Enjuague rápido
7	Retrolavado No. 2
8	Enjuague rápido
9	Servicio

c) Regeneración simultánea (Cación débil - Cación fuerte).

PASO	OPERACION UNIDAD DÉBIL MENTE ACIDA	OPERACION UNIDAD FUERTEMENTE ACIDA
1	- - -	Retrolavado No. 1
2	Retrolavado No. 1	- - -
3	Dilución de agua ácida 1 al 0.7%	Dilución de agua ácida a:
4	Solución ácida al 2% del catión fuer te.	Solución ácida al 2%
5	Solución ácida al 6% catión fuerte.	Solución ácida al 6%

6	Desplazamiento del catión fuerte	Desplazamiento Agua cruda (?) Agua tratada (?)
7	Enjuague rápido	Enjuague rápido del Cation débil
8	Retrolavado 2	- - -
9	- - -	Retrolavado 2
10	Enjuague rápido	Enjuague rápido

d) Regeneración Simultánea (Anión débil - Anión fuerte)

PASO	OPERACION UNIDAD DEBILMENTE BASICA	OPERACION UNIDAD FUERTEMENTE BASICA
1	- - -	Retrolavado 1
2	Retrolavado 1	- - -
3	- - -	Precalentamiento
4	- - -	Dilución sosa caustica
5	Solución sosa	Solución sosa al 4%
6	Desplazamiento	Desplazamiento
7	Enjuague rápido 1	Enjuague rápido 1
8	Retrolavado 2	- - -
9	Enjuague rápido 2	- - -
10	Servicio	Retrolavado 2
11	Servicio	Enjuague rápido 2
12	Servicio	Servicio

e) Regeneración lecho estratificado (Cación débil - Cación fuerte)

PASO	OPERACION
1	Retrolavado
2	Dilución de agua ácida
3	Solución de ácido 2%
4	Solución de ácido 4%
5	Solución de ácido 6%
6	Solución de ácido 8%
7	Desplazamiento de ácido
8	Enjuague rápido 1
9	Retrolavado
10	Enjuague rápido 2

f) Regeneración lecho estratificado (Anión débil/Anión fuerte)

PASO	OPERACION
1	Precalementamiento
2	Solución sosa 4% (Dilución)
3	Solución concentrada al 50%
4	Desplazamiento
5	Retrolavado (?)
6	Enjuague rápido
7	Servicio

g) *Regeneración lecho mixto (Cación/Anión)*

PASO	OPERACION
1	<i>Servicio</i>
2	<i>Retrolavado</i>
3	<i>Regeneración Cación (flujo ascen-- dente)</i>
4	<i>Regeneración Anión (flujo descen-- dente)</i>
5	<i>Enjuague lento</i>
6	<i>Drene</i>
7	<i>Mezcla con aire</i>
8	<i>Relleno</i>
9	<i>Enjuague rápido</i>

3.3 ESPECIFICACION GENERAL.

La descripción completa de un sistema de suavización o desmineralización en particular, deberá de ser resumida en una especificación la cual debe de contener los siguientes puntos:

1.0 Finalidad.- La especificación que se elabore deberá cubrir los requerimientos de:

- a) diseño
- b) equipo empleado
- c) materiales
- d) instrumentación
- e) tubería e interconexiones.

Que garanticen la correcta operación del sistema propuesto. Por lo que el presente capítulo indica los requerimientos mínimos a especificar para los equipos de intercambio iónico en el tratamiento de agua.

3.3.1.- Códigos aplicables.- Primeramente deberán de mencionarse aquellos códigos o estándares, aplicables en el diseño de estos sistemas:

- . Código ASME (performance test-codes) Ion Exchange Equipment.
- . Código ASME para recipientes que trabajan a presión sección VIII (American Society for Mechanical Engineers)
- . Bridas.- American National Standard Institute, sección B-16.5
- . Tuberia.- American National Standard Institute, sección - B 31.3
- . Barrenado y roscado.- American National Standard Institute, sección B 2.1
- . Tornillos y tuercas.- American National Standard Institute, sección B 1.4
- . Motores.- NEMA (National Electrical Manufacturers Association).

3.3.2.- Bases de diseño.- Las bases de diseño especificadas deberán contener la siguiente información como mínimo.

a) Agua del influente:

Origen del agua a ser tratada:

pozo

arlo

proceso.

- . Sistema de pretratamiento, (si es requerido).
- . Calidad del agua a ser tratada.- Este punto es importante-ya que es preferible tener datos de la composición del - - agua, de cuando menos los 3 últimos años, con el objeto de poder tomar una base para el cálculo. La composición del - agua a ser tratada al igual que los resultados de opera- - ción esperados deben ser registrados en el formato de la - tabla 4.1 (ver ejemplo del capítulo IV).
- . Temperatura normal/máxima.
- . Flujo de operación en g.p.m. (mínimo, normal y máximo).
- . Presión.
- . Investigar equipos similares operando con esta calidad de- agua.

b) Agua del efluente:

- . Especificación del agua requerida.
- . Presión.
- . Requerimientos de almacenamiento de agua tratada.

. Requerimientos futuros de la planta

c) Espacio disponible para la planta.

3.3.3. - Materiales de construcción.- El material del equipo, la tubería, y accesorios en general es de acero al carbón, la tabla siguiente indica el material recomendado.

COMPONENTES	ESPECIFICACION ASTM
RECIPIENTES	A-212, A283, A285 A, B o C
BOQUILLAS	A-53 G. B, ó A-106 G. B
BRIDAS	A- 105, A181 I o II
PERFILES	A-36
FALDONES	A-283
ESPARRAGOS Y	
TUERCAS	A-193 G B7, A194 Gr 2H
INTERIORES DE	
ACERO INOXIDABLE	A-264 Tipo 304
TUBERIA	A-106 B.

. En las bombas de transferencia de agua desmineralizada.

CARCAZA	IMPULSOR	FLECHA
MATERIAL S.S 316	S.S. 316	S.S. 316
A- 296	A-296	A-276

DESIGNACION Gr. CF-8M CF-8M 316 H.T

- . El material para recubrimiento en los sistemas de desmineralización, se emplea para evitar la corrosión principalmente en tanques y tuberías, por lo que es recomendable - utilizar recubrimiento de hule, siendo el espesor mínimo-recomendable de 1/8".
- . El equipo, los carretes de tubería y accesorios deberán - ser limpiados con chorro de arena, hasta dar una superficie libre de óxido, rebabas, humedad, aceite, y de alguna otra materia extraña para poder proceder a la aplicación-del recubrimiento.
- . La aplicación del recubrimiento deberá efectuarse inmediatamente después de ser limpiadas a chorro de arena las superficies, debido a que pueden volver a oxidarse, en cuyo caso la superficie, se requiere sea nuevamente limpiada - a chorro de arena.
- . El recubrimiento podrá ser instalado longitudinal o circonferencialmente, cementándose directamente a la superficie del metal, con un vulcanizado que suministre una superficie uniforme, sin poros ni bolsas de aire o gas entre las uniones del recubrimiento, o, entre el recubrimiento- y la superficie metálica.

3.3.4.- *Diseño y construcción.*- En el *diseño y construcción* se deberá de especificar lo siguiente por unidad:

- . Número de unidades
- . Diámetro
- . Altura en su parte recta
- . Espesor del cuerpo
- . Espesor de tapas
- . Código de diseño

Las unidades de intercambio iónico deberán, diseñarse, construirse, probarse y certificarse de acuerdo con el Código ASME sección VIII (última revisión).

Todos los materiales de construcción deberán de estar de acuerdo con las especificaciones ASTM.

- . Material Carbón A-285 G.C
- . Tipo de construcción Soldadura a doble tope

Todos los trabajos de soldadura deberán de estar de acuerdo con los estándares de la AWS (American Welding Society).

Las juntas de las envolventes y los cabezales deberán ser de penetración total, doble soldadura a tope. Las-

juntas de penetración total hechas con separador interior -- son permitidas únicamente en las juntas circunferenciales -- cercanas de recipientes sin entrada de hombre a excepción de recipientes que tengan menos de 24" de diámetro (en donde es imposible soldar por el interior), se pueden tener dos juntas cercanas usando separadores.

Las boquillas y coples deberán ser soldados al cuerpo o cabezales del recipiente, con soldaduras de penetración total.

Todas las soldaduras de los recipientes deberán ser radiografiadas tal como se indica en el párrafo VW-52 del Código ASME sección VIII. El seccionamiento no es permitido. Una segunda revisión de puntos, como indica al párrafo VW-52 del código ASME deberá de ser hecha cuando se considere necesario.

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| • Eficiencia de soldadura | 0.75 |
| • Presión de operación | Kg/cm^2 (psig.) |
| • Presión de diseño | Kg/cm^2 (psig.) |
| • Recubrimiento interior | Hule |
| • Espesor del recubrimiento | mm (in) |

- . Flujo normal de servicio por unidad Lpm (g.p.m)
- . Flujo máximo permisible Lpm (g.p.m.)
- . Capacidad neta entre regeneraciones Lts. (gal.)
- . Ciclo entre regeneraciones Horas
- . Resina de intercambio X
- . Capacidad neta de intercambio Kilogramos
- . Volumen total de resina ft^3
- . Altura del lecho mm (in)
- . Distribuidores: Cabezal con laterales, toberas de polipropileno
- . Material A.I. 316
- . Tuberia y conexiones principales: mm (in)
- . Material A.C.
- . Recubrimiento Hule mm (in)
- . Válvula Grinnell mm (in)

- . Tubercula de regeneración mm (in)
- . Material A.I. 316
- . Tubercula de venteo 25.4 mm
- . Material A.I. 316
- . Indicador de flujo:
- . Tipo Varenómetro en derivación.
- . Placa de orificio A.I. 316 mm (in)
- . Manómetros X
- . Cartula m.m (in)
- . Toma de muestra: m.m (in)
- . Material A.I. 316
- . Regenerante:
- . Nivel de regeneración Lb/ft³
- . Cabezal de entrada agua cruda mm (in)
- . Material A.C. Ced. X
- . Mirilla del tanque mm (in)

OPERACION	FLUJO (g.p.m)	TIEMPO (min.)	TOTAL (gal.)
Retrolavado	X	X	X
Regenerante	X	X	X
Desplazamiento	X	X	X
Enjuague	X	X	X

. Sistema de regeneración

. Regenerante

Tipo de regenerante

. Concentración

%

. Tanque de dña

Normalmente cilíndrico

. Tapas

Normalmente toriéricas

. Espesor cuerpo/tapas

mm (in)

. Diámetro

mm (in)

. Altura en su parte recta

mm (in)

. Volumen total

Lts. (gal)

. Peso aproximado en carga
total

Kg.

. Desecador para humedad:

. Material

Normalmente acrílico

• Empaque	Silica gel
• Indicador del nivel:	
• Tipo	Blindado
• Bombas para el regenerante	No.
• Marca	X
• Capacidad	lpm (g.p.m.)
• Presión de descarga	Kg/cm ² (lb/in. ²)
• Material de construcción	Hierro
• Motor	H.P./R.P.M.
• Características eléctricas	Volts/Hz.
• Tee de mezcla:	mm (in)
• Material	Fierro
• Recubrimiento	Teflon
• Válvula para la regeneración	Normalmente grinnell (Ø)
• Indicador de flujo	Normalmente Wallace and Tiernan
• Tipo	Directo
• Conductímetro	Marca

. Modelo	X
. Escala	X
. Válvula	mm (in)
. Material (para ácido y sosa)	Carpenter 20
. Indicador de flujo para agua de dilución.	Normalmente Wallace and Tiernan.
. Tipo	Vareómetro en derivación
. Modelo	X
. Tuberia para dilución	mm (in)
. Material	A.C. Ced. X
. Recubrimiento	Hule
. Marca	X
. Válvula de bloqueo	mm (in)

La construcción de este tipo de unidades ha sido mencionada en forma general, para un sistema de desmineraliza-
ción, sin embargo esta especificación debe de hacerse para -
cada una de las unidades catiónicas y aniónicas, así como pa

ra cada uno de los sistemas de regeneración ácida o básica.

- . Bombas de transferencia.- En las bombas de transferencia deberán de considerar una bomba más de relevo, siendo generalmente centrífugas.

Las bombas deberán de estar directamente acopladas al accionador, con cople y tubería auxiliar montadas en una base común de acero.

Los motores eléctricos deberán de estar de acuerdo a los estándares del NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Cubriendo los motores toda la curva de la bomba al impulsor de diseño.

- . Calentador de agua de dilución.- En el caso de que la regeneración deba llevarse a cierta temperatura se deberá especificar un calentador de agua de dilución, el cual deberá de estar diseñado de acuerdo con los estándares del (Tubular Exchangers Manufacturers Association) debiendo de ser probado de acuerdo con el código ASME.

Este calentador deberá de contar con todos los accesorios e instrumentos necesarios (Válvula de control de vapor, trampa, indicadores, etc).

- . Sistema y tablero de control.- En el caso de que el sistema sea automático, éste deberá de tener un tablero de control, el cual deberá de contener todos los controladores, interruptores, cronómetro, relevadores, pilotos, -- arranque y paro de las bombas, alarmas luminosas y sonoras, etc.

El tablero deberá cumplir con las especificaciones NEMA, será vertical, recto autosoportado tipo modular, con puertas laterales, herméticamente cerradas a prueba de polvo.

En el caso de la desmineralización el tablero de control contará con un programador, para regeneración de las unidades catiónicas y otro independiente para las unidades aniónicas. La duración de cada paso de la secuencia de regeneración será ajustable según se requiera, en cada paso se accionarán las válvulas correspondientes a cada fase.

El tablero de control deberá de estar ordenado de una manera lógica, agrupando en tal forma la instrumentación para que refleje individualmente cada sección del tratamiento de agua.

Todos los instrumentos que tengan suministro de ener

gla eléctrica en el tablero deberán de estar protegidos con fusibles de acuerdo a su capacidad y éstas se instalarán en una caja independiente con interruptor, luz piloto y fusible por cada instrumento que lo requiera con su debida identificación.

La principal instrumentación en sistemas de desmineralización que deberá de instalarse será:

- . Medidor de agua de alimentación, con indicador local y registrador de flujo, con alarma por alto flujo.
- . Indicador de flujo de agua a la unidad aniónica.
- . Indicador de flujo para aguas de dilución de sosa con interruptores para interlock por falla de agua y alarma por bajo flujo.
- . Medidor de conductividad con alarmas por alta y baja conductividad para cada sistema de inyección de regenerante.
- . Válvula de control de flujo a la salida de las unidades aniónicas con indicador controlador montado en tablero.
- . Medidores de conductividad a la salida de cada unidad aniónica con alarma por alta conductividad y registro de conductividad.
- . Analizadores de sodio a la salida de cada unidad catiónica.

ca y uno común en el cabezal general con alarma por alta concentración y registro.

- . Alarma por excesivo tiempo de enjuague en unidades catiónicas y aniónicas.
- . Alarma por excesivo tiempo de retrolavado en unidades catiónicas y aniónicas.
- . Alarma por alta carga de presión en unidades catiónicas y aniónicas.
- . Alarma por alta temperatura de solución de ácido.
- . Alarma por paro de bombas a unidades aniónicas.

Cada una de las condiciones de alarmas señaladas deberá ser anunciada visualmente y audible, y con un botón para silenciar alarma, pero permanecerá como indicación visual en el tablero hasta que la condición de alarma sea eliminada.

Un botón de prueba deberá permitir la prueba simultánea de todos los indicadores visuales.

El enjuague final de un tren regenerado deberá de ser determinado por la señal de conductividad y con un cronómetro corriendo simultáneamente, deberá de alarmar cuando ---

el enjuague haya sido excedido un límite razonable de tiempo.

- . Caja de solenoides.- Todas las cajas de solenoides serán del tipo NEMA 4, montadas en sus respectivos patines con puertas que abran hacia el frente. Cada solenoide deberá tener placa permanente de identificación, clave, marca, - tipo, modelo, etc. así como sus respectivas conexiones, - neumáticas.

Trampas de resinas.- El sistema deberá de contar con - - trampas de resina para prevenir su pérdida, las cuales se colocarán en el efluente de salida y en las líneas de re- trolavado. La trampa se recomienda sea construída para - el sistema de desmineralización de acero inoxidable 316 - tipo cónico con agujeros de 1/4" y recubrimiento con una - tela de alambre de 16 mallas y una tela de 40 (para el re trolavado) y una tela de 60 mallas (para el servicio).

Además se deberá contar con una válvula de purga de - 1 1/2" de acero inoxidable corriente arriba de cada trampa, - para poder eliminar el taponamiento con una resina, cada uni dad iónica, deberá tener un control diferencial para alarmar por alta carga de presión en el efluente y poder detectar -- pérdidas de resina.

- . Tubería de interconexión y válvulas:

Número	X
Tipo	Normalmente Saunders o -- equivalente.
Fabricante	Grinnell o equivalente
Tamaño	X
Recubrimiento	Hule.
Material del diafragma	Hypalon
Operación	Automática con señal neumá- tica.

Válvulas manuales.- Las válvulas manuales requeridas son: Válvulas de bloqueo a la entrada y salida de cada unidad, válvulas de bloqueo a la succión y descarga de bombas, y válvulas de muestreo.

Válvulas de desvío para las válvulas de control.

Válvulas de retención en los sistemas de regeneración de ácido y sosa para sistemas de desmineralización.

. Desgasificador.- La finalidad del desgasificador es la remoción del bióxido de carbono del efluente de las unidades catiónicas, con el fin de disminuir la carga a las -- unidades aniónicas.

Este tipo de aereadores, consiste en una estructura cerrada, generalmente cilíndrica, pero puede presentarse en forma rectangular o cuadrada. El agua entra por la parte superior en la que por medio de un distribuidor se reparte sobre toda la superficie, fluyendo hacia abajo a través de una serie de tablillas o sección empacada. En la parte inferior el agua pasa al depósito a través de un sello hidráulico.

El aire se proporciona al aereador mediante un ventilador, cuya entrada se coloca en la parte inferior del aparato, la salida del aire y las sustancias eliminadas se hacen por la parte superior descargando directamente a la atmósfera.

Características: Las dimensiones de estos equipos estandar condicionadas a obtener un contenido de gases en el efluente no mayor de 10 p.p.m. de CO_2 .

El tipo de empaque puede ser variado, en general su función es proporcionar una gran superficie de contacto. La altura empacada depende del diseño y del tipo de empaque, los materiales más usados de empaque son anillos raschig.

Los materiales de construcción más usados en el cuerpo del desgasificador son: acero inoxidable o acero al carbón recubierto con hule.

El tanque recolector puede o no formar parte integral del desgasificador, pero generalmente se incluye dentro del sistema de desgasificación, pudiendo tener un tiempo de retención de 15-30 min.

Accesorios:

- a) Válvula de drenado.- Esta es colocada en la parte inferior abajo del nivel del sello de aire que permite poder controlar y evitar inundaciones en el desgasificador.
- b) Venteo.- Este permite el escape del aire y los gases removidos, puede ser tubular o cónico.
- c) Sistema de control.- Puede ser de varios tipos, el más sencillo, es un control de nivel mediante una válvula de flotador, en el tanque recolector que controla el flujo de agua de entrada para evitar inundaciones.
- d) Ventiladores.- El desgasificador deberá contar con dos ventiladores ambos accionados por motor eléctrico, cada ventilador deberá de ser diseñado para el 100% de la capacidad requerida y uno será repuesto del otro.

Las aspas de los ventiladores deberán ser balanceadas estática y dinámicamente.

Los ventiladores serán diseñados y fabricados de -- acuerdo con el código NFMA (National Fan Manufacturers Association) última revisión y deberán ser probados de acuerdo con el código ASME.

e) Motores.- Los motores del ventilador deberán estar de -- acuerdo a los estándares del NEMA y cubrir toda la curva del ventilador.

El presente capítulo cubre los requerimientos mínimos para especificar un sistema de desmineralización, el -- cual en sí, es el proceso más representativo del tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico; en lo referente al proceso de suavización, la diferencia principal -- radica en los materiales de recubrimiento del equipo, tubería, e instrumentos que manejan agua desmineralizada por lo que, lo anteriormente expuesto puede tomarse como base para especificar un sistema de suavización.

C A P I T U L O I V
 PROCEDIMIENTO DE CALCULO GENERAL EN SISTEMAS
 DE SUAVIZACION Y DESMINERALIZACION

4.1 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 g.p.m./ft² de área de las unidades de intercambio, en el pasado fue limitada a 6 g.p.m./ft² cuando las unidades operaban en batería, y 8 g.p.m./ft² cuando una unidad estaba siendo regenerada.

Actualmente la velocidad se incrementó de 8 a 10 g.p.m./ft² con todas las unidades operando en batería y de 12 a 15 g.p.m./ft² con una unidad fuera.

Las unidades secundarias o pulidoras pueden operar a altas velocidades superficiales de 15 a 25 g.p.m. y en lechos mixtos para tratamiento de condensados las unida-

des son diseñadas para velocidades superficiales de 50 - g.p.m./ft².

- c) El tiempo de servicio o ciclo de operación especificado en el pasado era de 24 hrs. 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 hrs. satisfactoriamente.

El cálculo final de las unidades involucra las operaciones de retrolavado, regeneración, desplazamiento (enjuague lento) y enjuague final (enjuague rápido) de los -- cuales se deberá de especificar el flujo en g.p.m. 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 hace en base a ciertos flujos recomendados, el cuadro siguiente indica los -- criterios de diseño empleados:

CONDICIONES GENERALES DE OPERACION RECOMENDADOS
EN SISTEMAS DE SUAVIZACION Y DESMINERALIZACION

SUAVIZACION.

OPERACION	FLUJO RECOMENDADO	TIEMPO (min.)
Retrolavado gpm/ft ³	nota 1	10-15
Regeneración gpm/ft ³	.5 - 1.5	nota 3
Enjuague gpm/ft ³	nota 5	nota 5

DESMINERALIZACION

OPERACION	FLUJO RECOMENDADO Cación / anión	TIEMPO (min.)
Retrolavado gpm/ft ³	5-6 / 3-5	10/25-30
Regeneración gpm/ft ³	0.5-0.75 / 0.25	nota 3
Desplazamiento gpm	nota 2	nota 2
Enjuague gpm/ft ²	5-6 / 5-6	nota 4

NOTAS

- 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 g.p.m. 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 (ver ejemplo).
 - 3.- El tiempo de regeneración deberá de ser calculado de acuerdo al flujo de regenerante recomendado (ver ejemplo). El tiempo empleado para la regeneración normalmente es de 45-60 min.
 - 4.- El tiempo de enjuague rápido será calculado de acuerdo a el requerimiento de volumen de agua y a la velocidad superficial recomendada (ver ejemplo)
 - 5.- En los sistemas de suavización, los requerimientos de enjuague son determinados en base a la dureza residual del efluente, como se observa en la figura 4.4. del apéndice (ver ejemplo).
- d) En los sistemas de regeneración convencional (flujo descendente) en las unidades catiónicas es conveniente rege

nerar de la forma siguiente para evitar precipitación de CaSO_4 :

Calcio en el influente (%)	H_2SO_4 %
Ca \geq 50	1.3
20 < Ca < 50	1.5
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°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 min.
- g) El sistema de regeneración a contracorriente en las unidades catiónicas, se emplea para reducir las fugas de sodio a aproximadamente 0-2 p.p.m. En este caso se recomienda eliminar la operación de retrolavado para evitar mezclar la banda de calcio y tener precipitación de CaSO_4 .
- h) Los sistemas es conveniente diseñarlos con varios trenes para que en el momento que unos trabajen otros se estén regenerando.

- i) Cuando se emplea el sistema de lecho estratificado (strat bed) o sea que las resinas débilmente básicas y fuertemente básicas están en el mismo recipiente, se deberá 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%.

4.2. PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

El procedimiento de cálculo a seguir en los procesos de suavización y desmineralización, básicamente es el mismo con algunas variantes, por lo que primero se indicarán algunas consideraciones generales y posteriormente se hará referencia a un ejemplo en particular de cada uno de estos procesos.

- a) El efluente establecerá la fuga de cationes (dureza en el caso de suavización) y aniones permisibles, lo cual determinará el nivel requerido de regenerante (lb/ft^3 re

sina de NaCl, H_2SO_4 ó NaOH.

- b) Del análisis de diseño del influente se calcula la proporción de sodio en por ciento del total de cationes, altos porcentajes de sodio incrementan la fuga de cationes y requieren altos niveles para disminuir esta fuga.
- c) En la misma forma, es calculada la proporción de alcalinidad en por ciento del total de cationes; bajos porcentajes de alcalinidad también incrementan la fuga de cationes y el nivel requerido de ácido.
- d) Altos porcentajes de sílice incrementan la fuga de sílice y el nivel de regeneración requerido, la proporción de sílice en por ciento del total de cationes sólo es de manera figurada.
- e) La proporción de ácidos débiles (carbónico y silico) en por ciento del total de aniones es entonces estimada.
- f) Una vez que los niveles de regeneración han sido seleccionados de acuerdo a lo señalado, la capacidad de la resina es tomada de la tabla ó gráfica correspondiente. Las capacidades de las resinas normalmente son expresadas en kilogramos de iones removidos por pie cúbico de resina (kgr/ft^3).
- g) El total de kilogramos a ser removidos por la resina es-

igual al producto de los galones de agua a tratar, entre regeneraciones por el total de gr./gal. del total de cationes o aniones.

- h) El cálculo final involucra los siguientes pasos: Retrolavado, dilución del regenerante y dosificación, desplazamiento (enjuague lento) y enjuague final (enjuague rápido), lo cual incluye el flujo de regenerante y agua en galones por minuto, la duración en minutos, y el total de galones de agua requerida para cada uno de los pasos. Esto determinará el tamaño de la tubería, válvulas y bombas para regeneración.
- i) En los sistemas de desmineralización, la unidad aniónica es diseñada primeramente y después la unidad catiónica, la razón de esta operación, es que: la unidad catiónica necesita suministrar el agua para regeneración de la unidad aniónica, y este gasto necesita ser incluido en el cálculo de la unidad catiónica.

4.3. EJEMPLOS:

Suavización.- Se desea diseñar un sistema de tratamiento de agua, para proporcionar agua suavizada en la producción de textiles, para lo cual se requiere una calidad de

agua con una dureza no mayor de 10 p.p.m. como CaCO_3 , y un gasto de 200 g.p.m. a 120°F . La composición del agua a tratar es la siguiente:

Cationes	mg/l como CaCO_3	Aniones	mg/l como CaCO_3
Na^+	171.0	HCO_3^-	83.9
Ca^{2+}	174.4	Cl^-	231
Mg^{2+}	165.8	SO_4^{2-}	171
Fe^{2+}	3.4	NO_3^-	30.4
Mn^{2+}	1.7	F^-	-

Dureza Total: $174.4 + 165.8 + 3.4 + 1.7 = 345.3$ idem mg/l.

La resina que se recomienda para llevar a cabo al -- proceso de suavización es una resina fuertemente ácida en su forma sodio.

1.- Calidad requerida en el efluente:

Dureza no mayor de 10 p.p.m. como CaCO_3

2.- Selección del nivel de regeneración:

En los sistemas de suavización el nivel de regeneración, además de estar en función de las fugas de dureza, está en función de la relación de sodio/calcio y de la concentración de éstos en el influente.

La relación de sodio/calcio es importante ya que si esta relación aumenta el nivel de regeneración es menor y disminuye la capacidad de la resina.

Por lo tanto se tiene.

$$\text{Relación sodio/calcio} = \frac{171.0}{174.0} = 0.98 \quad 1$$

Concentración de sodio y calcio en el influente =

$$\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} = 171 + 174.0 = 345.0 \text{ p.p.m.}$$

De la figura 4.2. con los datos anteriores, se obtiene un nivel de regeneración de 2.0 lb NaCl/ft³ de resina.

3.- Con el nivel de regeneración se obtiene la capacidad de la resina de la figura 4.1.

$$\text{Capacidad de la resina} = 11 \text{ Kgr/ft}^3$$

4.- Area requerida.- Para una velocidad de 10 g.p.m.
/ft².

$$\text{Area requerida} = \frac{200 \text{ g.p.m.}}{10 \text{ g.p.m./ft}^2} = 20 \text{ ft}^2$$

5.- Considerando 2 regeneraciones/día; para cada unidad.

$$\frac{200 \text{ g.p.m.} \times 1440 \text{ min.}}{2 \text{ unidades} \times 2 \text{ regeneraciones}} = 72000 \text{ gal/unidad}$$

6.- Dureza total a remover.

$$72000 \times 20.19 \text{ gr/gal.} = 1454 \text{ Kgr.}$$

7.- Volumen de resina a emplear.

$$\text{Volumen} = \frac{1454 \text{ Kgr.}}{11 \text{ Kgr./ft}^3} = 132 \text{ ft}^3 \text{ de resina.}$$

8.- Altura requerida de lecho:

$$h = \frac{132 \text{ ft}^3}{20 \text{ ft}^2} = 6.6 \text{ ft}$$

9.- Altura requerida del tanque:

En las operaciones de retrolavado y regeneración el lecho de resina sufre una expansión, por lo que el tanque deberá de estar diseñado para esta condición.

Generalmente se considera de un 50 a un 75% de expansión:

Altura del tanque = Profundidad de lecho x factor de expansión = $6.6 \text{ ft} \times 1.70 = 11.2 \text{ ft}$

10.- Calda de presión:

La calda de presión, es una función de la velocidad superficial y de la temperatura de el agua.

De la figura No. 4.5 se obtiene la calda de presión por pie de resina, para una $T = 120^\circ\text{F}$.

$$P = 0.48 \text{ psi} \times 6.6 \text{ ft} = 3.1 \text{ psi}$$

11.- Flujo de retrolavado.- Como ya se mencionó, antes de proceder a la regeneración es necesario retrolavar, para aflojar el lecho de la resina. Las velocidades recomendadas para esta operación deberán ser tales que ocasionen una expansión de la resina del 50 al 75%. El tiempo de retrolavado recomendado es de 10 - 15 min.

De la figura No. 4.3 de acuerdo a la consideración anterior y a la temperatura de 120°F se tiene un flujo de retrolavado igual a 10 g.p.m./ft^2 .

$$\begin{aligned} \text{Flujo de retrolavado} &= 10 \text{ g.p.m./ft}^2 \times 20 \text{ ft}^2 \\ &= 200 \text{ gal/min.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen total de retrolavado} &= 200 \text{ gal/min} \times 10 \text{ min} \\ &= 2000 \text{ gal.} \end{aligned}$$

12.- El propósito de la operación de enjuague es eliminar el regenerante residual, el flujo de enjuague, estará, en función del nivel de regeneración obtenido y de las fugas de dureza. De la figura No. 4.9, se obtiene un flujo de enjuague de 12 gal/ft^3 .

$$\text{Flujo de enjuague} = \frac{12 \text{ Gal}}{\text{ft}^3} \times 132 \text{ ft}^3 = 1584 \text{ gal}$$

tomando una velocidad superficial de enjuague de 6 gal/min/ft^2 y el área = 20 ft^2

$$\text{Gasto} = 6 \text{ gal/min/ft}^2 \times 20 \text{ ft}^2 = 120 \text{ gal/min.}$$

$$\text{Tiempo de enjuague} = \frac{1584 \text{ gal}}{120 \text{ gal/min}} = 13.2 \text{ min.}$$

DESMINERALIZACION.- Se desea diseñar un sistema para proporcionar agua desmineralizada a una caldera a 1500 lb/in^2 , las bases de diseño especificadas para este sistema son las siguientes.

1.0 Bases de diseño.

1.1 El origen del agua será de pozo, por lo que la composición del agua es constante.

1.2 No requiere de pretratamiento alguno.

1.3 El análisis del agua a tratar se indica en la tabla 4.1 de resultados de operación esperados, al igual -- que la calidad requerida en el influente para calderas de -- 1500 lb/in².

1.4 Para esta presión se requiere de 0.1 p.p.m. de sílice como CaCO₃ y un total de sólidos disueltos de 2-3 p.p.m. (ver cuadro 3.1).

1.5 De acuerdo con la tabla 3.4, se recomienda, tener una concentración permisible en el agua de calderas de 2 - 3 p.p.m. de sílice. Este valor puede ser verificado en la figura 5.3 de relación de distribución:

$$R = \frac{\text{Sílice en el vapor}}{\text{Sílice en el agua}}$$

Para una caldera que opere a 1500 psig. es necesario limitar el valor de sílice en el vapor a niveles mínimos de 0.02 p.p.m. como CaCO₃. De la figura 5.3 se tiene un valor de R= 0.01 para un pH de 9, por lo tanto el valor de sílice en el agua de calderas será:

$$\text{Sílice en el agua} = \frac{0.02}{0.01} = 2 \text{ p.p.m.}$$

TABLA 4.1

RESULTADOS DE OPERACION ESPERADOS

- 1.- Agua cruda
- 2.- Efluente catión débil
- 3.- Efluente catión fuerte
- 4.- Efluente del desgasificador.

Partes por millón (ppm) como CaCO_3

Substancia	simbolo	1	2	3	4	
CATIONES	Calcio.....	Ca + +	221	5	0	0
	Magnesio.....	Mg + +	177	6	0	0
	Sodio.....	Na + +	495	495	99	99
	Hidrógeno.....	H. +	-	0	407	407
	Cationes Totales.....		893	506	506	506
ANIONES	Bicarbonatos	HCO_3	387	0	0	0
	Carbonatos	CO_3	-	0	0	0
	Hidróxidos Alcalinidad	OH^-	-	0	0	0
	Fosfatos	PO_4	-	0	0	0
	Cloruros.....	Cl -	254	254	254	254
	Sulfatos.....	SO --	252	252	252	252
	Nitratos.....	NO_3^-	0	0	0	0
	Aniones Totales.....		893	506	506	506
	Dureza Total.....		309	0	0	0
	Alcalinidad A (Anaranjado de Metilo)		387	0	0	0
Alcalinidad B (Fenolftaleína).....		0	0	0	0	
Dureza No Carbonatada.....		11	11	11	11	
Alcalinidad de Sodio.....		0	0	0	0	
		ppm	ppm	ppm	ppm	
Bióxido de Carbono..	CO_2	64	414	412	12	
Silice.....	SiO_2	70	70	70	70	
Hierro.....	Fe	0	0	0	0	
Turbidez.....		0	0	0	0	
Color.....		0	0	0	0	
Sólidos Totales Cationes + SiO_2						
pH			5	5	5	
.....						
.....						

TABLA 4.1

RESULTADOS DE OPERACION ESPERADOS

- 5.- Efluente catión débil
- 6.- Efluente lecho mixto

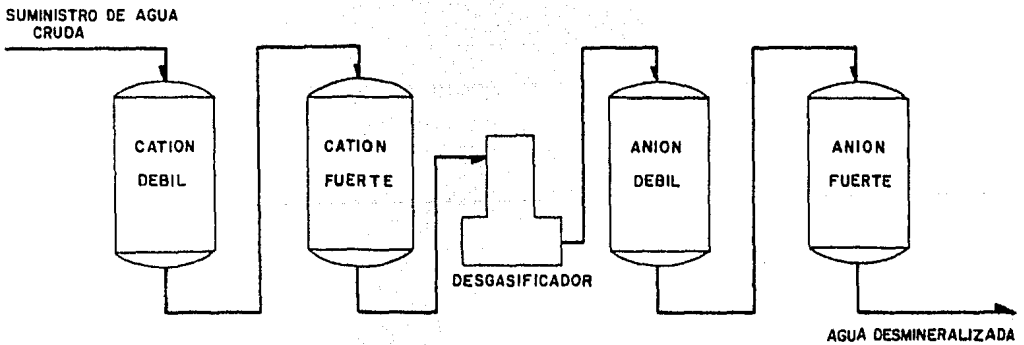
Partes por millón (ppm) como CaCO₃

Substancia		Simbolo	5	6	
CATIONES	Calcio.....	Ca + +	0		
	Magnesio.....	Mg + +	0		
	Sodio.....	Na +	1		
	Hidrógeno..Acidez...	H +	0		
Cationes Totales.....			1	0.01	
ANIONES	Bicarbonatos	HCO ₃	0		
	Carbonatos	CO ₃	0		
	Hidróxidos Alcalinidad	OH ³ -	0		
	Fosfatos	PO ₄ ---	0		
	Cloruros.....	Cl -	1		
	Sulfatos.....	SO ₄ --	0		
	Nitratos.....	NO ₃ -	0		
	Aniones Totales.....			1	0.01
	Dureza Total.....			0	
	Alcalinidad A (Anaranjado de Metilo)			0	
Alcalinidad B (Fenolftaleina)....			0		
Dureza No Carbonatada.....			0		
Alcalinidad de Sodio.....			0		
			ppm	ppm	
Bióxido de Carbono.. CO ₂			0		
Sílice..... SiO ₂			0.01	0.001	
Hierro..... Fe			0		
Turbidez.....			0		
Color.....			0		
Sólidos Totales Cationes + SiO ₂			-		
pH			6-7	± 7	
.....					
.....					

El cual concuerda con el valor recomendado en la tabla 1.12.

1.6 El sistema recomendado para tratar este tipo de agua, y obtener la calidad del efluente deseado, como se observa en el cuadro 3.1 (selección de arreglos combinados de tratamiento de agua por medio de intercambio iónico) es el siguiente:

Arreglo propuesto:



Este arreglo permitirá disminuir la carga al catión- y al anión fuerte, eliminando la alcalinidad y la acidez mineral libre, respectivamente, por lo que se tendrá un ahorro en el regenerante. El sistema se calculará primero colocando ambas resinas en un recipiente, y como alternativa por se parado cada una.

1.7 Flujo de agua a tratar:

Flujo normal de operación	=	1500 g.p.m.
Flujo normal por tren	=	500 g.p.m.
Flujo máximo esperado	=	2250 g.p.m.
Flujo de diseño	=	750 g.p.m.

(Por tren, cuando otro se esté regenerando)

Número de unidades propuestas:

3 trenes catiónicos
3 trenes aniónicos

1.8 Temperatura de operación nor./max.

95/120°F.

2.0 PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Se usarán tres trenes operando normalmente a 10 g. -

p.m./ft², cuando un tren se regenera los dos restantes estarán operando a 12 g.p.m./ft².

Flujo por unidad máximo = 750 g.p.m.

$$\text{Area mínima} = \frac{750}{12} = 62.5 \text{ ft}^2$$

Horas entre regeneraciones/ciclo = 8 hrs.

Volúmen de agua a tratar por unidad/corrida

$$V = \frac{2250 \times 1440}{3 \text{ Unidades} \times 3 \text{ Regeneraciones}} = 360,000 \text{ Gal.}$$

UNIDAD ANIONICA

Aniones por remover:

$$\text{Aniones fuertes} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$$

$$(\text{como CaCO}_3) = 254 + 252 + 0 = 506 \text{ p.p.m.}$$

$$\text{Aniones débiles} = \text{HCO}_3^- + (\text{HSiO}_3)^-$$

$$= 12 + 70$$

$$= 82 \text{ p.p.m.}$$

Capacidad de la resina fuertemente básica.

$$\% \text{ SO}_4 = \frac{252}{588} = 0.43$$

$$\% \text{ Cl}^- = \frac{254}{588} = 0.43$$

$$\% \text{ HCO}_3 = \frac{12}{588} = 0.02$$

$$\% \text{ SiO}_2 = \frac{70}{588} = 0.12$$

Temperatura de regeneración = 120°F.

Fugas de sílice requerida = 0.1 p.p.m. como CaCO_3 -- de la figura 4.6 para una temperatura de 120°F con un nivel de regeneración de 10 lbNaOH/ft³ se obtiene la fuga de sílice requeridas de 0.1 p.p.m.

De la figura 4.7 se calcula la capacidad total por -- componentes:

$$\text{SiO}_2 - \text{Cl} \quad \% \quad 12.8 \times 0.43 = 5.16$$

$$\text{SiO}_2 - \text{SO}_4 \quad \% \quad 14 \times 0.43 = 6.02$$

$$\text{SiO}_2 - \text{HCO}_3 \quad \% \quad 16 \times 0.32 = 0.32$$

$$\text{SiO}_2 - \quad \% \quad 14.8 \times 0.12 = \underline{1.77}$$

Capacidad = 13.27 Kgr/ft³.

La capacidad de la resina débilmente básica se obtiene de la figura 4.11 para un flujo de 2 g.p.m./ft³ y un - - pie³ de resina, obteniendo un valor de 18 Kg/ft³ de resina - a 2.7 lb NaOH/ft³

$$\text{Total de aniones a remover} = \frac{588 \text{ p.p.m.}}{17.1 \text{ p.p.m./gr/gal}} = 34.4 \text{ gr/gal}$$

$$360000 \text{ gal} \times 34.4 \text{ gr/gal} = 12384 \text{ Kgr.}$$

$$\text{Relación anión fuerte} = \frac{2 \text{ AD}}{2 \text{ AD} + \text{AF}} \times 100$$

$$\% \text{ Aniónica fuerte} = \frac{2 \text{ aniones débiles}}{2 \text{ aniones débiles} + \text{aniones fuertes}} =$$

x 100

$$= \frac{2 \times 82}{(2 \times 82 + 588)} \times 100 = 21.8\%$$

$$\% \text{ de resina aniónica débil} = 100 - 21.8 = 78.2\%$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad total combinada} &= 13.2 \times .18 + 18 \times 0.782 \\ &= 16.5 \text{ Kgr/ft}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volúmen de resina requerido} &= \frac{12384 \text{ Kgr}}{16.5 \text{ Kgr./ft}^3} = 750 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de resina fuertemente b\u00e1sica} &= 750 \text{ ft}^3 \\ &\times 0.218 \\ &= 163 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de resina d\u00e9bilmente b\u00e1sica} &= 750 \text{ ft}^3 \times \\ &0.782 \\ &= 586 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

ALTERNATIVA I

Consumo de regenerante cuando las resinas esten en recipientes separados: La sosa c\u00e1ustica primero se introducir\u00e1 al an\u00edon fuerte y posteriormente al an\u00edon d\u00e9bil.

$$\begin{aligned} \text{NaOH requerida, por regeneraci\u00f3n} &= 163 \text{ ft}^3 \times \frac{10 \text{ lb NaOH}}{\text{ft}^3} \\ \text{de la resina fuertemente b\u00e1sica} & \\ &= 1630 \text{ lb NaOH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NaOH estequiom\u00e9trica requerida:} &= 163 \text{ ft}^3 \times 16.5 \text{ Kgr}/\text{ft}^3 \\ &= 2689 \text{ Kgr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{2689 \text{ Kgr}}{7 \text{ Kgr./}} &= 384 \text{ lb NaOH} \\ & \text{1 lb NaOH} \end{aligned}$$

$$\text{Exceso de sosa} = 1630 - 384 = 1246 \text{ lb NaOH}$$

$$\begin{aligned} \frac{384 \text{ lb NaOH}}{163 \text{ ft}^3} &= 2.35 \frac{\text{lb NaOH}}{\text{ft}^3} \quad (\text{esteom\u00e9trica}) \end{aligned}$$

$$\text{NaOH anión débil} = 586 \text{ ft}^3 \times 2.7 \frac{\text{lb NaOH}}{\text{ft}^3}$$

$$= 1582 \text{ lb NaOH}$$

$$\text{NaOH requerida total} = 1582 + 384 = 1966 \text{ lb NaOH}$$

$$\text{Nivel de regeneración total} = \frac{1966}{750}$$

$$= \frac{2.6 \text{ lb NaOH}}{\text{ft}^3}$$

Consumo de NaOH por volumen unitario de agua tratada

$$\frac{1966 \text{ lb NaOH}}{360} = \frac{5.46 \text{ lb NaOH}}{1000 \text{ gal}}$$

ALTERNATIVA II

Cuando las resinas se encuentran en el mismo recipiente, la regeneración se efectuará al mismo tiempo para las dos resinas.

$$\text{Volumen total de resina} = 684 \text{ ft}^3$$

$$\text{Area superficial} = 62.5 \text{ ft}^2$$

Se recomienda una altura mínima de cama 2 ft para --
evitar canalizaciones, por lo tanto:

$$\begin{aligned}\text{Volumen anión fuerte} &= 2 \text{ ft} \times 62.5 \text{ ft}^2 \\ &= 125 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volumen del anión débil} &= \frac{12384 \text{ Kgr.} - 125 \text{ ft}^3 \times 13.2 \text{ Kgr./ft}^3}{18 \text{ Kgr./ft}^3} \\ &= 596 \text{ ft}^3\end{aligned}$$

	%
Volumen total de resina = 596	0.82
<u>125</u>	<u>0.18</u>
721	100%

$$\begin{aligned}\text{Nivel de regeneración} &= 10 \times 0.18 + 2.7 \times 0.8 \\ &= 4.0 \text{ lb NaOH/ft}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Sosa cáustica requerida} &= 4.0 \frac{\text{lb NaOH}}{\text{ft}^3} \times 721 \text{ ft}^3 \\ &= 2884 \text{ lb NaOH}\end{aligned}$$

Consumo de NaOH por volumen unitario de agua tratada:

$$\begin{aligned}&= \frac{2884}{360} = \frac{8.0 \text{ lb NaOH}}{1000 \text{ gal.}}\end{aligned}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos:

Sosa consumida alternativa I = $\frac{1966 \text{ lb NaOH}}{\text{corrida}}$

Sosa consumida alternativa II = $\frac{2884 \text{ lb NaOH}}{\text{corrida}}$

Diferencia = $\frac{918 \text{ lb NaOH}}{\text{Servicio}}$

En base a esta consideración, se selecciona la alternativa I.

a) Retrolavado.

La velocidad superficial recomendada para este servicio es de 3 a 5 gal/min/ft².

Aniónica fuerte: 3 g.p.m. x 62.5 ft² = 187.5 g.p.m.

Aniónica débil: 3 g.p.m. x 62.5 ft² = 187.5 g.p.m.

Tiempo = 25 minutos cada unidad

Volumen de agua:

(A.F.) 187.5 x 25 = 4687 gal.

(A.D.) 185.5 x 25 = 4687 gal.

b) Agua de dilución sosa cáustica.

La sosa consumida en la alternativa I fue de 1966 lb NaOH
corrida

4% de sosa cáustica contiene 0.348 lb/gal

40% de sosa cáustica contiene 4.77 "

50% de sosa cáustica contiene 6.364 "

$$\text{Solución al 4\% total a} = \frac{1966 \text{ lb}}{0.348 \text{ lb/gal}} = 5649 \text{ gal}$$

$$\text{Solución al 40\% total b} = \frac{1966 \text{ lb}}{4.77 \text{ lb/gal}} = 412 \text{ gal}$$

$$\text{Agua de dilución (a-b)} = 5649 - 412 = 5237$$

El tiempo recomendado para la regeneración es de 45
a 60 minutos:

$$\text{Flujo de regenerante recomendado} = 0.25 \text{ gal/min/ft}^3$$

$$\text{Flujo} = \frac{0.25 \text{ g.p.m.}}{\text{ft}^3} \cdot x 586 \text{ ft}^3 = 146 \text{ g.p.m.}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{5649 \text{ gal}}{146 \text{ gal/min}} = 38 \text{ min.}$$

$$\text{Flujo de agua de dilución} = \frac{5237 \text{ gal}}{38 \text{ min}} = 137 \text{ g.p.m.}$$

Flujo volumétrico por unidad, de acuerdo a el volumen de cama calculado en la alternativa I.

$$(A.F.) = \frac{146 \text{ g.p.m.}}{163 \text{ ft}^3} = 0.89 \text{ g.p.m./ft}^3$$

$$(A.D.) = \frac{146 \text{ g.p.m.}}{586 \text{ ft}^3} = 0.24 \text{ g.p.m./ft}^3$$

c) Desplazamiento: El flujo empleado es el mismo - que en la regeneración.

$$\text{Volumen de cama} = 750 \text{ ft}^3 \times \frac{7.48 \text{ gal}}{1 \text{ ft}^3}$$

$$= 5610 \text{ gal}$$

$$\text{Flujo} = 146 \text{ gal/min}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{5610 \text{ gal}}{146 \text{ gal/min}} = 39 \text{ min} = 40$$

Enjuague rápido: Para este servicio se recomienda - una velocidad de flujo superficial de 5 a 6 g.p.m./ft².

$$62.5 \times \frac{6 \text{ g.p.m.}}{\text{ft}^2} = 375 \text{ g.p.m.}$$

El volumen recomendado de enjuague es de 75 a 100 gal/ft³ por lo tanto:

$$75 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3} \times 750 \text{ ft}^3 = 56250 \text{ gal.}$$

$$\text{Tiempo requerido} = \frac{56250}{375} = 150 \text{ min}$$

RESUMEN DE RESULTADOS: UNIDAD ANIONICA

Operación	flujo (g.p.m.)	tiempo (min).	volumen (gal)
Contralavado y precalentamiento	375	25	9374
Introducción regenerante	146	38	5649
Desplazamiento	146	40	5610
Enjuague rápido	375	150	<u>56250</u>
			76883

En lugar de descargar los 56250 gal de enjuague a el drenaje, puede ser recirculada la mitad a la entrada de la - unidad catiónica.

% de consumo de agua tratada:

a) Sin recirculación $76883/360000 \times 100 = 21\%$

b) Con recirculación $48758/360000 \times 100 = 13.5\%$

UNIDAD CATIONICA

Agua a tratar por unidad = 360000 gal

Agua para regenerar unidad = 48758 gal

aniónica

Total = 408758 gal

Catión fuerte:

Cationes por remover = 506 p.p.m. = 29.59 g.p.g.

17.1 p.p.m./lgr/gal.

Capacidad requerida en Kilogramos = 408758 x 29.59

= 12095149 Kgr.

Capacidad de la resina:

$$\% \text{ Na}^+ = \frac{495}{506} = 0.97$$

$$\% \text{ Alcalinidad} = \frac{0}{506} = 0$$

$$\% \text{ Fuga de cationes} = \frac{99}{506} \times 100 = 19.57 \%$$

En la figura 4.8 se observa que un nivel de regeneración de 10 lb $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{ft}^3$ será suficiente para mantener la fuga de cationes permisibles. En base a este nivel de regeneración de la figura 4.9 obtenemos una capacidad de la resina de 22 Kgr/ ft^3 .

$$\text{Volumen de resina} = \frac{408758 \text{ gal} \times 0.29 \text{ Kgr/gal}}{22 \text{ Kgr}/\text{ft}^3} = 538 \text{ ft}^3$$

$$\text{Consumo de } \text{H}_2\text{SO}_4 = 538 \text{ ft}^3 \times \frac{10 \text{ lb}}{\text{ft}^3} = 5380 \text{ lb}$$

$$\text{Consumo estequiométrico} = \frac{11853 \text{ Kgr}}{7 \text{ Kgr/lb}} = 1694 \text{ lb}$$

$$\text{Como } \text{H}_2\text{SO}_4 = 1694 \times \frac{0.98^*}{0.98^{**}} = 1694 \text{ lb}$$

* Factor para convertir CaCO_3 a H_2SO_4

** Acido al 98% de concentración.

$$\text{Exceso de ácido} = 5380 - 1694 = 3686 \text{ lb.}$$

$$\text{Altura de cama} = \frac{538 \text{ ft}^3}{62.5} = 8.6 \text{ ft}$$

El catión débil; removerá el equivalente en el valor de la alcalinidad de bicarbonatos presentes.

$$\text{Cationes por remover} = \frac{387 \text{ p.p.m.}}{17.1 \text{ p.p.m./lgr/gal}} = 22.6 \text{ g.p.g.}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad requerida en Kilogramos} &= 408758 \text{ gal} \times 0.0226 \text{ Kgr/gal} \\ &= 9238 \text{ Kgr.} \end{aligned}$$

De la figura 4.10 se obtiene una capacidad de 60 -- Kgr/ft^3 para una temperatura de 120°F y una relación de dureza / alcalinidad de 1.

$$\text{Volumen de resina requerido} = \frac{9238 \text{ Kgr}}{60 \text{ Kgr/ft}^3} = 153 \text{ ft}^3$$

$$\text{Acido requerido estequiométrico} = \frac{9184 \text{ Kgr}}{7 \text{ Kgr/lb}}$$

$$= 1312 \text{ lb}$$

$$\text{Acido requerido adicional } 10\% = 131 \text{ lb}$$

$$\text{Total de acido requerido} = 1443 \text{ lb}$$

$$\text{Altura de lecho} = \frac{153 \text{ ft}^3}{62.5 \text{ ft}^2} = 2.5 \text{ ft}$$

$$\text{Acido total alimentado} = 5380 \text{ lb}$$

$$\text{Acido total requerido} = 1694 + 1312 = 3006$$

$$\text{Exceso total} = 2374 \text{ lb de } \text{H}_2\text{SO}_4$$

Agua para regenerar:

a) Retrolavado.- En las resinas catiónicas se recomienda un flujo de retrolavado de 6 g.p.m./ft².

$$\text{Cación fuerte: } 6 \text{ g.p.m./ft}^2 \times 62.5 \text{ ft}^2 = 375 \text{ g.p.m.}$$

$$\text{Cación débil: } 6 \text{ g.p.m./ft}^2 \times 62.5 = 375 \text{ g.p.m.}$$

b) Introducción de ácido sulfúrico: La regeneración de ácido sulfúrico se efectuará en dos pasos al 2% y al 4% - para evitar la precipitación de calcio.

2% de ácido contiene 0.17 lb H_2SO_4 /gal

4% de ácido contiene 0.43 lb H_2SO_4 / gal

66 °Be de ácido contiene 15.3 lb H_2SO_4 / gal

$$Ca/TC = \frac{221}{893} = 24.75 \quad 25\% \text{ flujo de ácido}$$

$$\text{Diluido} = \frac{25}{50} = 0.5 \text{ g.p.m./ft}^3$$

Suponiendo que una mitad de ácido será al 2% y la otra mitad al 4%.

$$\frac{5380 \text{ lb ácido}}{2} = 2690 \text{ al } 2\% \text{ y } 2690 \text{ al } 4\%$$

Para el 2% de ácido:

$$a = \frac{2690}{0.17 \text{ lb/gal.}} = 15823 \text{ gal al } 2\%$$

$$b = \frac{2690}{15.3 \text{ lb/gal.}} = 175 \text{ gal de } 66^\circ \text{ Be}$$

$$\text{Dilución a-b} = 15823 - 175 = 15648 \text{ gal}$$

$$0.5 \text{ gal/min/ft}^3 \times 538 \text{ ft}^3 = 269 \text{ g.p.m.}$$

$$\text{Tiempo de regeneración} = \frac{15823 \text{ gal}}{269 \text{ gal/min}} = 58 \text{ min}$$

$$\text{Flujo de agua de dilución} = \frac{15648 \text{ gal}}{58 \text{ min}} = 270 \text{ g.p.m.}$$

Para ácido al 4%

$$a = \frac{2690 \text{ lb}}{0.34 \text{ lb/gal}} = 7911 \text{ gal}$$

$$b = \frac{2690 \text{ lb}}{15 \text{ lb/gal}} = 176 \text{ gal}$$

Agua de dilución = 7735 gal

El flujo de agua de dilución será también a 270 g.p.m. por lo tanto el tiempo será:

$$\frac{7735 \text{ gal}}{270 \text{ gal/min}} = 28 \text{ min}$$

Por lo tanto el flujo volumétrico por unidad:

$$(\text{C.F.}): \frac{273 \text{ g.p.m.}}{538 \text{ ft}^3} = 0.5 \text{ g.p.m./ft}^3$$

$$(C.D.) \frac{273 \text{ g.p.m.}}{153 \text{ ft}^3} = 1.7 \text{ g.p.m./ft}^3$$

c) Desplazamiento: el flujo es el mismo que el de dilución:

$$\text{Volumen de cama } 538 \text{ ft}^3 \times \frac{7.48 \text{ gal}}{1 \text{ ft}^3} = 4024 \text{ gal.}$$

$$\text{Flujo} = 270 \text{ g.p.m.}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{4024 \text{ gal}}{270 \text{ g.p.m.}} = 15 \text{ min}$$

d) Enjuague rápido: Para este servicio al igual que en las unidades aniónicas se recomienda una velocidad de flujo superficial de 5 a 6 g.p.m./ft² y un volumen de 50 a 75 gal.

$$62.5 \text{ ft}^2 \times \frac{6 \text{ g.p.m.}}{\text{ft}^2} = 375 \text{ g.p.m.}$$

$$50 \frac{\text{gal}}{\text{ft}^3} \times 153 \text{ ft}^3 = 7650 \text{ gal.}$$

7650 gal. = 21 min.

375

Resumen de resultados: Unidad catiónica

Operación	Flujo (g.p.m.)	Tiempo (min)	Volumen (gal.)
Contralavado	750	15	11250
Introducción regenerante (2%)	270	58	15660
Introducción regenerante (4%)	270	28	7560
Desplazamiento	270	15	4050
Enjuague rápido	375	21	7875

Las figuras a las cuales se hace referencia en los ejemplos han sido tomadas del curso de "Tecnología de intercambio iónico para tratamiento de agua" U.N.A.M. Dpto. de Educación Continua y Cursos Especiales México D.F. 1981. - Y se localizan en el apéndice de la presente tesis.

C O N C L U S I O N E S

De acuerdo a la investigación y al trabajo realizado para desarrollar el tema de cálculo y selección de sistemas de tratamiento de agua por medio de resinas de intercambio iónico, se concluye lo siguiente:

1.- El primer problema que se presentará en la selección y cálculo de los sistemas de intercambio iónico será el de definir las bases de diseño, ya que de la información recopilada dependerá, la adecuada operación de la planta para lo cual se recomienda antes de seleccionar y calcular el sistema, efectuar los levantamientos (investigación) de campo necesarios para la recopilación de información, hasta la completa definición del problema.

2.- Se encontró que las siguientes consideraciones - deberán ser aplicadas para la adecuada selección del arreglo a emplear:

a) Utilizar sistemas de intercambio iónico con alta eficiencia de regeneración, para obtener un ahorro en regenerantes.

- b) Cuando el análisis del agua lo permita, utilizar resinas débilmente ácidas y/o básicas, en combinación con resinas fuertemente ácidas y/o básicas - para una mayor utilización de los regenerantes, - dado que con el exceso de regenerante de éstas últimas es posible regenerar las resinas débilmente ácidas y/o básicas.
- c) Recuperar los excesos de regenerantes.
- d) Recircular el agua de enjuague.
- e) Efectuar la selección de resinas, equipo y materiales bajo códigos y estándares internacionales con lo cual el equipo estará sujeto a una mejor - operación y menor mantenimiento.
- f) Utilizar sistemas automáticos con el objetivo de tener mejor eficiencia y un mayor número de ciclos por año.
- g) Evaluar la necesidad de un pretratamiento.

3.- Finalmente se puede concluir en forma general - que todas las consideraciones mencionadas a través del tema desarrollado, aportan elementos que sirvan como criterios,

cuando se presente el problema de seleccionar y calcular este tipo de sistemas. Sin embargo se sugiere, cuando así sea requerido complementar el presente estudio con un análisis económico de los factores ya mencionados que determinan la ventaja de un sistema sobre otro.

A P E N D I C E

- 1.- TERMINOLOGIA
- 2.- DATOS TECNICOS
- 3.- TABLAS DE CONVERSION
- 4.- SIMBOLOGIA EMPLEADA

APRENDICE 1

TERMINOLOGIA USADA EN EL INTERCAMBIO IONICO

Con el objetivo de complementar y de hacer más clara la descripción de los capítulos anteriores, a continuación se mencionarán los principales términos empleados en el intercambio iónico y su descripción. Estas definiciones están de acuerdo a el código ASME Performance test Codes Ion Exchange Equipment.

Acidez: Una expresión de la concentración de iones-hidrógeno presentes en una solución.

Absorbente: Resina sintética que posee la habilidad de atraer y retener partículas cargadas.

Absorción: La acción de retener partículas cargadas o grupos químicos activos, en la superficie y en los poros de un intercambiador iónico.

Alcalinidad: Una expresión de los aniones totales básicos (grupos hidróxilos) presentes en una solución, también representa en un análisis de agua los bicarbonatos y carbonatos.

Anión: Ion cargado negativamente.

Intercambio Iónico: El desplazamiento de una partícula cargada positivamente o negativamente, por otra, en una resina catiónica o aniónica respectivamente.

Atrición: El rozamiento de una partícula contra otra en un lecho de resina que da por resultado la fractura de las perlas de la resina.

Alcalinidad de bicarbonatos: La presencia en una solución de iones OH resultantes de la hidrólisis de carbonatos o bicarbonatos. Cuando estas sales reaccionan con agua, se produce una base fuerte y un ácido débil y la solución se torna alcalina.

Capacidad: La habilidad de absorción que poseen los materiales de intercambio iónico, esta capacidad se expresa como kilogramos por pie cúbico, donde el numerador representa el peso de los iones absorbidos y el denominador, el peso o volumen del absorbente.

Canalización: Hendiduras que se forman a través del lecho de resina debido a procedimientos incorrectos de operación, como altos flujos, insuficiente distribución o recolección de flujos, etc.

Ciclo: Curso completo de una operación de intercambio iónico por ejemplo un ciclo completo incluye: Agotamiento, regeneración, retrolavado y enjuague.

Desmineralización: Involucra la remoción de todos los constituyentes cargados (iones) de sales ionizables, de una solución.

Enlace cruzado: (Cross Linkage) El grado de enlace de un monómero o un grupo de monómeros, para formar una matriz de resina tridimensional.

Eficiencia: La efectividad del comportamiento operacional de un intercambiador de iones. Es expresada como la cantidad de regenerante requerido para efectuar la remoción de un determinado componente en solución (Kgs. ácido a clástico/kilogramos sal removido).

Efluente: Solución saliente de una columna de intercambio iónico.

Electrolito: Componente químico que se ioniza en agua para producir una solución que conducirá la corriente eléctrica.

Elución: El desplazamiento de iones absorbidos, de una resina por medio del uso de una solución conteniendo -- otros iones en bajas concentraciones relativamente.

Estabilidad química: Resistencia a la degradación química que la resina debe poseer para resistir contactos o soluciones agresivas.

Agotamiento: Estado en el cual la resina ya no es capaz de efectuar el intercambio iónico.

Espacio libre: Espacio por arriba del lecho de resina, para permitir su expansión en la fase de retrolavado.

Caída de presión: Reducción en la presión del líquido ocasionada con el paso de una solución a través de una cama de resina. Es una medida de la resistencia del lecho de resina al flujo.

Clasificación hidrodinámica: Reacomodo de las partículas en una unidad de intercambio iónico, a medida que el agua fluye en retrolavado a través del lecho, las partículas más grandes se sedimentan y las más pequeñas emergen a la superficie.

Fuga: Fenómeno mediante el cual algunos de los io--

nes influentes no son absorbidos y aparecen en el efluente.

Finos: Partículas extremadamente pequeñas de resinas.

Expansión de lecho: Efecto producido durante el retrolavado donde las perlas de resina se separan y ascienden a la parte superior de la columna, esta expansión debe de ser controlada regulando el flujo de retrolavado.

Grano: Unidad de peso: 0.0648 gramos.

Granos por galón: Expresión de concentración de material en solución generalmente expresada como carbonato de calcio (CaCO_3), un grano por galón (CaCO_3) es equivalente a 17.1 p.p.m. partes por millón.

Hinchamiento: La expansión de las perlas de resina que ocurre cuando los grupos reactivos de la resina son convertidos de una forma iónica a otra.

Operación Columna : Formar convencional de utilizar las resinas de intercambio iónico a través de la cual se hace pasar soluciones a tratar ya sea en flujo ascendente o descendente.

Profundidad de lecho: La altura que lleva la resina en una columna después de que ésta fue adecuadamente acondicionada para una operación efectiva.

Punto de agotamiento: (Breakthrough) El punto donde aparece iones que ya no fueron absorbidos, iones en una resina, similares a los que se están introduciendo en la solución influente. Esto es una indicación de que la regeneración es necesaria.

Retrolavado: Flujo ascendente de agua a través del lecho de resina para lavar y reclasificar la resina después del agotamiento.

Régimen de flujo: Volumen de solución pasando a través de cierta cantidad de resina en un tiempo dado, normalmente expresada en galones/minuto/pie cúbico.

Velocidad de intercambio: El grado de desplazamiento, de un intercambiador a favor de otro.

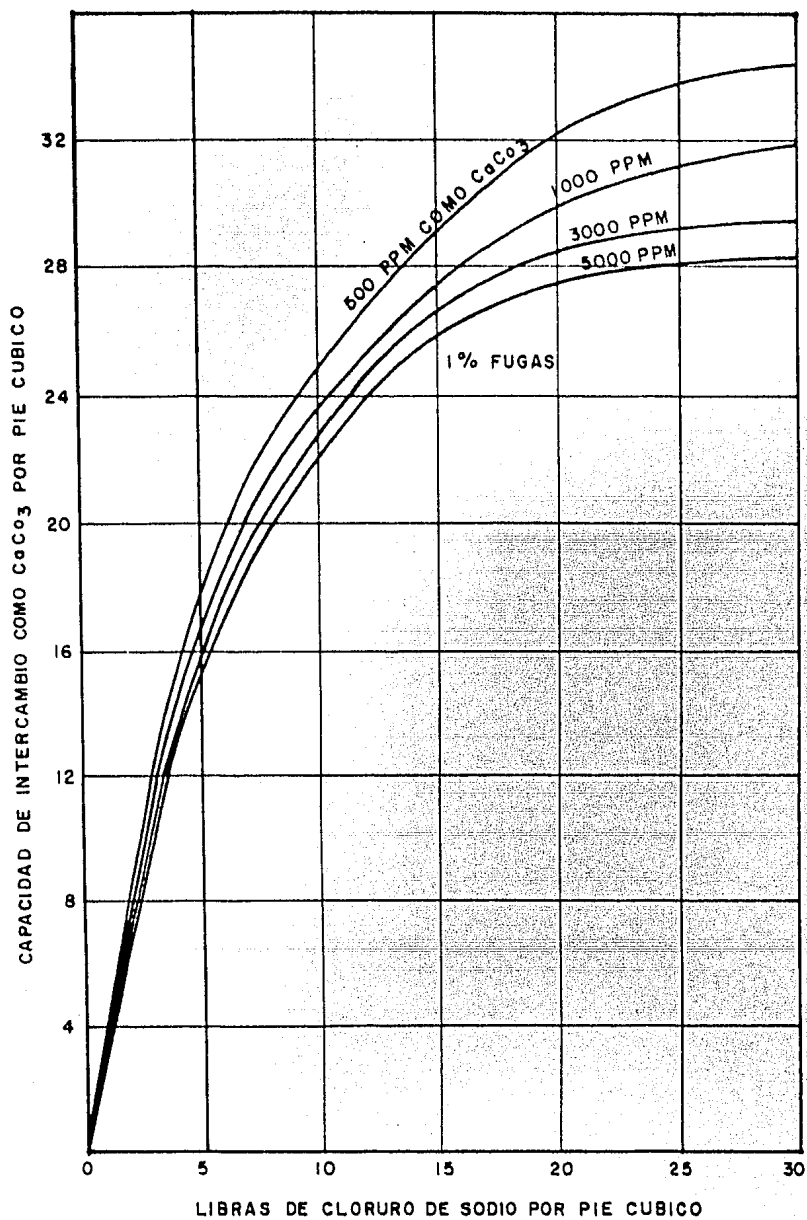


FIGURA No 4.1

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DE LA DUREZA Y DEL NIVEL DE REGENERACION SOBRE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO

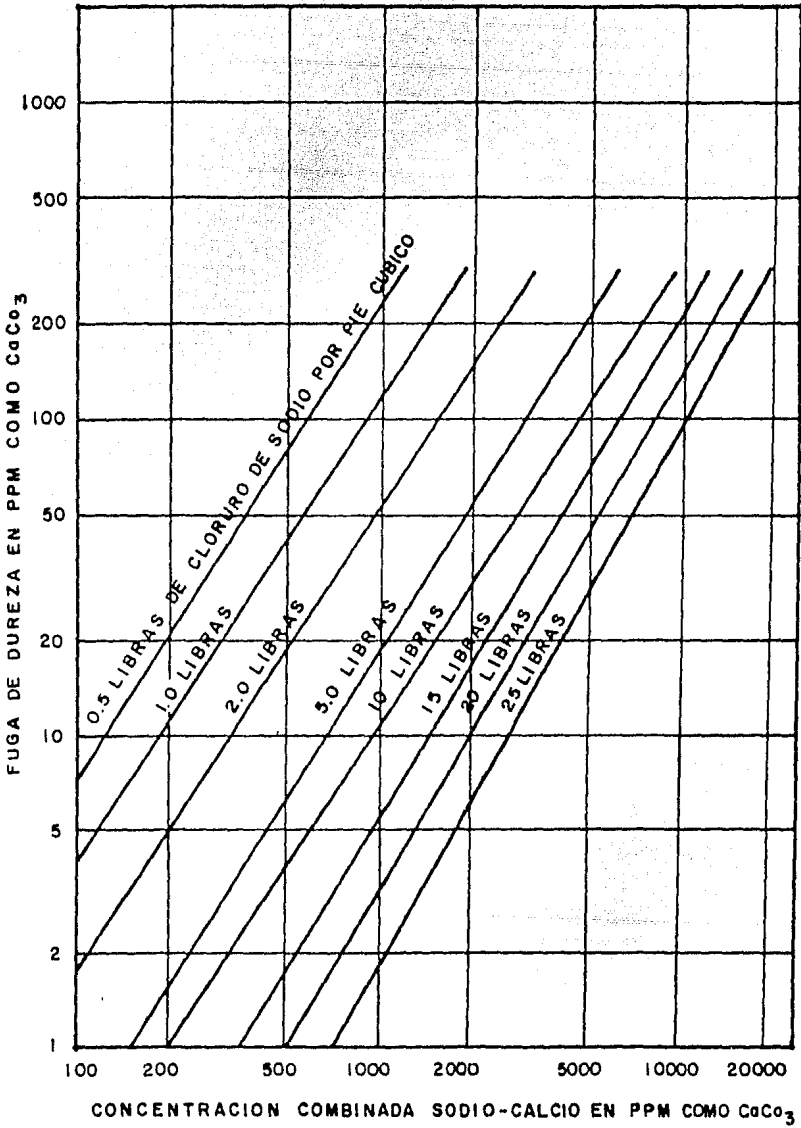


FIGURA No. 4.2

RESINA CICLO SODIO

EFFECTO DE LA CONCENTRACION DEL INFLUENTE Y DEL NIVEL DE REGENERACION, EN LA FUGA DE DUREZA (RELACION SODIO/CALCIO=1).

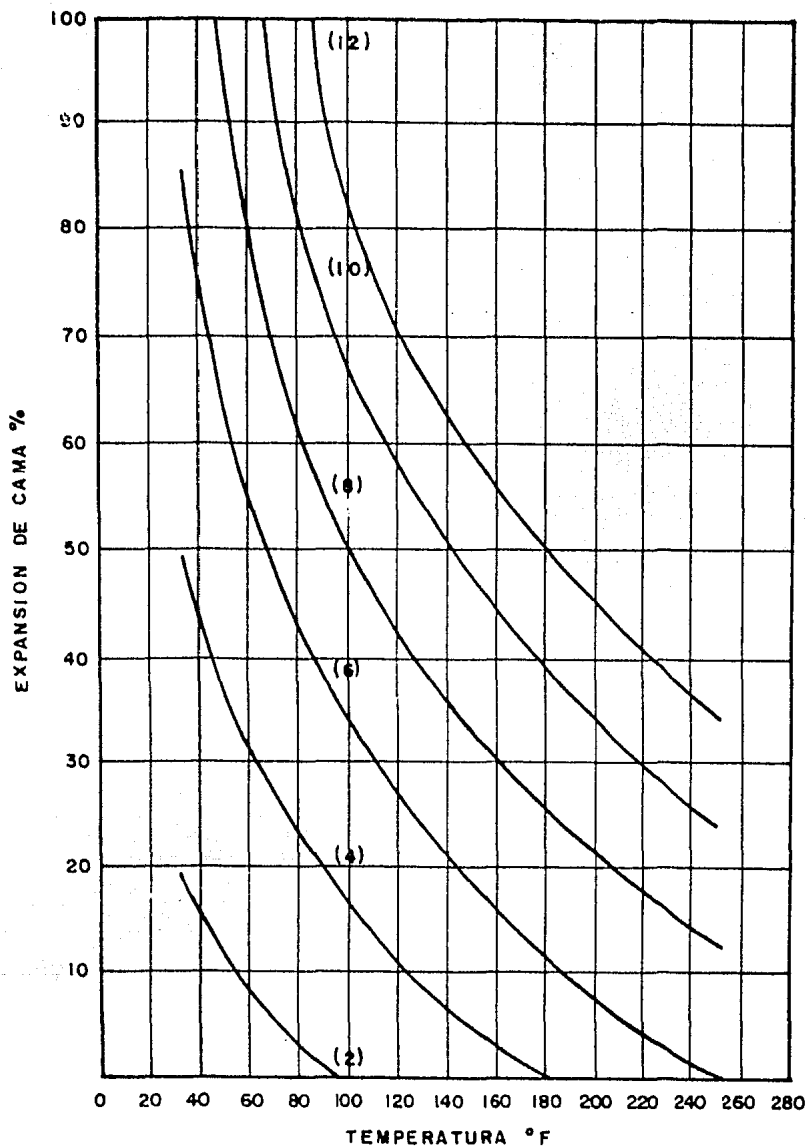


FIGURA No. 4.3

RETROLAVADO RESINA CICLO SODIO

EXPANSION HIDRAULICA

PARAMETRO: VELOCIDAD SUPERFICIAL GPM/PIE²

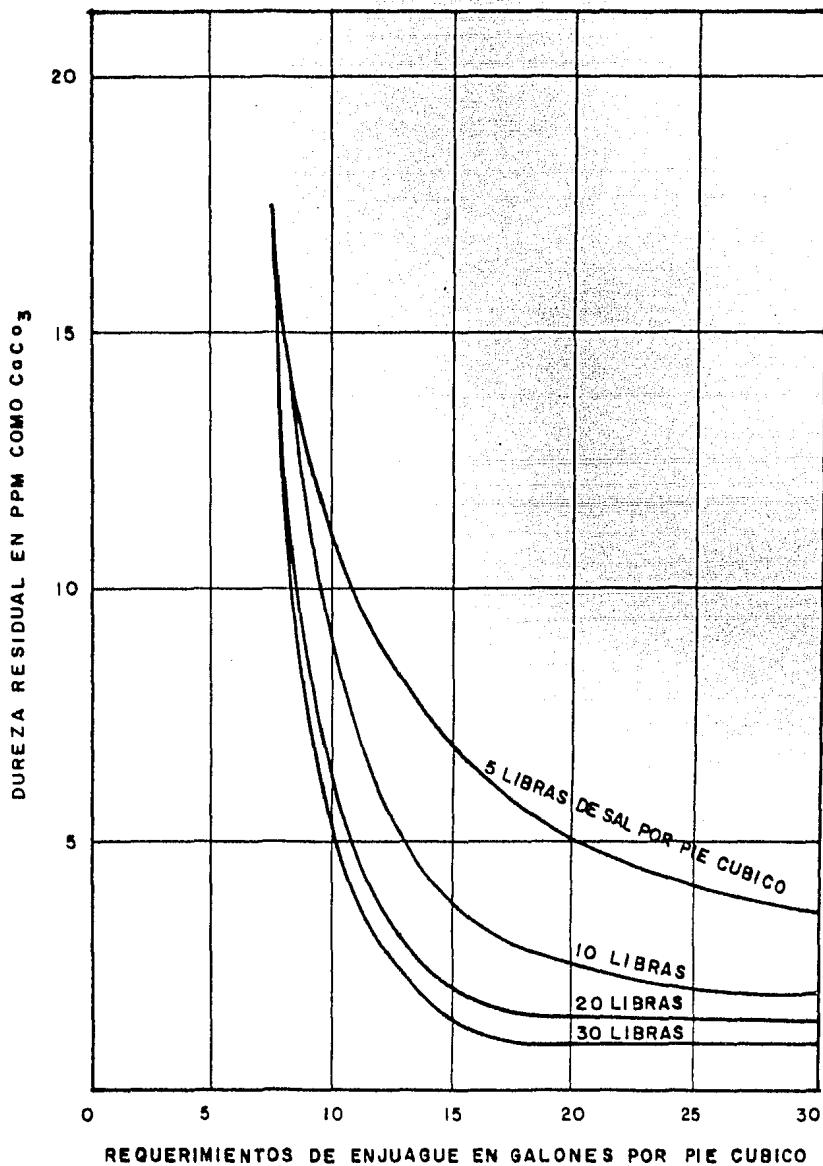


FIGURA No. 4.4

RESINA CICLO SODIO.
 REQUERIMIENTOS DE ENJUAGUE COMO
 FUNCION DEL CONTENIDO DE DUREZA RESIDUAL.

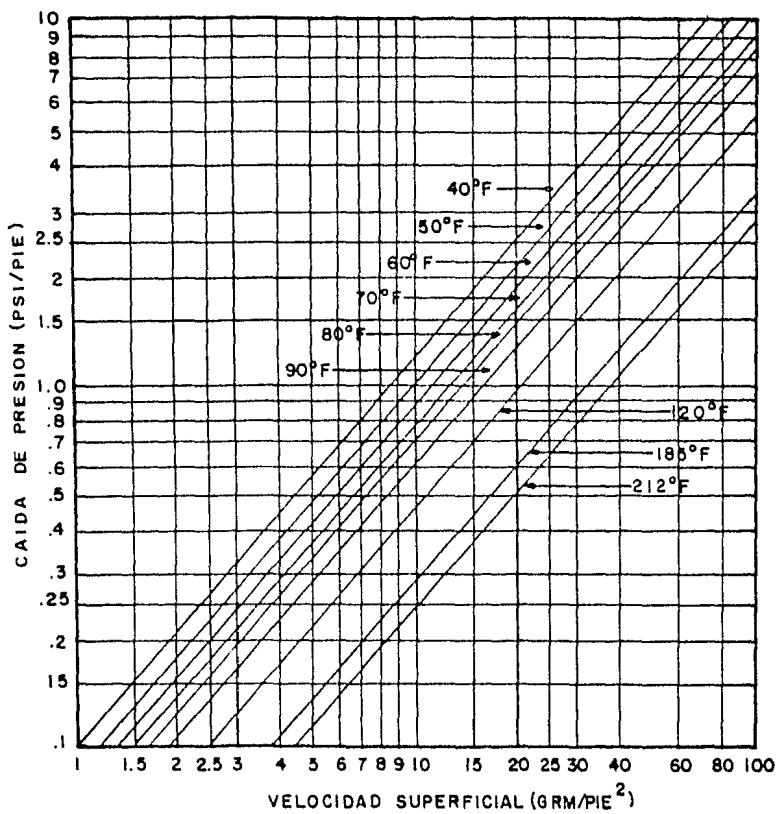


FIGURA No. 4.5

RESINA CICLO HIDROGENO
CAIDA DE PRESION

FIGURA 4.6

RESINA FUERTEMENTE BASICA

FUGA DE SILICE A 10 Lbs. DE NaOH / Ft³

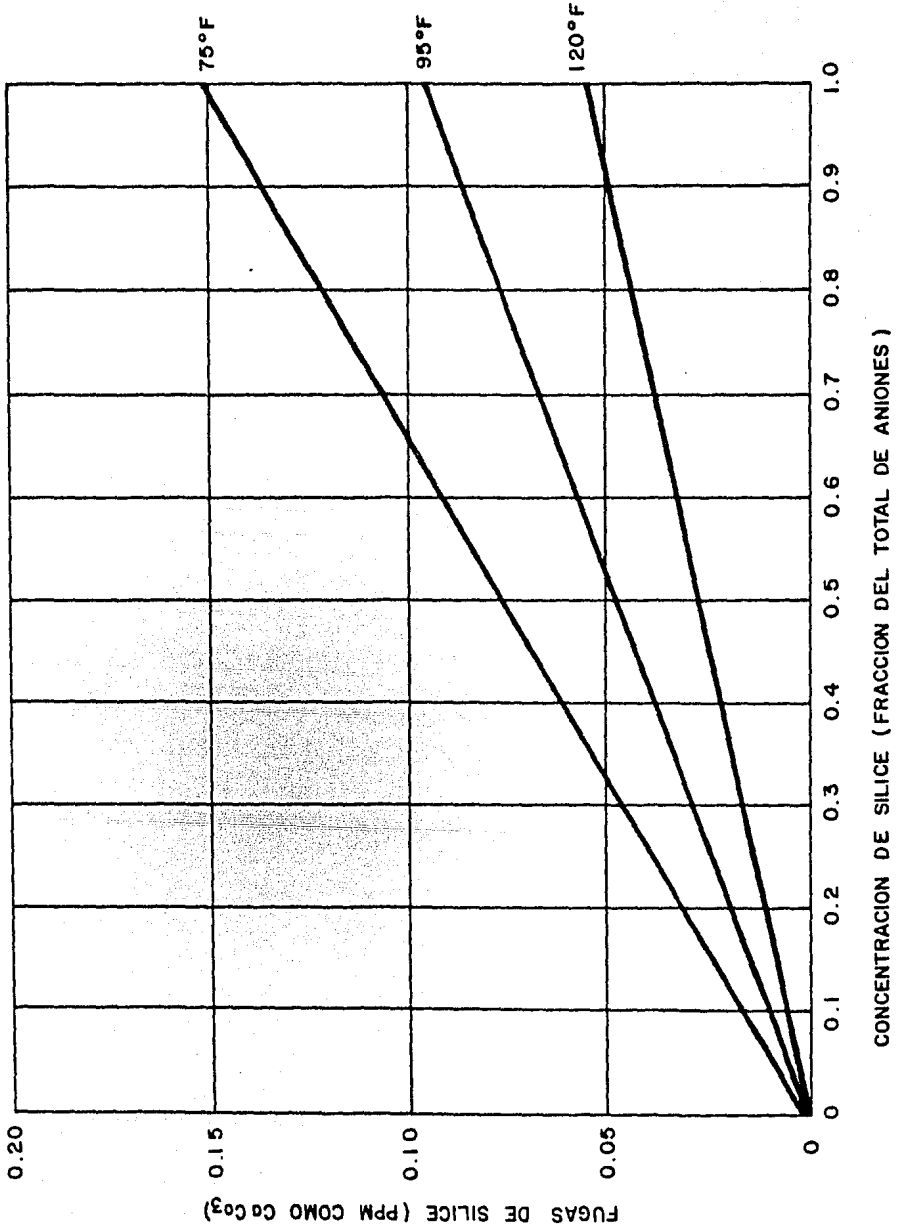
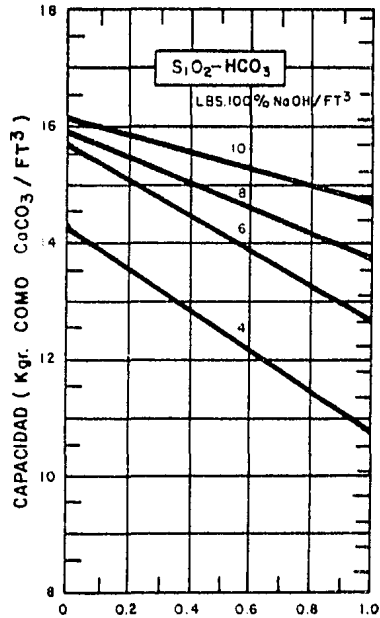
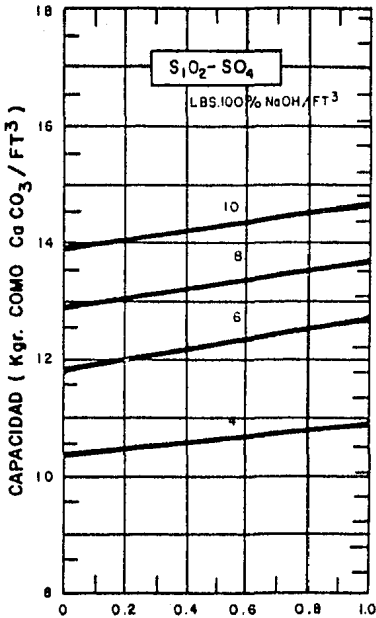
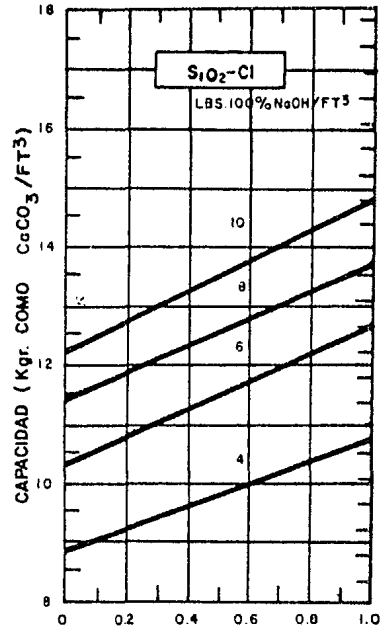


FIGURA No. 4.7
RESINA FUERTEMENTE BASICA
CAPACIDADES POR COMPONENTES



CONCENTRACION DE SILICE (FRACCION DEL TOTAL DE ANIONES)

FIGURA 4.8
 RESINA FUERTEMENTE ACIDA
 NIVEL DE REGENERACION 10 Lbs. H₂SO₄(66° B \acute{e}) / Ft³

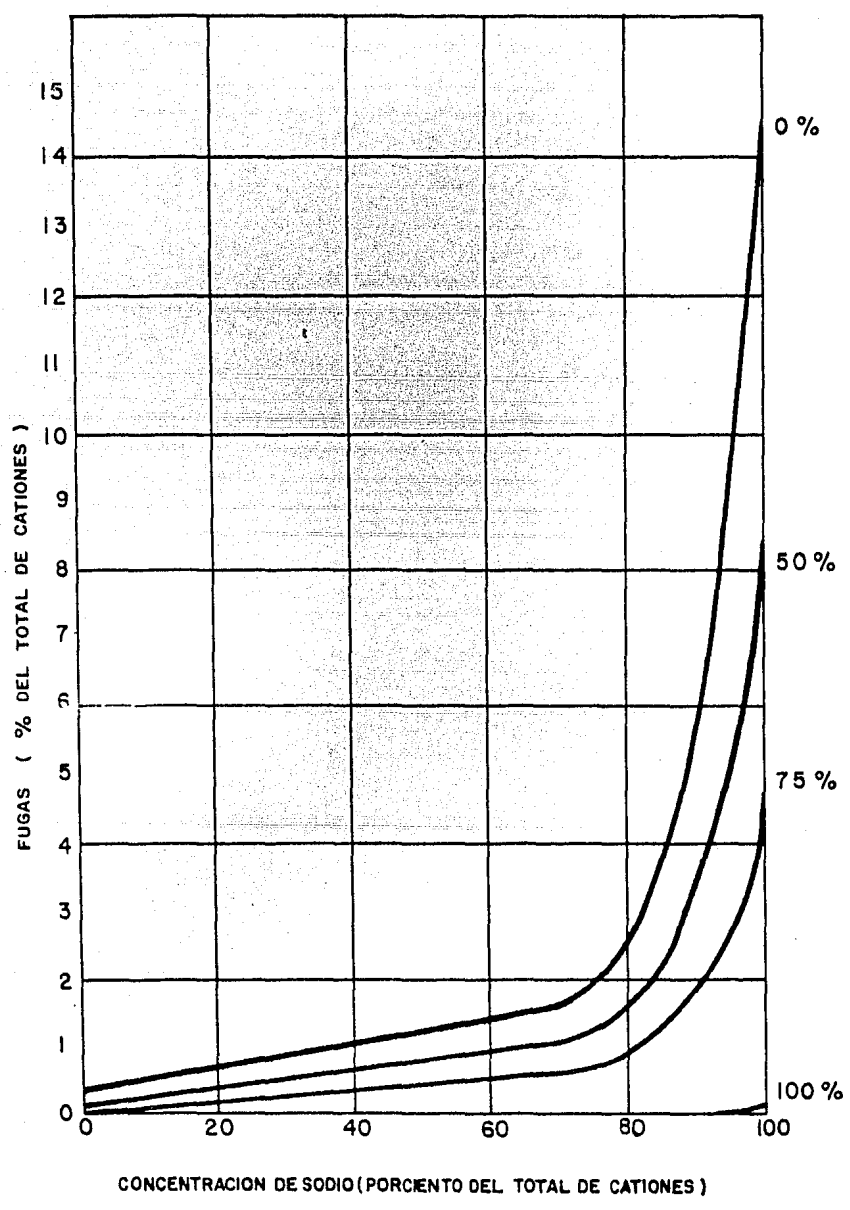


FIGURA 4.9

RESINA FUERTEMENTE ACIDA

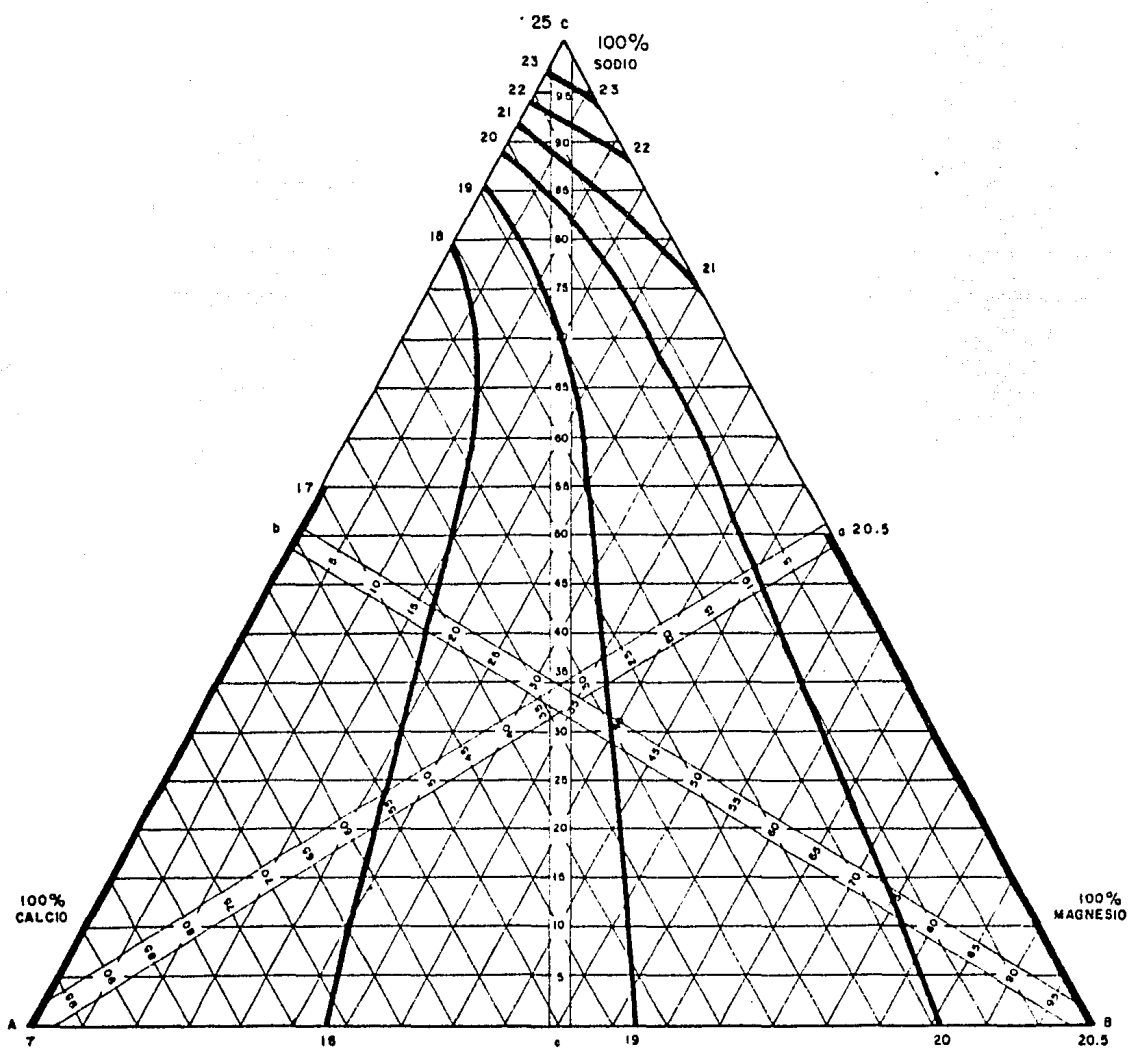
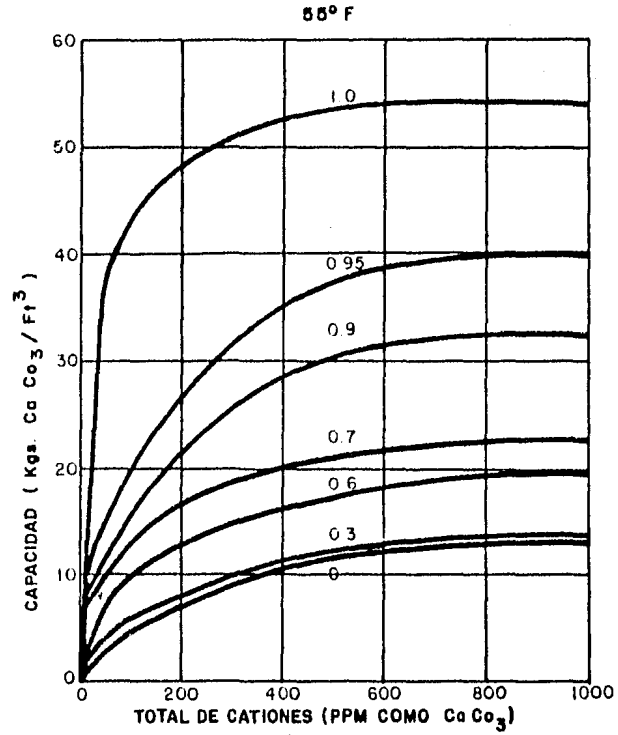
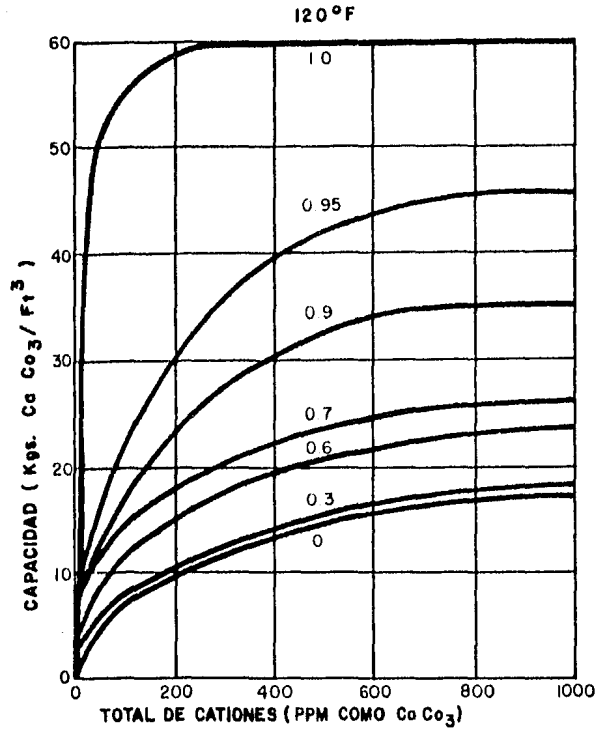
NIVEL DE REGENERACION 10 LBS. DE H_2SO_4 (66° B°) / FT³

FIGURA 4.10
 RESINA DEBILMENTE ACIDA
 PARAMETRO: RELACION DUREZA / ALCALINIDAD



TABLAS DE CONVERSION
CAPACIDAD Y NIVEL DE REGENERACION

CONCEPTO	IMEq/ml	IKgr./ft ³	IGr./l	l1b/ft ³
1 Meq/ml	1	21.8	50	0.624
<u>IKgr. como CaCO₃</u> ft ³	0.0459	1	2.29	0.00026
<u>IGr. como CaCO₃</u> l	0.02	0.436	1	0.00125
<u>1 lb equiv.</u> ft ³	16.0	349	801	1

FLUJO


































CONCEPTO	I Vol.cama/min	IGal (U.S.)/ ft ³ /min.	lb H ₂ O/ ft ³ /min.
I Volumen cama/min	I	7.48	62.4
I Gal (U.S.)/ft ³ / min.	0.134	I	8.33
I lb H ₂ O/ft ³ /min	0.016	0.12	I

CONCENTRACION (COMO CaCO₃)

CONCEPTO	P.P.M.	Meq/l	Grn./Gal(U.S.)
P.P.M.	I	0.02	0.0585
I Meq/l	50	I	2.9
I Grn./Gal	17.1	0.34	I

SIMBOLOGIA EMPLEADA

169

	VALVULA MANUAL DE COMPUERTA		PLACA DE ORIFICIO
	VALVULA DE CONTROL TIPO MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMATICO		INTEGRADOR DE FLUJO
	VALVULA DE MARIPOSA MANUAL		CONTROLADOR DE NIVEL
	VALVULA DE CONTROL AUTOMATICO DE DIAFRAGMA		INTERRUPTOR DE TIEMPO (TIMER) CONTROLADO POR FLUJO
	VALVULA DE DIAFRAGMA MANUAL		ALARMA VISIBLE
	VALVULA DE BOLA		ELEMENTO MONTADO EN TABLERO
	VALVULA DE RETENCION		
	VALVULA DE SOLENOIDE DE 2 VIAS	S.A	SUMINISTRO DE AIRE LIMPIO Y SECO PARA INSTRUMENTOS
	VALVULA DE SOLENOIDE DE 3 VIAS		CAMBIADOR DE CALOR
	BOMBA DESPLAZAMIENTO POSITIVO		VENTILADOR
	BOMBA CENTRIFUGA		
	COLADERA		
	LINEA ELECTRICA		
	LINEA NEUMATICA		
	CONEXION ELECTRICA AL TABLERO DE CONTROL		
	POSICIONADOR		
	TRAMPA DE VAPOR		
	CELDA DE CONDUCTIVIDAD		
	INSTRUMENTO INDICADOR DE CONDUCTIVIDAD		
	INDICADOR DE FLUJO TIPO ROTAMETRO		
	INDICADOR DE PRESION		
	CONTROLADOR NEUMATICO DE TEMPERATURA CON ALARMA		
	ROTAMETRO INDICADOR DE FLUJO CON ALARMA		
	TRANSMISOR DE FLUJO		
	INTERRUPTOR DE FLUJO CON PREDETERMINADOR		

B I B L I O G R A F I A

- 1.- KUNIN, R. "ELEMENTS OF ION EXCHANGE," 2a. EDICION, R. E. KRIEGER PUBLISHING CO. NEW YORK, 177 - 179, (1971).
- 2.- APPLEBAUM, S.B., "DEMINEERALIZATION BY ION EXCHANGE". -- 2a. EDICION, ACADEMIC PRESS, NEW YORK, 2, 21, 57, 195 y 264, (1969).
- 3.- NACHOD F.C. AND J. SCHUBERT, "ION EXCHANGE TECHNOLOGY, - 1a. EDICION, ACADEMIC PRESS, NEW YORK, 234, 236 y 237, - (1965).
- 4.- PEAK R.F. "CATION EXCHANGE EQUIPMENT," CHEMICAL ENGI- - NEERING, 53 No. 1, 37 - 40, (1957).
- 5.- SHORE, J.S. "SILICA DEPOSITS IN STEAM TURBINES," HYDRO- CARBON PROCESSING, 51 No. 12, 87-90, (1972).
- 6.- ŠANKS, R.L. "WATER TREATMENT PLANT DESING FOR THE PRAC- TICING ENGINEER," 2a. EDICION, ANN ARBOR SCIENCE, NEW - YORK, 595, 597, 600, 605 y 609, (1979).
- 7.- CURSO "TECNOLOGIA DEL INTERCAMBIO IONICO PARA TRATAMIE_N TO DE AGUA." U.N.A.M. DPTO. DE EDUCACION CONTINUA Y CUR

- SOS ESPECIALES, MEXICO D.F., 97, 101, 160, 300, 320 y - 360, (1981).
- 8.- RASE H.F. AND BARROW, M.H. "INGENIERIA DE PROYECTO PARA PLANTAS DE PROCESO," 8a. EDICION, CONTINENTAL, MEXICO - D.F., 621 - 630, (1982).
- 9.- NORDELL, E., "WATER TREATMENT," 3a. EDICION, REINHOLD - PUBLISHING CORPORATION, NEW YORK, 189 - 225, (1956).
- 10.- ASME "PERFORMANCE TEST CODES ION EXCHANGE EQUIPMENT. EDITORIAL STAFF NEW YORK. 2.1 - 2.2, (1974).
- 11.- KUNZ, R.G. YEN A.F., AND HESS, T.C. "COOLING WATER CALCULATIONS," CHEMICAL ENGINEERING. 84 No. 16, 61-71, - (1977).
- 12.- DOWNING, D.G. "CALCULATING MINIMUM COST ION EXCHANGE RESINS," CHEMICAL ENGINEERING, 72 No. 25, 170-176, (1965)
- 13.- ASTM, "PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF PARTICULATE ION EXCHANGE RESINS." EDITORIAL STAFF, ST. PHILADELPHIA PA. 971 - 977, (1977).

- 14.- KUNIN, R., "APLICACION OF ION EXCHANGE," ROHM AND HASS, - AMBER HI LITES, Nos. 92 - 95, (1965).
- 15.- KUNIN, R. "WATER SOFTENING," ROHM AND HASS, AMBER HI LITES, Nos. 96 y 97, (1966).
- 17.- NALCO CHEMICAL COMPANY "CONDITIONING WATER FOR BOILERS", 61-65, (1972).