

10
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO



Facultad de Estudios Superiores
"Cuautitlán"

IMPLANTACION DE TECNICAS OPERACIONALES ENFOCADAS A LA OPTIMIZACION Y EFICIENCIA DE SISTEMAS DE INTERCAMBIO IONICO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

CESAR GERARDO GONZALEZ PONCE

DIRECTOR DE TESIS:

I.Q.I CARMEN ARRIAGA ORIHUELA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION	I
OBJETIVOS	II
1.0.0. Generalidades	1
2.0.0. Impurezas en el agua	2
2.1.0. Pruebas de laboratorio para determinar la calidad del agua.	8
3.0.0. Intercambio Iónico	11
3.0.1. Desmineralización	12
3.1.0. Características de los intercambiadores iónicos	14
3.1.1. Tamaño del grano	14
3.1.2. Naturaleza de los grupos activos	15
3.1.3. Capacidad de intercambio	15
3.1.4. Hinchamiento	15
3.1.5. Grado de reticulación o entrecruzamiento	16
3.1.6. Selectividad iónica	16
3.2.0. Clasificación de resinas de intercambio iónico	19
3.3.0. Sistemas desmineralizadores más comunes	26
3.4.0. Consideraciones antes de seleccionar el proceso de intercambio iónico	29
3.5.0. Componentes que conforman el equipo de intercambio iónico	33
3.5.1. Tanque vertical	33
3.5.2. Distribuidores	33
3.5.3. Controles	34
3.6.0. Principios de operación en unidades de intercambio iónico	46
4.0.0. Criterios de análisis a problemas de operación de sistemas de intercambio iónico	56
4.1.0. Pérdida de capacidad	56
4.1.1. Aumento de salinidad	56
4.1.2. Pérdida de resina	56
4.1.3. Nivel de regeneración	56
4.1.4. Gasto de regenerante	57
4.1.5. Concentración de regenerante	57
4.1.6. Precisión del punto final del ciclo	57
4.1.7. Condiciones de la resina	57
4.2.0. Baja calidad del producto	57
4.2.1. Fuga de alcalinidad	58
4.2.2. Fuga de dureza	58
4.2.3. Fuga de sodio	58
4.2.4. Fuga de sílice	59

4.2.5.	Problemas de las resinas aniónicas fuertemente básicas	59
4.2.6.	Problemas relacionados con la operación de lechos mixtos	60
4.2.7.	Contaminación de las resinas	61
4.2.8.	Contaminación con hierro	61
4.2.9.	Contaminación con aceite	62
4.2.10.	Ensuciamiento con lodos o polielectrólitos	63
4.2.11.	Crecimiento de algas y bacterias (esterilización)	63
4.2.12.	Precipitación de sulfato de calcio	64
4.2.13.	Acumulación de sílice	64
4.3.0.	Pérdida de carga excesiva	64
4.4.0.	Problemas del equipo	65
4.4.1.	Distribuidor de entrada obstruido	65
4.4.2.	Sistemas colectores interiores	66
4.4.3.	Medidores de gasto	66
4.4.4.	Paredes de las tuberías y columnas	66
4.5.0.	Problemas de las resinas de intercambio iónico	67
4.5.1.	Degradación física por oxidación	67
4.5.2.	Depósitos sobre la resina	68
4.5.3.	Finos	68
4.6.0.	Descripción para la solución de problemas más comunes en equipos de intercambio iónico	69
5.0.0.	Muestreo y determinación de la calidad de la resina de intercambio iónico	71
6.0.0.	Procedimiento para la evaluación técnica de la operación del sistema de intercambio iónico, ejemplo: la existente FES-C	73
7.0.0.	Observaciones y propuesta de planteamiento para la solución de dicho sistema	78
	CONCLUSIONES	81
	BIBLIOGRAFIA	82

INTRODUCCION

La obtención de agua de una calidad que sea óptima para el uso requerido - industrialmente es un problema que ha de resolver el hombre moderno, ya - que su importancia involucra varios factores:

- a) Desarrollo y difusión de tecnología industrial
- b) Uso racional de recursos naturales
- c) Creciente industrialización del país
- d) Prevención a la contaminación

Uno de los procedimientos más usados industrialmente para la purificación de agua natural es el proceso de desionización por Intercambio Iónico. Y aunque se cuenta con información teórica sobre el comportamiento de las resinas encargadas del Intercambio Iónico, es frecuente encontrar problemas por su uso inadecuado, puesto que las variaciones de las condiciones de operación pueden alterar sus propiedades debido al mal funcionamiento del equipo y como consecuencia no obtenerse la calidad esperada en el efluente del intercambiador.

Este problema se refleja también en un mayor consumo de reactivos, y por ende producción de contaminantes. Por lo que se hace necesario conocer el proceso de desmineralización así como equipo, pruebas de laboratorio, etc., para entender el funcionamiento de equipo de intercambio iónico. Esto facilitará ubicarse en cuál de los diferentes problemas de tipo operacional se encuentra el equipo en estudio.

O B J E T I V O S

El interés del presente trabajo es el de proporcionar criterios para la evaluación técnica en la operación de sistemas de intercambio iónico, ya -- que una operación libre de problemas es importante en el éxito de todos -- los sistemas de ingeniería. El incremento en costos es derivado frecuentemente de paros prolongados de equipo por problemas de mal funcionamiento. Los sistemas de intercambio iónico no son diferentes de otros sistemas de ingeniería, ya que ellos también pueden ser fuentes de grandes problemas.

Es por ello que se estudiarán los principales problemas que se pueden presentar en la operación de sistemas de intercambio iónico.

1.0.0. Generalidades.

Los intercambiadores de iones son sustancias naturales "zeolitas" o sintéticas "resinas" cuerpos o geles e insolubles que permiten - un intercambio iónico, el cual analizaremos en puntos posteriores.

El intercambio iónico se usa mucho para el tratamiento de aguas de procesos, principalmente para eliminar la "dureza" producida por - los iones (Ca^{++} y Mg^{++}) en los suministros de aguas. También se -- usa para el tratamiento de diversas aguas industriales con el fin de recuperar los materiales de desperdicio o subproductos, particu-- larmente formas iónicas de metales valiosos como plata, oro y ura-- nio. Otras aplicaciones en el tratamiento de aguas es la elimina-- ción y recuperación de materiales radiactivos en las aguas de reac-- tores nucleares, hospitales y laboratorios. Siendo estas aplicacio-- nes de gran importancia, pues, por medio de este método se tendrán grandes soluciones para la prevención de materiales contaminantes en estado iónico en el medio ambiente (agua).

2.0.0. Impurezas en el agua.

Para realizar este tema conoceremos el origen y características del agua.

ORIGEN Y CARACTERISTICAS DEL AGUA

Origen.— El agua puede provenir de cuatro fuentes principales:

- a) Agua de lluvia y superficial
- b) Agua de manantiales y ríos
- c) Agua de pozos y perforaciones
- d) Agua de mar

El agua de las fuentes antes mencionadas que no han recibido ningún tratamiento, se le conoce con el nombre de agua cruda. El agua como se encuentra en la naturaleza, no es totalmente pura. — Si así fuera, no serían necesarios los tratamientos para acondicionarla a los usos a que se destinan.

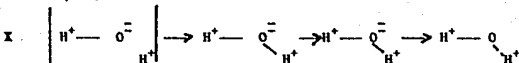
El agua tiene características como las siguientes:

- a) Entre las sustancias inorgánicas comunes tiene la más alta capacidad para absorber o liberar más calor por cada cambio en el aumento de la temperatura (capacidad calorífica).
- b) No sufre alteraciones químicas con calentamiento dentro del intervalo de temperatura comúnmente encontradas en la industria.
- c) A la temperatura ambiente puede controlarse y hacerse fluir fácilmente.
- d) Su manejo no presenta riesgos.
- e) Es aún abundante.

Estas características tan útiles del agua tienen su origen en una estructura fuera de lo común para una molécula que tiene un peso molecular tan pequeño. Un dipolo de una molécula de agua tiende a unirse a otra molécula análoga a través de sus polos contrarios — formando el compuesto denominado dihidrol.

Las cargas positivas y negativas asociadas con el hidrógeno y oxígeno respectivamente, dan lugar a una unión débil pero efectiva — entre el oxígeno de una molécula y el hidrógeno de otra. Esta —

unión hace que se formen moléculas asociadas.



El valor X varía con la temperatura y la presencia de otras moléculas en el agua, pero es aproximadamente de 4 a 8. Estas moléculas poliméricas tienen un peso efectivo de 72 a 144. A esto se debe que su punto de ebullición y su calor de vaporización sean relativamente elevados. Este carácter polar hace que sea uno de los mejores disolventes de sustancias minerales y electrólitos.

La atracción de Van Der Waals es proporcional al peso molecular - por lo que sustancias con elevado peso molecular tendrán por lo general elevados puntos de ebullición. El agua con un peso molecular de 18 debería tener una temperatura de ebullición considerablemente inferior a los 100°C; la causa por lo que esto no sucede se debe, como se mencionó con anterioridad, a su muy especial estructura molecular, las moléculas de agua se mantienen juntas por una fuerza adicional a la de Van Der Waals y es debida a la característica polar del agua (un extremo de la molécula es positivo y otro negativo), el lado del hidrógeno de una molécula se acomoda con el lado del oxígeno de otra repitiéndose esto indefinidamente produciéndose una estructura en cadenas muy difícil de romper.

La característica de las moléculas de agua de unirse fuertemente debido al enlace de hidrógeno las hace poseer también una elevada tensión superficial, esta elevada tensión superficial ocasiona - que el agua se eleve en un tubo capilar.

Debido al enlace de hidrógeno y a las características polares de la molécula, se debe la formación del menisco cóncavo en la superficie del agua así como su tendencia molecular a mojar o penetrar otras sustancias, como se muestra en la Fig. 2-1.

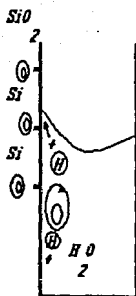


Fig. 2-1

Las impurezas que generalmente se encuentran en el agua se pueden clasificar en:

1) Sustancias en suspensión	a) Inorgánicas	Limo (0.05-0.002MM) Arena (2-0.05 MM)
	b) Orgánicas	Materia vegetal y animal
2) Sustancias disueltas	a) Sales inorgánicas	OH^- , CO_3^{--} , HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , H_2SiO_3 Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{++} , - Mg^{++} , Fe^{++}
	b) Compuestos orgánicos	Componentes del ciclo del carbono. Carbohidratos $(\text{CH}_2\text{O})_n$
	c) Gases	CO_2 , O_2 , N_2
3) Impurezas coloidales	Arcilla y sílice muy finamente dividida --- (0.002MM), hidróxidos de hierro y aluminio, productos orgánicos residuales, ácidos húmicos, sustancias colorantes.	

SOLIDOS DISUELTOS.— Los minerales que el agua disuelve de las rocas consisten principalmente de CaCO_3 (piedra caliza), MgCO_3 (dolomita), CaSO_4 (gypsum), MgSO_4 (sal de epsom), sílice (arena), NaCl (sal común), Na_2SO_4 (sal de glauber) y pequeñas cantidades de hierro, aluminio, manganeso, flúor y otras sustancias.

Los problemas de corrosión y depósitos debidos al agua y sus impurezas se deben a cuatro factores:

- a) La solubilidad de las impurezas en particular
- b) El efecto de la temperatura
- c) La alcalinidad o acidez del agua
- d) Las condiciones de oxidación o reducción presentes

En los procesos en los que el agua se evapora, las impurezas se concentran y el depósito se presenta cuando se excede el límite de solubilidad debido a cambios en temperatura, acidez o alcalinidad. Los minerales comunes presentes en las aguas naturales pueden clasificarse en cuatro categorías basados en consideraciones de solubilidad:

- a) Compuestos de calcio y manganeso
- b) Compuestos de sodio
- c) Sílice
- d) Compuestos de hierro y manganeso

La solubilidad de las sales de sodio, calcio y magnesio son afectadas apreciablemente por la temperatura del agua, sobre los óxidos de hierro y la sílice no ocasiona grandes variaciones. La solubilidad de la sílice se encuentra afectada por la alcalinidad o acidez (ver Fig. 2-2), también afectan a la solubilidad de las sales de hierro y manganeso.

La solubilidad de las sales de dureza tienden a disminuir con elevación de la temperatura. La alcalinidad disminuye y el dióxido de carbono la aumenta.

La solubilidad de las sales de sodio es primeramente afectada por

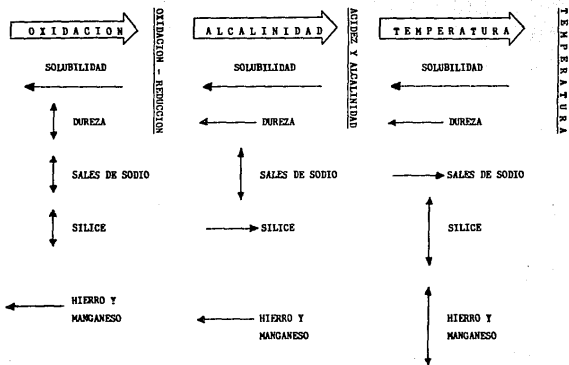


Fig. 2-2

temperatura, aumentándola. Los depósitos que contengan grandes -- cantidades de sodio son debido a una extrema concentración o a -- una evaporación hasta sequedad.

La solubilidad de la sílice aumenta conforme aumenta la alcalinidad. El hierro y el manganeso disminuyen su solubilidad conforme aumenta la alcalinidad y conforme aumenta el grado de oxidación. Por lo general las aguas naturales contienen menos de 1 ppm. de -- hierro soluble ya que al estar expuestas al aire el hierro se precipita como óxido férrico.

GASES DISUELTOS. -- Los gases que más preocupan en la mayor parte -- de los sistemas industriales son: oxígeno, dióxido de carbono y -- amoníaco.

La disolución de un gas en el agua tiene relación con tres factores:

- a) Su reacción química con ella o su presencia como gas libre
- b) Su presión parcial en el agua y en la atmósfera que lo rodea
- c) La temperatura del agua

El oxígeno no se ioniza al disolverse en agua permaneciendo como oxígeno libre y en esto difiere del dióxido de carbono y del amoníaco, ya que éstos hasta cierto punto están ionizados dependiendo de las condiciones químicas del agua. Sólo los gases en estado libre ejercen una presión en el agua y pueden ser removidos mecánicamente. El oxígeno puede removerse por deaeración y el CO_2 y -- el amoníaco lo serán únicamente en su parte presente como gas libre.

2.1.0. Pruebas de laboratorio para determinar la calidad del agua.

Para llevar a cabo un análisis de agua cruda es necesario efectuar las siguientes determinaciones:

- Dureza total.- Con esta determinación se obtiene el contenido total de calcio y magnesio, reportado en ppm. de CaCO_3 (ppm.).
- Dureza de calcio.- Se obtiene exclusivamente el contenido de calcio, expresándolo en ppm. de CaCO_3 .
- Dureza de magnesio.- Se obtiene por diferencia de la dureza total con respecto a la dureza de calcio reportada también en ppm. de CaCO_3 .
- Alcalinidades.- Mediante esta determinación se obtienen el valor de los aniones alcalinos (bicarbonatos y carbonatos), mediante la neutralización total con una solución valorada de ácido (sulfúrico) aprovechando la propiedad de dos sustancias indicadoras denominadas fenolftaleína y anaranjado de metilo, de cambiar el color al pasar de un medio alcalino a un medio ácido o viceversa.
- Cloruros.- Los aniones que se determinan normalmente en un agua cruda, además de los bicarbonatos y carbonatos son los cloruros, los cuales se encuentran combinados en forma de cloruros de sodio o en forma de cloruros de calcio y magnesio, constituyendo en estos últimos casos, junto con los sulfatos de calcio y de magnesio, dureza de no carbonatos.
- Sulfatos.- Este anión se encuentra combinado en la misma forma que los cloruros.
- Nitratos.- Es un anión que se encuentra generalmente en muy baja concentración en el agua (10 a 5 ppm. aprox.), y como prácticamente no produce ningún efecto perjudicial, se determina por medio del reactivo de brucina y un aparato fotométrico.

- Sílice.- Esta determinación es muy importante en vista que este compuesto produce incrustaciones muy duras y adherentes al metal, por efectos de calentamientos.
El valor de la sílice es equivalente a la concentración (ppm) titulable por medio del reactivo de molibdato y un aparato fotométrico.
- Gas carbónico.- El método está basado en la titulación de una muestra de agua con solución estándar de carbonato de sodio en presencia del indicador de fenolftaleína.
- Sólidos Totales.- Los sólidos totales del agua se determinan por evaporación si previamente se filtra el agua se obtienen únicamente los sólidos disueltos.
- Conductividad.- La conductividad específica es una medida de la capacidad del agua para transmitir una corriente eléctrica. Esta propiedad está relacionada a la concentración total de las sustancias ionizadas en el agua y a la temperatura a la que se efectuó la medición. Se expresa en micromhos/cm.
- PH.- Es una determinación muy importante para precisar el grado de acidez o alcalinidad de agua. Se expresa en unidades del 0 al 14.
- Por definición del pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno en el agua del producto de la concentración de iones de hidrógeno (H^+) y oxhidrilos (OH^-) como se disocia en agua, su $pK_w = 1 \times 10^{-14}$ cuando la concentración de iones hidrógeno cambia también la concentración de iones OH^- en proporción y en dirección opuesta, de tal manera que el producto de las dos concentraciones siempre es 1×10^{-14} . El valor del pH es el exponente de la concentración de iones hidrógeno sin el signo negativo.

Para llevar a cabo un análisis de control de calidad en agua de plantas desmineralizadoras es necesario efectuar las siguientes determinaciones:

Efluente de la unidad catiónica

- Acidez mineral libre (A.M.L.)

Esta prueba está basada en la determinación de los ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico de la muestra, correspondiente a los aniones presentes en el agua cruda. La titulación se efectúa con una solución estándar de carbonato de sodio.

En esta determinación el punto final de la reacción se obtiene con el cambio de color del indicador anaranjado de metilo.

- Dióxido de carbono en presencia de acidez mineral libre

En este método se determina la acidez total de la muestra, así como la Acidez Mineral Libre. La diferencia corresponde a la acidez por concepto del dióxido de carbono disuelto.

- Dureza total

Método de baja dureza.- En esta prueba se determinan las fugas de sales de calcio y magnesio del efluente de la unidad catiónica de las plantas desmineralizadoras.

El análisis se basa en la titulación de la dureza con un agente secuestrante EDTA en presencia de un indicador (negro de eriocromo) sensible a los iones de calcio y de magnesio. Al término de la reacción, cambia el color de la muestra de rojo a azul.

Efluente de la unidad aniónica o de la unidad de camas mezcladas

- Sílice

Método de baja concentración.- Este método está basado en la relación de la sílice soluble con un agente secuestrante (molibdato de amonio) determinando la concentración en un electrofotómetro.

3.0.0. Intercambio Iónico.

Intercambio iónico es un proceso en el cual los iones mantenidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales cargados situados en la superficie de un sólido, son cambiados por iones de carga similar de una disolución en la cual el sólido está inmerso. - El intercambio iónico se considera como un proceso de sorción, debido a que los grupos funcionales en los cuales ocurre el intercambio están en la superficie del sólido, y porque los iones cambiables deben sufrir una transferencia de fase desde una fase en solución a una fase superficial.

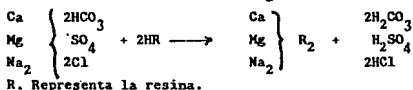
Los materiales de intercambio iónico son:

- zeolitas
- resinas carbonáceas
- resinas poliestirénicas

Las resinas en particular, son los intercambiadores de uso más común, debido a su alta resistencia mecánica y su gran velocidad de intercambio.

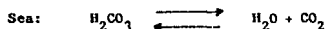
3.0.1. Desmineralización.

La desmineralización es un proceso de intercambio iónico en dos etapas, en la primera los iones metálicos positivos o cationes son intercambiados por iones hidrógeno de una resina catiónica en forma ácida como se muestra en la reacción siguiente:



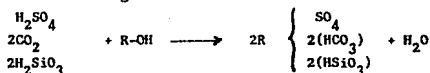
Cuando el hidrógeno reemplaza los otros cationes en el agua, se forman soluciones ácidas muy diluidas correspondientes a las sales de los bicarbonatos que formarán ácido carbónico como en la reacción anterior.

El ácido carbónico formará posteriormente CO_2 .



Y los sulfatos, cloruros y nitratos en el agua cruda formarán la acidez mineral libre.

En la segunda etapa, los iones negativos llamados aniones (sulfatos, cloruros y nitratos) son removidos por la resina aniónica, — siendo ésta del tipo fuertemente básica también removerá el CO_2 y la sílice conforme la siguiente reacción:



El CO_2 también puede ser removido por aereación. Aereación es una mezcla íntima de agua y aire, cuyo objeto es eliminar gases indeseables del agua, tales como ácido sulfídrico, bióxido de carbono y exceso de cloro. Este se lleva a cabo introduciendo aire con un soplador el cual tendrá contacto con el agua en un flujo a contracorriente en una torre desgasificadora.

Usando resinas débilmente básicas únicamente se removerán los áci-

dos fuertes, esto es el sulfúrico, clorhídrico y nítrico.

3.1.0. Características de los intercambiadores iónicos.

Las resinas de intercambio iónico son descritas como polímeros de alto peso molecular conteniendo en su estructura grupos iónicos como parte integral de la misma. Se fabrican en el caso de una resina catiónica por polimerización del estireno y reticulación con divinilbenceno seguida por sulfonación y, desde el punto de vista de control de calidad se debe controlar durante el proceso de fabricación de las resinas, algunos parámetros que resultarán en el cumplimiento de algunas propiedades tanto físicas como químicas, mismas que servirán como base de operación. Como la polimerización se lleva a cabo en fase líquida, en operación tipo "batch", es importante que en condiciones de proceso tales como tiempo de polimerización, velocidad de agitación, presión, temperatura, gasto y concentración de los reactivos sean también perfectamente controlados durante esta etapa.

La observación de los parámetros anteriores darán como resultado que las perlas del polímero formado posean tamaños y densidades adecuados, para que en operación posean un comportamiento hidráulico y cinético adecuado, así como estabilidad térmica y química y ser insolubles a la mayoría de los solventes más comunes.

Toda la funcionalidad y la eficiencia de las operaciones de intercambio iónico radican en los parámetros anteriores.

Siendo las características de los intercambiadores iónicos:

3.1.1. Tamaño del grano.

Las resinas tienen aspecto de partículas, generalmente en forma esférica de gran uniformidad de tamaño que suele variar entre 0.8 y 0.04 mm (20 y 400 mallas).

El tamaño del grano juega un papel muy importante en la eficiencia de las separaciones y determina también la resistencia hidrodinámica del lecho filtrante.

3.1.2. Naturaleza de los grupos activos.

Las resinas catiónicas débilmente ácidas absorben preferentemente iones hidrógeno y, por lo tanto, no pueden emplearse en soluciones ácidas, por dicha razón, los iones metálicos absorbidos se eliminan de la resina con sólo un ligero exceso de ácido. También estas resinas intercambian iones muy lentamente, a causa de que sus grupos activos están poco disociados, pero son más selectivas. Las resinas aniónicas fuertemente básicas permiten el intercambio de aniones en un amplio intervalo de pH, mientras que los débilmente básicos, sólo lo hacen en soluciones ácidas. A semejanza de las débilmente ácidas, las débilmente básicas intercambian iones OH^- preferentemente, con gran lentitud pero selectividad.

3.1.3. Capacidad de intercambio.

La capacidad total mide la cantidad de iones intercambiables por unidad de resina seca a 105°C (mequiv./gr) o por unidad de resina hinchada en agua (mequiv./ml), se determina por valoración ácido-base.

3.1.4. Hinchamiento.

Cuando la resina se introduce en agua o en una solución muy diluida, la concentración iónica interior del grano de resina es más alta que en la solución y como consecuencia del efecto osmótico, tiene lugar un hinchamiento del grano, que dependerá de la densidad de carga del grano y de la concentración del electrolito externo, así como del grado de reticulación de la resina, polaridad del disolvente y de la carga y radio de los contraiones o iones cambiables de la resina, siendo éstos para la catiónica ácida el hidrógeno.

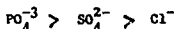
3.1.5. Grado de reticulación o entrecruzamiento.

Un grado de entrecruzamiento grande influye, además de un hinchamiento menor y solubilidad, en un tamaño de poros más pequeño, mayor selectividad y en una menor capacidad y velocidad de intercambio.

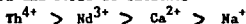
Las resinas comunes son copolímeros con el 4-8% de D.V.B. y el resto de estireno. Así la Dowex 50 x 8 contiene 8% de D.V.B. y 92% de estireno.

3.1.6. Selectividad iónica.

En general, la selectividad de una resina para el intercambio iónico depende de la carga y tamaño de los iones. Como podría esperarse, la influencia más importante es la magnitud de la carga del ión, ya que una resina prefiere contraiones de elevada valencia. - Así, para una serie de aniones típicos encontrados en los tratamientos de aguas y aguas residuales, podría esperarse el orden de preferencia siguiente:



De una forma similar, para una serie de cationes



La preferencia para contraiones de elevada carga aumenta con la dilución del electrólito externo y es más fuerte para resinas de elevada concentración interna. Este fenómeno se explica por medio de la Teoría de Donnan.

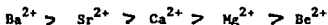
Quando la resina se pone en contacto con una disolución diluida, - existe una diferencia de concentraciones grande entre los iones intercambiables. Si las partículas no tuvieran carga, estas concentraciones se equilibrarían por simple difusión. Sin embargo, dado que las partículas están cargadas, el movimiento está restringido. Considérese una resina catiónica, por ejemplo, se produce una migración de cationes dentro de la solución y aniones dentro de la resina resultando en la acumulación de una carga neta negativa en la resina y una carga neta positiva en la solución. Esta migración

iónica inicial establece una diferencia de potencial entre las dos fases (potencial de Donnan), que se opone a cualquier migración posterior que causará una desviación en la neutralidad eléctrica. La existencia de este potencial produce una repulsión de los contraiones en la resina, evitando que se alcance en la resina una concentración superior al valor de equilibrio, el cual suele ser inferior al valor que existe en la disolución y, por lo tanto, atrae contraiones de la solución para reemplazar aquellos iones que deja la resina. La fuerza de atracción iónica es proporcional a la carga del ión y por lo tanto, los contraiones de elevada valencia son atraídos más fuertemente. Cuando se alcanza el equilibrio, el potencial disminuye hasta cero. Para disoluciones muy concentradas concentraciones superiores a 3 moles por litro, las diferencias en los potenciales de intercambio para iones de distintas cargas son más pequeños.

Un segundo factor que influye en la selectividad iónica es la presión de hinchamiento de la resina. En un disolvente polar como el agua, los grupos activos de la resina y los iones móviles en las fases resina y disolución tienden a solvataarse. La solvatación o hidratación de los iones ejerce una presión de hinchamiento dentro de la resina. Esta presión está incrementada por las fuerzas de repulsión entre los grupos iónicos fijos y está contrarrestada por los enlaces de reticulación que unen a la partícula. Para una resina y solución electrolítica en agua, el radio de solvatación influye en las variables que afectan a la presión, con el resultado de que las resinas prefieren a los iones con menor radio de solvatación. En una serie iónica de igual carga, el ión con menor radio en la fase en disolución ocupa el primer lugar de la serie. A continuación se da el orden de preferencia:



y para los alcalinotérreos



Se observará que para cada serie, la preferencia ausenta con el número atómico y el radio iónico y disminuye con el radio de solvatación.

El tercer factor que influye en la selectividad es la interacción iónica dentro de la resina y en el volumen de la disolución. La resina prefiere como regla general los contraiones que presentan mayor afinidad para los grupos iónicos fijos.

El último factor significante en la selectividad iónica es la acción tamizadora o de filtración. Los iones orgánicos y los complejos inorgánicos son muy a menudo demasiado grandes para penetrar la matriz de la resina. Este efecto es mucho más pronunciado con resinas de un grado elevado de reticulación.

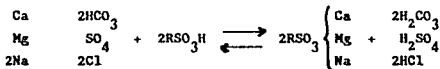
3.2.0. Clasificación de resinas de intercambio iónico.

Los grupos ionizables adheridos a la estructura de la resina determina la capacidad funcional del intercambiador. Las resinas utilizadas industrialmente en tratamiento de agua, pueden clasificarse como sigue:

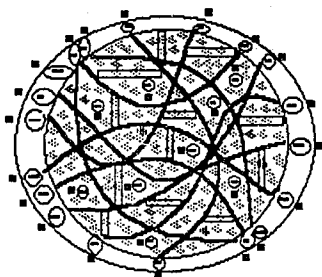
- a) Resinas catiónicas fuertemente ácidas
- b) Resinas catiónicas débilmente ácidas
- c) Resinas aniónicas fuertemente básicas
- d) Resinas aniónicas débilmente básicas

Resinas catiónicas fuertemente ácidas.- Pueden convertir las sales neutras en sus correspondientes ácidos, esta habilidad se conoce como "Divisora de Sales" y distingue las características del agua tratada por resinas fuertes y débiles.

La resina catiónica esquematizada en la Fig. 3-1 deriva su actividad de intercambio de grupos funcionales sulfónicos (HSO_3^-). Cuando opera en el ciclo hidrógeno, removerá casi todos los cationes conforme a la siguiente reacción:

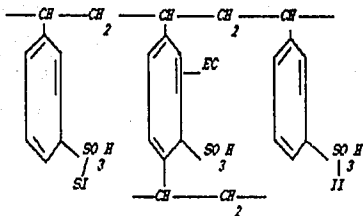


En donde R representa la matriz completa de la resina. Debido a que estas reacciones son reversibles, cuando la capacidad de la resina se ha agotado, puede recuperarse a través de la regeneración con un ácido mineral. Las resinas fuertemente ácidas funcionan bien a todos los rangos de pH y pueden transformar las sales neutras en sus correspondientes ácidos, se emplean tanto en ciclo sódico para suavización, de alcalización y desmineralización.



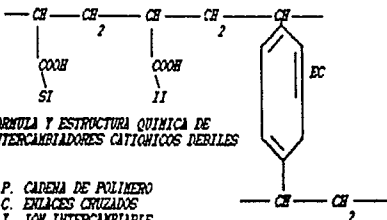
- ◊ AGUA DE HIDRATACION.
- ⊖ SITIOS FIJOS CARGADOS NEGATIVAMENTE. SO₃⁻
- SITIOS MOVILES CARGADOS POSITIVAMENTE INTERCAMBIABLES. Na⁺
- ▬ LIGADURA DE DIVINILRENCENO.
- ✓ CADENA POLIESTIRENICA.

FIG. 3-1



FORMULA Y ESTRUCTURA QUIMICA DE INTERCAMBIADORES CATIONICOS FUERTES

C.P.

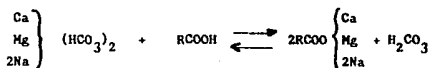


FORMULA Y ESTRUCTURA QUIMICA DE INTERCAMBIADORES CATIONICOS DEBILES

C.P. CADENA DE POLIMERO
 E.C. ENLACES CRUZADOS
 I.I. ION INTERCAMBIABLE
 S.I. SITIO DE INTERCAMBIO

FIG. 3-2

Resinas catiónicas débilmente ácidas.- Tienen grupos carboxílicos (-COOH) y cuando son operadas en el ciclo de hidrógeno, pueden remover cationes asociados con la alcalinidad de bicarbonatos. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



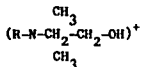
Estas reacciones son también reversibles y permiten la regeneración ácida. Debe entenderse que las resinas catiónicas débiles no remueven cationes asociados con radicales ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos. Debido a que la diferencia fundamental entre las resinas catiónicas débiles y fuertes es su relativa afinidad por el ión hidrógeno. Una resina fuerte como ya se observó, tiene un grupo funcional fuerte que es el ácido sulfónico, -- que es altamente ionizable mostrando poca afinidad por el ión hidrógeno. En contraste con la resina débil la cual contiene un grupo funcional débil siendo éste un ácido carboxílico el cual se ioniza poco, mostrando gran afinidad por los iones hidrógenos.

La principal ventaja o característica sobresaliente de las resinas débiles ácidas es su alta eficiencia en regeneración lo cual no solamente reduce la cantidad de ácido requerido para regeneración, sino que también disminuye los problemas que descarga de -- desperdicio.

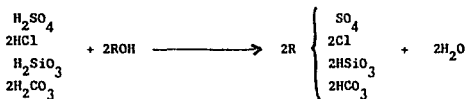
Resinas aniónicas fuertemente básicas.- Derivan su funcionabilidad del intercambio en la estructura del amonio cuaternario y hay dos tipos de grupos funcionales referidos como tipo I y II. En el tipo I se tiene un radical cuaternario de amonio (se tienen 3 grupos metilos).



Con una pequeña modificación, un grupo etanol reemplaza a uno de los grupos metilo en las resinas tipo II.



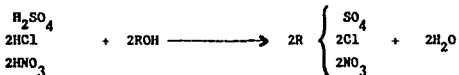
La principal diferencia entre estas dos resinas es que la tipo I tiene una estabilidad química mayor, mientras que la tipo II tiene mayor eficiencia en regeneración y mayor capacidad. En la forma de hidróxido, las resinas fuertemente básicas removerán todos los ácidos inorgánicos comúnmente encontrados conforme a las siguientes reacciones:



Las reacciones son también reversibles y la regeneración es con álcalis fuertes tales como la sosa cáustica.

Las resinas fuertemente básicas funcionan en todo el intervalo del pH y pueden alterar una sal neutra hasta su base correspondiente.

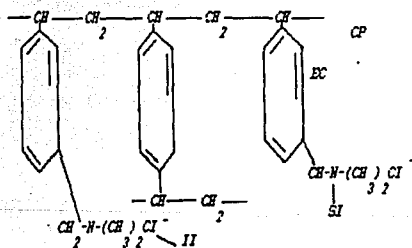
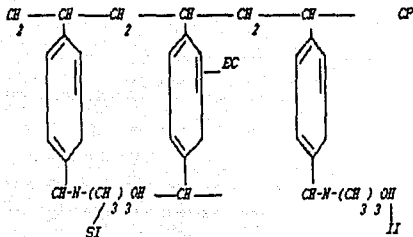
Resinas débilmente básicas.— Tienen como grupo funcional aminas primarias R-NH₂, aminas secundarias R-NH-R o aminas terciarias —NR. Solamente pueden eliminar ácidos altamente disociados (H₂SO₄, HCl y HNO₃) y la reacción es la siguiente:



Las resinas débilmente básicas se regeneran con sosa cáustica, — carbonato de sodio o amoníaco y su eficiencia en regeneración es

mayor que la de las resinas fuertemente básicas.

Las resinas débilmente básicas no remueven ácidos débiles tales - como el silfúico y el carbónico.



C.P. CADENA DE POLIMERO
 E.C. ENLACE CRUZADO
 I.I. ION INTERCAMBIABLE
 S.I. SITIO DE INTERCAMBIO

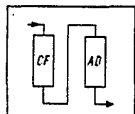
Fig. 3-3

3.3.0. Sistemas desmineralizadores más comunes.

Dependiendo de la calidad del suministro de agua y de remoción de sales solubles que se necesitan, se selecciona el sistema de intercambio iónico.

ARREGLOS COMUNMENTE ENCONTRADOS EN DESMINERALIZACION

SISTEMA DESMINERALIZADOR



APLICACION

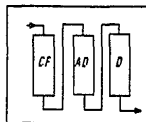
No se requiere remoción de sílice y CO_2 .

EFLUENTE TÍPICO

Conductividad específica 10 a 30 micromhos/ cm^3 .

CARACTERÍSTICAS

Costos bajos de equipo y regenerante.



No se requiere remoción de sílice - pero sí de CO_2 .

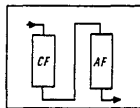
Conductividad específica 10 a 20 micromhos/ cm^3 .

Costo bajo regenerante, pero requiere adición de bombas.

Agua pretratada con alcalinidad baja. - Se requiere remover el sílice.

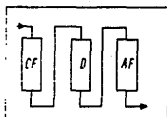
Conductividad específica de 5 a 15 micromhos/ cm^3 sílice 0.02 a 0.10 ppm.

Costo bajo de equipo. Costo alto de reactivos.



En donde C.F.= Catión Fuerte, C.D.= Catión Débil, D.= Desgasificador, A.F.= Anión Fuerte, A.D.= Anión Débil, L.M.= Lecho Mixto.

SISTEMA DESMINERALIZADOR



APLICACION

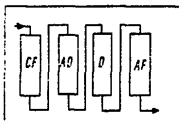
Alcalinidad alta.
Se requiere remo-
ción de sílice.

EFLUENTE TIPICO

Conductividad especifi-
ca 5 a 15 micromhos/ —
ca³. Sílice 0.02 a 0.10
ppm.

CARACTERISTICAS

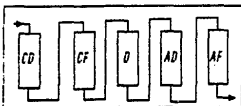
Costo bajo de regene-
rante. Se requiere -
adición de bombas.



Alcalinidad alta.
Sulfato igual a -
cloruros. Se re-
quiere remoción -
de sílice.

Conductividad especifi-
ca de 5 a 15 micromhos/
ca³. Sílice 0.02 a 0.10
ppm.

Costo bajo de regene-
rante. Costo alto de
equipo. Se requiere
adición de bombas.

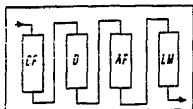
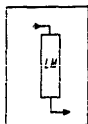
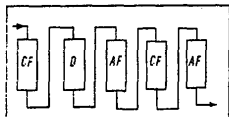


Dureza, alcalini-
dad, sulfatos y -
cloruros altos. -
Se requiere remo-
ción de sílice.

Conductividad especifi-
ca de 5 a 15 micromhos/
ca³. Sílice 0.02 a 0.10
ppm.

Costo bajo regeneran-
tes. Costo alto de -
equipo. Se requiere
adición de bombas.

SISTEMA DESMINERALIZADOR



APLICACION

Alcalinidad y contenido de sodio altos. Calidad alta del efluente esperado.

Contenido bajo de sólidos. Calidad alta del efluente esperado.

Contenido de sólidos disueltos y alcalinidad altos. - Calidad alta del efluente esperado.

EFLUENTE TIPICO

Conductividad específica 1 a 5 $\mu\text{mhos}/\text{cm}^3$. Sílice 0.01 a 0.05 ppm.

La conductividad específica es menor de 1 $\mu\text{mho}/\text{cm}^3$. Sílice 0.01 a 0.05 ppm.

La conductividad específica es menor de 1 $\mu\text{mho}/\text{cm}^3$. Sílice 0.01 a 0.05 ppm.

CARACTERISTICAS

Costo bajo de regenerante. Costo alto de equipo. Se requiere adición de bombas.

Costo alto de regenerante. Costo bajo de equipo. Requiere adición de bombas.

Costo bajo de regenerante. Costo alto de equipo. Requiere adición de bombas.

3.4.0. Consideración antes de seleccionar el proceso de intercambio iónico.

Los pasos a seguir en el diseño de un proceso de suavización son los siguientes:

1. Flujo del agua a tratar.
2. Análisis del agua cruda.
3. Calidad requerida en el efluente. Se selecciona tomando en cuenta las fugas del sistema de suavización.
4. Necesidades futuras de la planta, o cambios en la demanda de calidad del agua.
5. Seleccionar el suministro de agua.
6. Determinar el espacio disponible para la planta.
7. Investigar equipos similares operando con esta calidad de agua.

Después de tener estos datos se procede a:

1. Seleccionar el tipo de intercambiador iónico adecuado.
2. Seleccionar los procedimientos de regeneración.
3. El sistema puede consistir de dos unidades absorbiendo una toda la carga, mientras la otra se está regenerando, o bien de una sola, con capacidad suficiente para poder almacenar agua en un tanque, mientras se regenera.
4. Capacidad de la resina. Los intercambiadores de iones que normalmente se encuentran en el mercado son del tipo de poliestireno sulfonado (amberlite 120, permutit 100, etc.), tienen capacidades de acuerdo con el nivel de regeneración.

Nivel de regeneración.— Es aquella cantidad de regenerante que se debe agregar a la resina a fin de recuperación, es función del porcentaje de fugas tolerable que se requiera en el proceso.

5. Volumen de resina. Está dado por:

$$\text{Vol. de la resina} = 0.0035 \frac{(\text{Gasto de}) (\text{Dureza en el}) (\text{Tiempo de})}{(\text{Agua}) (\text{Agua cruda}) (\text{Regeneración})} \frac{(\text{G.P.M.}) (\text{p.p.p.}) (\text{horas})}{(\text{Capacidad de la resina})(\text{Kg} / \text{ft}^3)}$$

6. Calcular la cantidad de regenerante, basada ésta en el nivel -

de regeneración.

7. Diámetro del tanque (ver hoja anexa).

8. Altura del tanque. Está dada por: profundidad del lecho por -- factor de expansión.

La zeolita al estar regenerándose y lavándose, sufre una expansión, y el tanque debe estar diseñado para esta expansión. Generalmente se considera de un 50% a un 75% de expansión.

9. Profundidad de lecho = Volumen de la resina

Arca

La profundidad adecuada del lecho debe fluctuar entre:

Prof. máxima = 72 pulg.

Prof. mínima = 30 pulg.

10. Caída de presión. Es función del tipo de resina, la temperatura del agua y la velocidad superficial. Existen gráficas para calcularla en los catálogos de los fabricantes.

11. Flujo de retrolavado.

El tiempo de retrolavado más común es de diez minutos.

12. Flujo de enjuague. Se calcula también según la información -- proporcionada por el fabricante. Así mismo se calcula el flujo de introducción de regenerante dado que éste recomienda los niveles de regeneración óptimos para el sistema de desmineralización.

7. Diámetro del tanque. Es función del flujo de agua a tratar y - de la velocidad superficial.

CRITERIOS DE DISEÑO

Diámetro	Area pie ²	Mfn. Resina pie ³ a 30"	Retrolavado, gpm			Flujo de scrv. gpm máx		
			+	‡	&	1 unidad	2 unidades	3 unidades
2' - 0"	3.14	8	9	19	38	19	25	50
2' - 6"	4.91	12	15	30	59	30	40	80
3' - 0"	7.07	18	21	42	85	42	56	112
3' - 6"	9.62	24	29	58	116	58	77	154
4' - 0"	12.6	32	38	75	150	75	100	200
4' - 6"	15.9	40	48	95	190	95	130	260
5' - 0"	19.6	49	59	118	235	118	160	320
5' - 6"	23.8	60	71	143	285	143	190	380
6' - 6"	33.2	83	100	200	400	200	270	540
7' - 0"	38.5	96	115	230	460	230	310	620
7' - 6"	44.2	110	132	265	530	265	350	700
8' - 0"	50.3	126	150	300	600	300	400	800
8' - 6"	56.8	142	170	340	680	340	450	900
9' - 0"	63.6	160	190	380	760	380	500	1000
9' - 6"	70.9	176	213	425	850	425	570	1140
10' - 0"	78.5	196	235	470	940	470	630	1260
11' - 0"	95	240	285	570	1140	570	750	1500

• El flujo de servicio se basa sobre velocidades de 6 gpm/pie², velocidad máxima para una sola unidad, y 8 gpm/pie², velocidad a — corto plazo, en unidades múltiples cuando una unidad se halla fuera de servicio para ser regenerada. Para suministrar un abastecimiento continuo de agua tratada, la mayor parte de las plantas emplean dos unidades, de manera que cuando una de ellas está siendo regenerada, la otra continúa para suministrar agua terminada. Las plantas que tienen una demanda variable almacenan el agua terminada para evitar la producción de olas en el flujo, minimizando así

el tamaño del equipo. El almacenamiento de agua tratada permite a las plantas más pequeñas la instalación de una unidad tan solo, - confiando en que el agua almacenada satisfaga la demanda durante la regeneración.

Esto es riesgoso, ya que no permite margen de error o para el mantenimiento normal.

+ Velocidad de retrolavado de 3 gpm/pie² para resinas de aniones a 70°F.

‡ Velocidad de retrolavado de 6 gpm/pie² para resinas de cationes a 70°F.

& Velocidad de retrolavado de 12 gpm/pie² para resinas de cationes a 220°F.

3.5.0. Componentes que conforman el equipo de intercambio iónico.

Los elementos básicos de una unidad comercial típica son:

- 3.5.1. Tanque vertical, que contiene la resina de intercambio iónico más un espacio suficiente para expansión de la resina en la etapa de -
contralavado. Estos tanques se fabrican con placas de acero al car-
bón, recubiertos en su interior con materiales resistentes a áci-
dos y álcalis en el proceso de regeneración. En caso de suavizado-
res se utilizan tanques sin recubrimiento. Además se analizarán -
los distribuidores y componentes internos tal como se esquematizan
en las Figs. 3-4A y 3-4B.

Las dimensiones comerciales varían de 30 cm. a 300 cm. de diámetro
con alturas de lecho de resina de 60 a 180 cm. Una vez calculado -
el volumen de resina se decidirá sobre las unidades a usar así co-
mo de sus dimensiones.

3.5.2. Distribuidores: Se cuenta con tres tipos de éstos.

- a) Distribuidor Superior.- Distribuye el flujo descendente o colecta -
el flujo descendente en unidades pequeñas; estos equipos pueden -
consistir de tubos perforados o baffles y en equipos grandes se -
instalan equipos que además de distribuir el flujo evitan la fuga
de resina por un alto retrolavado.

Los materiales de construcción se seleccionan de acuerdo a las con-
diciones presión, temperatura, pH, concentración salina, bajo las
cuales operará el equipo. Ver Figs. 3-5A y 3-5B.

- b) Distribuidores Inferiores.- Distribuyen el flujo descendente.

Para mantener una buena distribución de flujo durante todo el le-
cho del intercambiador de iones, los distribuidores superiores de-
ben ser compatibles con el diseño del colector inferior. Ver Figs.
3-6A, 3-6B y 3-6C.

- c) Distribuidores de Regenerante.- Generalmente consisten en una se-
rie de tubos; en las perforaciones tienen un tamaño y un número re

querido para mantener una caída de presión que permita que el flujo de regenerante cubra el área total del lecho. Este distribuidor se coloca normalmente a 15 cm. arriba del nivel superior del intercambiador de iones en su forma iónica agotada que tenga el volumen mayor.

El volumen de las resinas cambia en función de la forma iónica, - por eso es importante tomar en cuenta el cambio de volumen en sus diferentes formas iónicas, y de este modo evitar colocar el distribuidor en una sola posición que de una mala distribución del flujo regenerante.

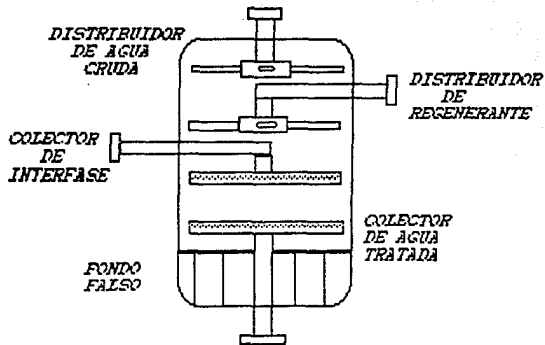
Estos distribuidores deberán fabricarse con materiales resistentes a la corrosión y a la acción de ácidos y sosa cáustica. Ver - Figs. 3-7A y 3-7B.

- d) En unidades de lecho mezclado, debe de tener un colector de interfase como se esquematiza en la Fig. 3-8.

3.5.3. Controles:

- a) Controles de flujo: Es importante colocar controles de flujo en - la entrada de las unidades, para medir con la mayor precisión los flujos de servicio, retrolavado, enjuague y agua de dilución de - regenerantes.
- b) Conductímetro: Normalmente se colocan conductímetros a la salida de las unidades aniónicas que determinan la calidad del agua producida y también detectar el proceso de enjuague, ya que la conductividad del agua se ve afectada por la naturaleza de los iones presentes en el agua.
- c) Válvulas: Estas servirán únicamente para controlar flujos y una - distribución adecuada en el sistema. Para evitar confusiones, toda válvula usada en el sistema hidráulico debe ser seleccionada - adecuadamente, las cuales deben contar con indicadores de posición.

- d) **Sistemas de Regeneración:** Es importante recordar que la introducción de los regenerantes si no es controlada adecuadamente puede causar serios problemas tanto al equipo como a la resina I.I.



INTERNOS DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO IONICO.

Fig. 3-4A



LATERALES.



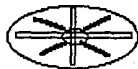
DISTRIBUIDOR
AXIAL

TRAMPAS DE RESINA

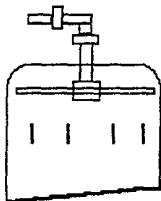
COMPONENTES INTERNOS DE COLECTORES
Y DISTRIBUIDORES

Fig. 3-4B

**VISTA
SUPERIOR**



**ENTRADA
DE AGUA
CRUDA**



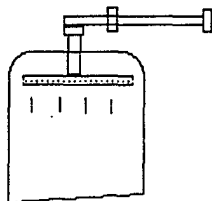
**DISTRIBUIDOR DE AGUA CRUDA.
ESTE CONSISTE DE UN EJE CON LATERALES
RADIALES, SUS CARACTERISTICAS SON SIMI-
LARES AL DISTRIBUIDOR DE LA FIGURA AN-
TERIOR. LA ELECCION DE UNO U OTRO DE--
PENDE DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO.**

Fig. 3-5A

VISTA
SUPERIOR



ENTRADA
AGUA
CRUDA.



DISTRIBUIDOR DE AGUA CRUDA.

DISTRIBUIDOR TIPO CAREZAL CON LATERALES. EL MATERIAL ES DE ACERO INOXIDABLE. EL DISEÑO HIDRAULICO DEBE PERMITIR UNA DISTRIBUCION UNIFORME DEL FLUJO DE ENTRADA ASI COMO COLECTOR DE AGUA DE RETROLAVADO. TAMBIEN PUEDE UTILIZARSE MATERIAL PVC O ACERO AL CARBON CON RECURRIMIENTO DE HULE.

Fig. 3-5B

VISTA
SUPERIOR



COLECTOR
DE
AGUA



SALIDA DE AGUA

AQUI SE MUESTRA EL CONSTRUIDO POR CARE-
ZAL Y LATERALES, CUYO MATERIAL SERA EL
APROPIADO (ACERO INOXIDABLE). DEBE TE-
NER SUFICIENTE CAPACIDAD PARA COLECTAR
EL AGUA TRATADA O EL REGENERANTE GASTADO

Fig. 3-6A

VISTA
SUPERIOR



COLECTOR
DE
AGUA



SALIDA DE AGUA

TIPO: EJE CON LATERALES RADIALES.

Fig. 3-6B

VISTA
SUPERIOR



COLECTOR
DE
AGUA



TIPO: PLACA PERFORADA Y CON TRAMPAS DE RESINA. LA PLACA ES DE AC. AL CARBON CON RECUBRIMIENTO.

Fig. 3-6C

VISTA
SUPERIOR

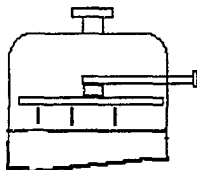
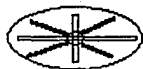


ENTRADA
DE
REGENE-
RANTE.

DISTRIBUIDOR DE REGENERANTE.
TIPO CAREZAL CON LATERALES. EL MATERIAL DE CON-
STRUCCION DEBE SER RESISTENTE A LOS REGENERANTES
SE PREFERE ACERO INOXIDABLE CUANDO SE EMPLEA -
 H_2SO_4 o $NaOH$. SE USA TAMBIEN MATERIAL PLASTICO.
DEBE PERMITIR EL CONTACTO INTIMO ENTRE REGENE-
RANTE Y RESINA. DEPENDIENDO DE LA DISTRIBUCION,
LA REGENERACION DEL LECHO SE HARA TOTAL O PARCI-
ALMENTE.

Fig. 3-7A

VISTA
SUPERIOR

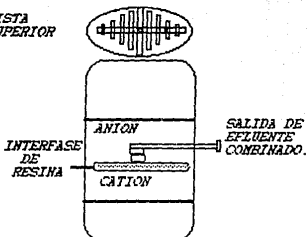


ENTRADA
DE
REGENE-
RANTE.

DISTRIBUIDOR DE REGENERANTE.
ESTE ES DEL TIPO EJE CON LATERALES RADIALES.
SU FUNCIONAMIENTO ES SIMILAR AL ANTERIOR. EL
DISTRIBUIDOR ESTARÁ COLOCADO A UNA ALTURA QUE
CONSIDERE LA EXPANSION DEL LECHO DE RESINA --
DURANTE EL RETROLAVADO.

Fig. 3-7B

VISTA
SUPERIOR



COLECTOR INTERFASE.

(LECHO MIXTO)

DEBE ESTAR DISEÑADO, PARA COLECTAR EL FLUJO DESCEN-
DENTE DE NaOH Y EL FLUJO ASCENDENTE DE H_2SO_4 , DE
TAL FORMA QUE LA DISTRIBUCION SEA UNIFORME DEL RE-
GENERANTE Y SU DESPLAZAMIENTO, ASI COMO EL ENJUAGUE.
EL SOPORTE DEBE SER ADECUADO PARA QUE RESISTA AMBOS
MOVIMIENTOS DE FLUJO.

Fig. 3-8

3.6.0. Principios de operación en unidades de intercambio iónico.

Cuando el efluente de la unidad catiónica pasa a la aniónica por diseño del equipo se acostumbra regenerar primero la unidad catiónica y después la aniónica, durante el enjuagado de la aniónica - la conductividad baja rápidamente como se muestra en la Fig. 3-9 y la entrada en servicio del desmineralizador puede iniciarse - cuando la sílice y la conductividad son satisfactorias. Los valores en este punto se llaman finales de enjuague. Durante la corrida la sílice será el primer ión que aparezca en cantidades excesivas como síntoma de agotamiento pero no será detectada por cambio en conductividad, debido a que la solubilidad de la sílice es función de la alcalinidad o acidez indicada en la Fig. 2-2 y por ser uno de los iones por los que tiene menor selectividad la resina - fugará primero, y por esta razón es común operar las unidades con control mediante medición de volumen que pasa suspendiendo su operación antes del punto de agotamiento. En las unidades catiónicas en servicio, el sodio será el primer catión en aparecer al aproximarse el agotamiento y ya que la unidad aniónica no lo removerá, - la conductividad después de ella se elevará pero la sílice se mantendrá baja.

La Fig. 3-9 muestra también que el agotamiento del anión ocasiona una caída en pH mientras que el del catión causa una elevación. - Así mismo muestra las variables en la desmineralización de agua, - de ellas la más fácilmente medible es la conductividad, la cual - es una indicación directa del contenido de electrólitos totales - (cationes y aniones en el agua tratada) y puede convertirse a ppm como sigue:

Después de una unidad aniónica fuerte 5 microshos = 1 ppm CaCO_3 . La sílice no contribuye a la conductividad del agua, así que se - requiere una prueba especial para ella, el dióxido de carbono sí contribuye a la conductividad.

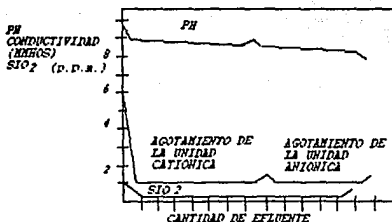


Fig. 3-9

Si en un desmineralizador el agotamiento sucede repetidamente antes de lo esperado, esto será un indicio de que probablemente el contenido de iones en el agua cruda haya aumentado, lo que deberá comprobarse y establecerse el nuevo control por volumen tratado. Durante un periodo de bajo flujo, la conductividad después de la unidad aniónica puede elevarse momentáneamente y restablecerse — después de algunos minutos, pero si la unidad ha estado fuera de servicio por 1 hora o más tiempo, deberá enjuagarse hasta que su efluente tenga las características aceptables.

OPERACION DE LA UNIDAD CATIONICA.— La suma de sulfatos, cloruros y nitratos en el agua cruda se llama acidez mineral teórica (AMT) la acidez actual en el agua después del catión se llama acidez mineral libre (AML), y se determina mediante un análisis. Si el intercambio catiónico fuera 100% completo y todo el calcio, magnesio y sodio se intercambiarán por hidrógeno, la AML deberá ser igual a la AMT, sin embargo, a no ser que se empleen en cantidades prohibitivas de ácido existirá una pequeña cantidad de cationes — por intercambiar, a la cual se le llama fuga catiónica y ésta ocasiona la diferencia entre AMT y AML. Debido a esta fuga la AML —

será usualmente inferior a la AMT y ya que las resinas retienen - los cationes divalentes (calcio y magnesio) mejor que los monovalentes (sodio), la fuga catiónica será de sodio y éste pasará a través de la unidad aniónica que es el origen de la conductividad y contenido total de electrólitos del agua desmineralizada. Fugas elevadas ocasionarán elevadas conductividades, esto es agua de baja calidad. La fuga frecuente en unidades catiónicas es de 2% de los cationes en agua cruda.

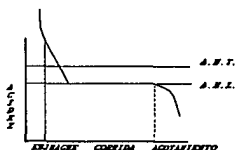
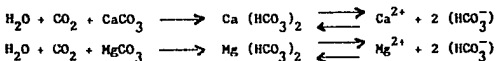


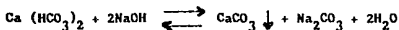
Fig. 3-10

Como se muestra en la Fig. 3-10, la fuga en la unidad catiónica - es constante y la corrida puede iniciarse cuando la AML sea 10 - ppm. superior a la AMT (o 10% mayor si la AMT es superior a 100 - ppm.). Si la unidad aniónica es regenerada inmediatamente después del enjuague del catión, el punto final de enjuagado catiónico - puede considerarse con 500-1000 ppm. de AML. Al aproximarse el - fin de la corrida aumenta marcadamente la fuga catiónica y se prescinde o se considera necesaria la regeneración cuando esta fuga aumenta hasta un 4% de los cationes totales en agua cruda, o que la AMT disminuye el 10% de lo normal.

La regeneración de la unidad aniónica debe efectuarse con agua - catiónica evitando depósito de hidróxido de magnesio y carbonato - de calcio. Ya que la alcalinidad y dureza del agua está dada por las siguientes reacciones:



En donde los bicarbonatos de calcio reaccionarán con los OH^- del regenerante dando las siguientes reacciones:



En donde el CaCO_3 | es un compuesto insoluble, y



Siendo el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ | un compuesto insoluble.

En la regeneración de aniones, por ser un proceso lento se requiere un tiempo de contacto más elevado siendo éste de 25 a 45 minutos para las fuertes. La solución empleada de sosa cáustica normalmente tiene una concentración entre 2 y 5% y en las unidades que remueven sílice se recomienda que ésta se efectúe a una temperatura de 45° aproximadamente.

LECHOS MIXTOS.— Estos equipos cuyo principio de operación se basa al igual que las unidades desmineralizadoras en la utilización de resinas de intercambio iónico, se utilizan como complemento en los sistemas de tratamiento de agua de repuesto para dar un pulido final al agua que será suministrada al proceso, logrando bajar la conductividad de la misma a valores entre 0.1 y 1 mmhos-cm.

Estos pulidores son instalados después de las unidades desmineralizadoras u otros equipos como son: Evaporadoras de agua de mar, etc., como se indica en la Fig. 3-11.

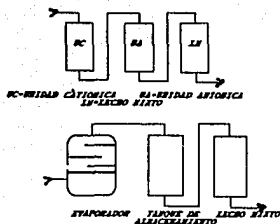


Fig. 3-11

Así los pulidores eliminan las fugas que pudieran tener las unidades pulidoras o los sólidos arrastrados al destilado en las evaporadoras, dependiendo del caso que se trate.

Principio de operación: Se basa en el mismo principio de intercambio que las unidades desmineralizadoras, pero éste a diferencia, utiliza una mezcla de resinas catiónicas y aniónicas donde tiene lugar una desionización de múltiple efecto funcionando cada par de resinas contrastadas, como una etapa del tratamiento.

Esto produce un efluente de muy baja concentración iónica, ampliamente superior al obtenible mediante la operación convencional de dos unidades independientes (catiónica y aniónica).

Al mezclar una cantidad equivalente de resina fuertemente básica con una cantidad equivalente de resina fuertemente ácida, es posible lograr una desionización completa de una solución, manteniendo el pH neutro a través de todo el proceso de intercambio.

Para alcanzar una desionización a pH neutro, es esencial remover simultáneamente ambos cationes y aniones.

Es interesante hacer notar que la razón de intercambio de resinas catiónicas y aniónicas debe ser aproximadamente la misma para permitir al intercambio de la mezcla mantener el pH constante. En la Fig. 3-12 se observa el comportamiento de un lecho mixto en la desionización de una solución de NaCl con resinas IR-120 e IRA 400.

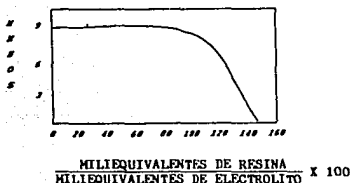


Fig. 3-12

Esto muestra que la fuga de sodio no es problema con esta técnica y que es capaz de producir agua que alcance una conductividad de 10^{-7} mhos-cm.

Debido a que el aspecto económico de la mayoría de las operaciones de desmineralización requieren considerar el capital de inversión de las resinas, la habilidad para regenerarlas y reusarlas es muy importante.

Para poder regenerar químicamente las resinas, se requiere una separación física de ambas. La separación puede ser basada en dos factores: tamaño y densidad diferencial de los componentes. Es posible seleccionar un intercambiador fuertemente básico y uno fuertemente ácido cuyos tamaños de partículas y densidad diferencial sea tal que se logre fácilmente una separación hidráulica, y mediante retrolavados, un operador pueda fácilmente separar las resinas.

Ahora bien, aunque la calidad de los efluentes no es comparable -

con la lograda con la mezcla de resinas fuertemente ácida y básica, pueden hacerse combinaciones de resinas fuertes y débiles y viceversa.

Debido al equilibrio y a las reacciones de intercambio involucradas, estas combinaciones no dan calidad de efluentes mejores a 1 mho-cm.

La combinación que emplea base-débil - ácido-fuerte, no permite eliminar CO_2 , B_2O_3 y SiO_2 . Sin embargo este proceso es importante porque es altamente eficiente y puede usarse donde no se requieran remover dichos componentes.

Una comparación de diferentes combinaciones se observa en la tabla siguiente:

<u>RESINA CATIONICA</u>	<u>RESINA ANIONICA</u>	<u>CALIDAD DEL EFLUENTE</u>	
		<u>Mhos-cm</u>	
Fuerte ácido	Fuerte base	0.1	
Fuerte ácido	Débil base	1	- 10
Débil ácido	Fuerte base	1	
Débil ácido	Débil base	100	- 1000

El proceso de desionización con lecho mixto, se ilustra en la Fig. 3-13.

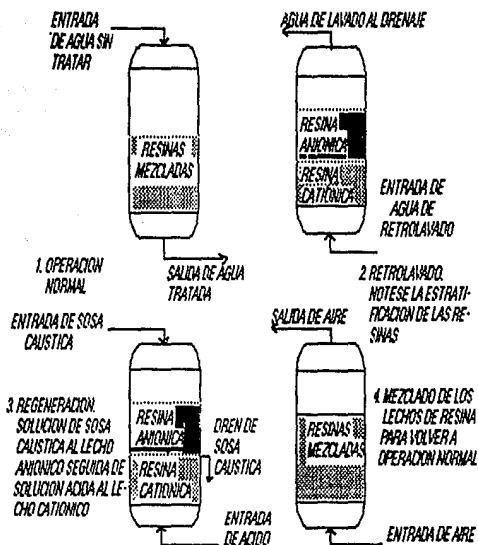


Fig. 3-13

Cuando las resinas se han agotado, se retrolava el lecho y la diferencia de densidades produce una bien definida separación de las dos capas, con un estrato relativamente estrecho en el que ocurre algo de mezcla.

Ciclo básico para la operación

Servicio.— Es la operación en la que el agua a tratar pasa a tra-

vés de la columna de resina hasta que la capacidad de intercambio de la resina se agota.

Los flujos de operación son: 1 a 5 gpm/pie³ de resina con una cada de presión en la columna de resina de 10-15 PSI.

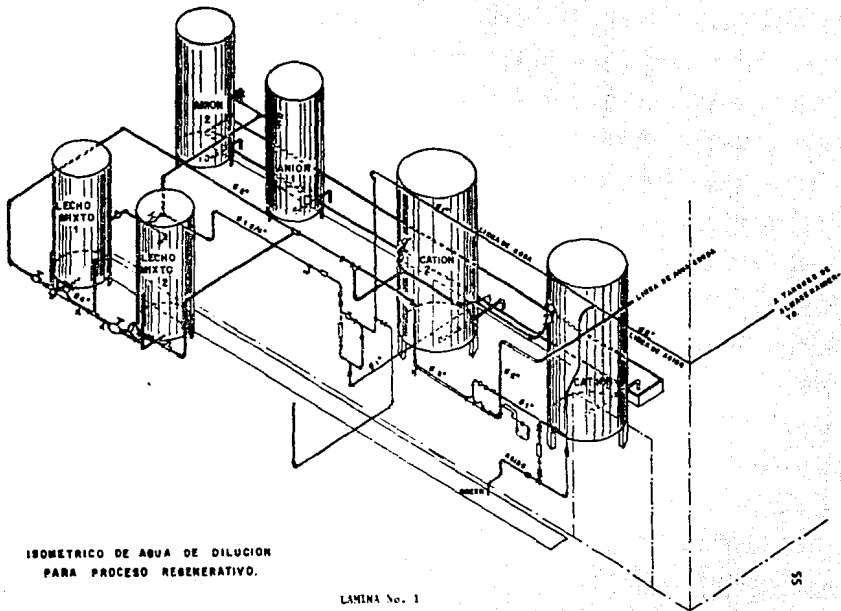
Retrolavado.- Es la operación agua en flujo ascendente a través - de la columna de intercambio iónico para remover cualquier tipo - de impurezas que se encuentran en la parte superior de la resina y clasificación de las partículas, las más densas se van al fondo, los flujos de retrolavado se hacen de acuerdo a la gráfica de expansión de la resina.

Introducción del regenerante.- Para restaurar su capacidad de intercambio o convertir la resina a su forma hidrógeno en el caso - de la resina catiónica o su forma hidróxido de la resina aniónica, se pasa una solución de ácido o sosa cáustica, a través de la columna de intercambio iónico a un flujo de 0.25 a 1.5 gpm/pie³ de resina y concentraciones que varían de 1 a 6%.

Desplazamiento o enjuague.- Al terminar de introducir el regenerante, se continúa alimentando agua al mismo flujo de regeneración para desplazar el exceso de regenerante que permanece en la columna de intercambio iónico, considerando pasar de 1 a 2 volúmenes de agua con respecto al volumen de resina.

Enjuague rápido.- El enjuague rápido es con el fin de eliminar - las trazas de regenerante que quedan en las partículas del intercambiador de iones. El flujo de enjuague recomendado es de 1.5 - gpm/pie³ de resina y la cantidad de agua necesaria es de 30 a 75 gpm/pie³ de resina.

A continuación se anexa la Lámina No. 1 de isométrico de agua de dilución, para proceso regenerativo.



4.0.0. Criterio de análisis a problemas de operación de sistemas de intercambio iónico.

Los principales defectos de operación de las unidades de intercambio iónico son: baja capacidad, baja calidad o dicho de otro modo alta fuga y alta pérdida de carga. Dichos síntomas se pueden deber a diferentes causas. A continuación se analizarán cada uno de los defectos de operación.

4.1.0. Pérdida de capacidad.

4.1.1. Aumento de salinidad.

Diferentes épocas del año o diferentes fuentes de agua que ocasionan variaciones en la salinidad y en la relación de diversos iones. Para poder saber cuanto se puede esperar razonablemente como capacidad como M^3 entre regeneraciones, se deben hacer análisis de agua cruda (influyente).

4.1.2. Pérdida de resina.

La forma más simple de verificar es haciendo una medición de altura del lecho, cubicando, si fuese necesario, la resina originalmente ya sea durante su agotamiento o regeneración. Por regla general las resinas fuertes se embarcan en la forma agotada y las débiles en la forma regenerada.

4.1.3. Nivel de regeneración.

Para verificar esto, se divide el consumo digamos mensual de regenerante 100% entre el número de regeneraciones en ese mismo periodo. Esto nos dará un promedio del consumo de regenerante por cada regeneración, esto permite constatar el nivel de regeneración recomendado por el fabricante.

4.1.4. Gasto de regenerante.

El gasto de regeneración es importante ya que si éste fuese muy lento se podría obtener un estado de equilibrio, quedando algunos grupos activos sin regenerar. Por otro lado, un gasto demasiado elevado es negativo por el escaso tiempo de contacto que permite. El gasto debe de aproximarse del recomendado por el fabricante — del equipo o de la resina. Si se tiene duda del medidor de caudal o éste estuviese descompuesto, se debe medir el efluente mediante muestreo, cronometrando el tiempo que tarda en llenarse recipientes con volumen conocido.

4.1.5. Concentración de regenerante.

La concentración debe verificarse muestreando el influente de la unidad de intercambio iónico. La concentración deberá ser aproximadamente igual a la recomendada por el fabricante de resinas.

4.1.6. Precisión del punto final del ciclo.

La capacidad está determinada por el punto final y éste depende — del método analítico empleado. Es conveniente la precisión de los instrumentos de determinación de conductividad o fotometría.

4.1.7. Condiciones de la resina.

En caso de que todas las condiciones de operación sean adecuadas debe tomarse una muestra de resina para su análisis en el laboratorio (Véase punto número 5).

4.2.0. Baja calidad del producto.

Cuando se presenta un problema de calidad, o sea, de alta fuga de iones, ésta es específica para el tipo de resina usada.

4.2.1. Fuga de alcalinidad.

Si en una unidad de resina catiónica débil se presenta fuga de alcalinidad, esto puede deberse a una regeneración insuficiente. Es de tomarse en cuenta que cuando existe una regeneración en serie, el regenerante que sale de la unidad fuerte debe ser cuando menos igual a 110% del teórico estequiométrico de la capacidad de la resina débil.

4.2.2. Fuga de dureza.

La fuga de dureza se puede deber a precipitación de sulfato de —calcio en la unidad catiónica; en este caso la hidrólisis del sulfato de calcio provoca la fuga de dureza. En estos casos la fuga de dureza se va disminuyendo conforme avanza el ciclo. Es recomendable verificar la concentración de ácido a la que se hace en la regeneración.

4.2.3. Fuga de sodio.

En el caso de las resinas catiónicas, este problema es muy raro, puede deberse a regenerante contaminado, por ejemplo, en el caso de que la unidad catiónica se regenere en serie con la resina catiónica del lecho mixto la primera parte del regenerante se puede encontrar con una alta concentración de sodio y se recomienda el descartar el primer 5 al 20% de la solución de regenerante que sale del lecho mixto. Si se efectúa algún cambio en la cantidad del regenerante se debe revisar junto con el fabricante de equipo o de resina para asegurar una regeneración completa. Se puede pre—sentar en el caso de resinas aniónicas, fuga de sodio causada por la misma resina catiónica, la cual se deposita en el fondo de la resina aniónica de la columna que la contiene.

Cuando se regenera ésta, la resina catiónica se satura con iones sodio, los cuales se liberan lentamente durante el paso de servicio. Un análisis del agua a la salida de la unidad catiónica y de

la aniónica débil mostrará una fuga mayor en la unidad aniónica - que en la catiónica.

4.2.4. Fuga de sílice.

Este problema se puede presentar en unidades con resina aniónica tanto fuerte como débil. En resinas débiles regeneradas en serie, puede suceder que el regenerante usado proveniente de la resina - fuerte esté bastante cargado con sílice y al pasar por la resina débil precipita la sílice sobre la resina.

En ciclos posteriores se puede redissolver la sílice aumentando la fuga de sílice. Para evitar este problema, se debe desconectar el primer 15 a 30% del regenerante. En el caso de las resinas fuerte mente básicas la fuga de sílice puede deberse a varias causas, co mo por ejemplo, la pérdida de grupos activos fuertes, la contami nación o ensuciamiento de la resina por materia orgánica o la acu mulación de sílice debido a condiciones deficientes de regenera ción. El ensuciamiento de las resinas es un problema que requiere bastante atención, más adelante se analiza detenidamente.

4.2.5. Problemas de las resinas aniónicas fuertemente básicas.

A diferencia de las resinas catiónicas fuertes y aniónicas débi les, las aniónicas fuertes son muy sensibles a la temperatura y - se degradan rápidamente, por lo que las resinas del tipo I no se rán utilizadas a temperaturas mayores de 60°C y las del tipo II a temperaturas arriba de 40°C.

Además estas resinas son más sensibles a efectos de degradación. La degradación de la funcionalidad fuertemente básica causa fuga de sílice, por lo que es muy importante mantener la operación den tro de los límites establecidos.

4.2.6. Problemas relacionados con la operación de lechos mixtos.

Con una regeneración apropiada los lechos mixtos pueden producir la máxima calidad de agua desmineralizada, sin embargo, existen dos problemas que se relacionan al enjuague y a la calidad del agua tratada.

El problema del enjuague frecuentemente se relaciona con la contaminación de los propios regenerantes durante su paso a través de la columna, esta contaminación cruzada se manifiesta cuando la resina catiónica recibe sosa cáustica, saturándose parcialmente con sodio, o la resina aniónica recibe ácido sulfúrico saturándose parcialmente con sulfatos.

La contaminación cruzada generalmente se presenta cuando el colector de la interfase se encuentra mal posicionado o cuando los volúmenes de resina no son los previstos originalmente.

Agua de enjuague.— Si se desea un método más rápido se puede emplear un lecho inerte para separar las resinas, como por ejemplo, el AMBERSEP. Este sistema utiliza perlas inertes que separan la resina aniónica de la catiónica después de retrolavado y que no toman parte en la operación de intercambio iónico. Con este proceso se puede eliminar la contaminación cruzada y disminuir el tiempo de enjuague.

La baja calidad del agua en los sistemas de lecho mixto se debe en gran parte de los casos a una mezcla insuficiente con aire comprimido. La reacción de intercambio iónico es prácticamente instantánea, pero si las capas de resina se encuentran separadas, se obtiene una reacción de dos pasos: primero el agua a través de la resina aniónica y después a través de la catiónica, como resultado se obtendrá una alta conductividad y un agua con un pH por debajo de 7. Es indispensable utilizar un buen sistema de distribución de aire, empezar la mezcla con una altura del agua de 2 a 5 cm. por arriba del nivel de resina y usar el aire comprimido a —

una presión de 0.15 a 0.3 Kg/cm² aprox. y a un gasto de 1.5 M³/M² min. para asegurar una mezcla efectiva, debe mantenerse la inyección de aire por 15 minutos cuando menos. Es interesante notar -- que una presión elevada de aire puede hacer aparecer una mezcla -- vigorosa debido a la energía liberada durante la inyección, pero los resultados son deficientes y es de esperarse que unas condiciones de este último tipo dañen la estructura física de la resina.

4.2.7. Contaminación de las resinas.

Para prevenir la contaminación orgánica se recomienda seleccionar resinas especialmente resistentes como las acrílicas o las estirénicas macroreticulares, pero aún en estos casos es conveniente -- efectuar tratamientos con salmuera alcalina en forma periódica, -- la frecuencia puede ser desde un tratamiento por año a un tratamiento por mes, dependiendo de las características del agua de -- alimentación al sistema y del tipo de resina en operación. Solamente en caso de que el tratamiento de salmuera alcalina no resulte efectivo para eliminar la contaminación orgánica, debe intentarse el tratamiento extremo de limpieza con hipoclorito de sodio, es importante notar que el ión hipoclorito puede reaccionar con -- los grupos activos de la resina y posteriormente degradarlo, por lo que se recomienda saturar las resinas aniónicas con cloruros.

4.2.8. Contaminación con hierro.

El hierro puede presentarse en varias formas naturales, cuando el hierro se presenta como suspensión insoluble, puede separarse del agua por filtración, depositándose como sólido sobre el lecho de resina. El hierro puede encontrarse también en solución como ión ferroso pero oxidarse a ión férrico antes de la unidad de intercambio catiónico. Por último, la resina catiónica puede absorber el hierro soluble en forma férrica, el cual se oxida una vez en -- la resina. El hierro en suspensión se puede eliminar mediante un

retrolavado prolongado antes de la regeneración: cuando ocurren precipitaciones antes de la unidad catiónica, éstas se presentan como hidróxido férrico, éste es un producto gelatinoso y pegajoso que recubre las perlas de resina, envenenándolas y haciéndoles perder capacidad. Se requiere en este caso efectuar una limpieza con hidrosulfito de sodio a fin de reducir el hierro al ión férrico que es más soluble.

El más difícil de los tratamientos es cuando el ión se ha oxidado de ferroso a férrico, una vez precipitado en la resina, aquí se recomienda un tratamiento con ácido clorhídrico concentrado. Es muy importante tomar en cuenta la corrosividad del ácido clorhídrico especialmente en lo relacionado con los materiales de construcción, es preciso utilizar inhibidores de corrosión.

4.2.9. Contaminación con aceite.

El origen del aceite es muy variado. Este puede acarrear en el aire comprimido desde los sellos del compresor. El aceite provoca la formación de una película alrededor de las perlas de resina — obstruyendo el intercambio iónico.

En el caso de aceites lubricantes, se puede determinar si existe contaminación con luz ultravioleta. Se debe programar un mantenimiento adecuado de los compresores e instalar eliminadores de aceite en la línea. Cuando el agua cruda está contaminada se deben relocalizar los puntos de toma de agua o instalar eliminadores de aceite; entre los sistemas destacan los filtros coalescentes con precapa.

Para corregir el efecto de contaminación con aceite se efectúa una limpieza con detergente no iónico de baja espuma.

4.2.10. Ensuciamiento con lodos o polielectrólitos.

En sistemas con pretratamiento defectuoso o sin pretratamiento se puede presentar este problema. El lodo acumulado sobre la resina puede llegar a formar una torta la cual aumenta la pérdida de carga, puede agrietarse y provocar canalización. La acumulación puede ser tan pesada que un retrolavado normal no es capaz de levantar la torta y puede necesitarse un lavado a un gasto inicial mayor y durante tiempos más prolongados hasta de 30 minutos.

La agitación con aire como en los lechos mixtos, puede ayudar antes del retrolavado. Si esto no produce resultados satisfactorios se puede emplear una limpieza con dispersante detergente.

4.2.11. Crecimiento de algas y bacterias (esterilización).

Algunas resinas de intercambio iónico tienden a acumular bacterias y algas. Esto puede ser negativo no sólo para las aplicaciones farmacéuticas o alimenticias, sino también para la operación normal de las unidades ya que los crecimientos pueden llegar a tapar los internos y causar baja eficiencia por una distribución — ineficiente. Esto puede ser corregido mediante los procedimientos de esterilización con el compuesto $KMnO_4$ o con agentes de cloro lento. Es importante notar que el tratamiento con hipoclorito es un recurso extremo y no debe aplicarse con frecuencia, el tratamiento con agentes de cloro lento es más moderado y se puede utilizar como procedimiento rutinario. Si se desea tener un producto libre de bacterias y pirógenos de los sistemas de intercambio iónico deberán utilizarse medidas especiales como el pulimento con filtros micrónicos, absorbentes de bacterias o sistemas de ultrafiltración.

4.2.12. Precipitación de sulfato de calcio.

Este problema se presenta cuando se sobrepasa el límite de solubilidad del sulfato de calcio en la resina.

El producto de solubilidad es de 2000 ppm. a 25°C y la insolubilidad aumenta con la temperatura por lo que este precipitado es muy difícil de eliminar. Entre las técnicas para eliminarlo están la de efectuar retrolavado prolongado con agua suavizada, también — existen otros tratamientos siendo el más común el que consiste en la limpieza con ácido clorhídrico, aunque la disolución del precipitado es bastante lenta y es necesario repetir periódicamente el procedimiento hasta solucionar el problema.

4.2.13. Acumulación de sílice.

Cuando no se efectúan regeneraciones completas de las resinas aniónicas fuertes y como resultado de los cambios de pH, la sílice queda en la resina se puede acumular y polimerizar formando cadenas. Ya se mencionó anteriormente que la acumulación de sílice coloidal se puede presentar en las resinas aniónicas débiles, estos problemas pueden agravarse por la presencia de materia orgánica — en la propia resina. En estos casos se recomienda una regeneración con sosa cáustica en tibio. Debe tomarse en cuenta la sensibilidad a la temperatura de las resinas aniónicas.

4.3.0. Pérdida de carga excesiva.

La pérdida de carga a través de una columna espacada depende de — dos componentes: la pérdida de carga del equipo y la pérdida de — carga de la resina. Para diferenciar si la pérdida de carga se de — be o no al componente de la resina, es conveniente instalar manó — metros en los compartimientos superior e inferior de la columna — para diferenciar el efecto de los componentes. Es importante cuan — do se efectúen trabajos en columnas con recubrimiento, consultar

al fabricante del equipo o algún contratista especializado para evitar dañar el recubrimiento y corroer la columna. Los mandos deben revisarse frecuentemente y estar bien calibrados.

4.4.0. Problemas del equipo.

4.4.1. Distribuidor de entrada obstruido.

Existen varios motivos por los que se puede bloquear el distribuidor de entrada, uno de ellos es la acumulación de lodo o materia en suspensión por un pretratamiento defectuoso o la falta de pretratamiento por completo. Este problema se presenta en la primera columna del tren de intercambio iónico.

El distribuidor de entrada también se puede obstruir con finos de resina, esto puede deberse a un retrolavado excesivo o ineficiente. Cuando baja la temperatura y aumentan la densidad y viscosidad del agua, el gasto normal de retrolavado puede resultar excesivo. Por otro lado la oxidación de las resinas puede ocasionar que la degradación física cause una disminución en la densidad, lo cual aumentará la expansión durante el paso de retrolavado. -- Una situación que se puede presentar cuando el agua que se emplea en el retrolavado libera gases es que las burbujas se acumulan en las perlas de resina, ocasionando que floten, elevándose y bloqueando los distribuidores. En el caso de lechos comprimidos puede ocurrir que el gasto normal de retrolavado no sea suficiente y se necesite utilizar un gasto mayor, esto puede causar que todo el lecho de resina se levante como un pistón; este problema puede dañar la resina, si sube todo el lecho, los finos de la parte superior también bloquearán los distribuidores superiores. Es conveniente verificar cuando se presente una situación de gasto excesivo, los medidores de caudal, ya que para una operación adecuada, éstos deben estar calibrados correctamente.

4.4.2. Sistemas colectores inferiores.

Estos sistemas son de una variedad tan amplia que enumerar sus ventajas y desventajas estaría fuera del alcance de este trabajo. Estos sistemas pueden ser del tipo de lecho soporte, coladores de inoxidable o de plástico, tubos perforados con mallas de diversos materiales y muchos más. Nos limitaremos a mencionar que los principales problemas que se presentan en los colectores inferiores son: la deformación causada por falta de apoyo durante la operación o defectos de construcción que permiten la existencia de puntos débiles, el ablandamiento o inclusive la fusión de piezas de plástico, como en el caso de temperaturas elevadas, como por ejemplo, en el caso de la reacción exotérmica de dilución de sosa cáustica al 50% y el propio taponamiento con finos de resina, aunque después del retrolavado los finos deberían estar reclasificados y solamente deberían existir perlas gruesas en el fondo de la columna, una distribución ineficiente puede originar un flujo turbulento cuyas corrientes podrían arrastrar finos al fondo de la columna y bloquear los colectores.

4.4.3. Medidores de gasto.

Una lectura incorrecta del gasto puede llevar a conclusiones equivocadas sobre la pérdida de carga.

4.4.4. Paredes de las tuberías y columnas.

Es conveniente efectuar inspecciones periódicas de las paredes del equipo.

Si el recubrimiento de las columnas se llega a desprender, esto puede producir resultados desastrosos por la pérdida de presión que pueden ocasionar. Los recubrimientos de caucho o ebonita deberían inspeccionarse mediante pruebas de chispa, para prevenir el desarrollo de puntos de corrosión.

4.5.0. Problemas de la resina de intercambio iónico.

Existen dos tipos de materiales intercambiadores de iones clasificados por su forma física: las perlas esféricas y los gránulos -- irregulares. Las perlas esféricas ofrecen ventajas desde un punto de vista de pérdida de presión, los gránulos en cambio tienden a acomodarse y taponar los intersticios de los colectores. Es preferible en el caso de materiales con gránulos irregulares que el tamaño de partículas sea mayor que el normal para evitar problemas relacionados con la pérdida de presión, por otro lado, los tamaños tienen características más pobres en cuanto a características cinéticas por lo que es preferible a final de cuentas, utilizar materiales con forma de perlas.

El tamaño de las perlas puede variar dependiendo del lote de fabricación y del tipo de resina; no es de esperarse ningún problema a menos que el tamaño sea por debajo del mínimo.

Por lo general los problemas de alta pérdida de presión en resinas de intercambio iónico se deben a factores externos.

4.5.1. Degradación física por oxidación.

La oxidación puede ser causante, por ejemplo, cloro libre en concentraciones mayores de 0.1 ppm., el cual en presencia de metales (como hierro, magnesio, cromo, etc.), puede llevar a degradación de los enlaces cruzados de la matriz a la resina.

Los efectos de esta degradación pueden ser: la formación de finos de la que se hablará más adelante y el ablandamiento de las perlas, en donde los acomodos y deformaciones que disminuyen el espacio vacío entre las perlas aumentan la pérdida de presión. Cuando un poco el problema, también se pueden producir subproductos de la degradación, los cuales arrastrados por el agua que pasa por ejemplo, por una resina aniónica provocan una contaminación orgánica irreversible.

4.5.2. Depósitos sobre la resina.

Estos problemas ya han sido tratados en la parte dedicada a contaminación y ensuciamiento. Algunos de los depósitos que presentan mayores problemas son los siguientes:

El ensuciamiento con hierro, si no se remedia puede acumularse y ser la causa de alta pérdida de presión. La acumulación de lodos y de polielectrólitos puede también originar pérdida de presión. La precipitación de sulfato de calcio en forma excesiva puede hacer necesaria la reposición del lecho. El sulfato de bario que se deposita sobre los internos es causa de este problemas también. - Un problema al que se debe prestar atención, es el de corrosión - por la gravedad que puede llegar a presentar. Se recomienda prestar especial atención a la operación de pulimiento de condensados, tratamiento de agua a algunas temperaturas, materiales adecuados de construcción y puntos de corrosión en equipos tanto en recubrimientos defectuosos como en cordones de soldadura.

4.5.3. Finos.

Se conocen como finos aquellas perlas o fragmentos que pasan a través de una malla de 0.3 mm. (50 mallas E.U.A.), la cantidad en una resina nueva normalmente no excede el 2%. Esta cantidad de finos no debe causar pérdidas de presión (aún las resinas con tamaño mayor que el normal como las tipo condensado, por ejemplo, una pequeña cantidad de finos). En una operación eficiente, los finos son eliminados durante el retrolavado y las resinas usadas llegan a tener menos finos que las nuevas. Por otro lado, durante un retrolavado efectivo, la resina se reclasifica, colocándose los finos en la parte superior del lecho y los gruesos en el fondo.

Las causas que originan finos son los choques físicos, como el - choque osmótico, la erosión mecánica, una alta pérdida de presión; en algunos casos el congelamiento. Los finos tienden a ocupar los espacios vacíos del lecho y empacarlo; no sólo causan problemas - de pérdida de carga, sino también el agrietamiento del lecho y la

formación de un camino preferencial, o sean, problemas de calidad y capacidad.

Cuando se note la presencia de finos, se debe corregir primero la operación de retrolavado y aún efectuar retrolavados a fin de corregir la situación antes de proceder a localizar la causa de la formación de finos. Cuando se utilicen coladores, filtros o mallas en el colector superior que recibe el agua de retrolavado, es conveniente quitar temporalmente estos dispositivos de seguridad contra la pérdida de resinas tanto durante el retrolavado para corregir la acumulación de finos, como durante la puesta en marcha de la columna en cuestión.

4.6.0. Descripción para la solución de problemas más comunes en equipo de intercambio iónico.

Problema - Capacidad Unidad Aniónica.

POSIBLE ORIGEN	SOLUCION
1. Obstrucción de distribuidores de entrada, salida y de regenerante.	Inspección de distribuidores.
2. Canalización de la cama.	Contralavar.
3. Valles y colinas en el lecho.	Inspeccionar soporte del lecho y distribuidor inferior.
4. Depósitos sobre el lecho de resina.	Contralavar.
5. Válvulas múltiples.	Muestrear antes y después de la válvula.
6. Contaminación de fierro.	Tratar con ácido clorhídrico - inhibido.
7. Contaminación orgánica.	Tratamiento con hipoclorito.
8. Contaminación de sílice.	Sosa NaOH caliente y enjuague con agua.

- | | |
|--|---|
| 9. Cloro. | Remover cloro con carbón activado o tratar influente con Na_2SO_3 . |
| 10. Flujo de operación excesivo. | Verificar controladores de flujo. |
| 11. Aire atrapado. | Contralavar. |
| 12. Cambio de análisis con relación al análisis original que se usó para determinar volumen de resina. | Ajustar volumen de agua a solución tratada, proporcionar el análisis del agua actual. |

Problema - Capacidad Unidad Catiónica.

POSIBLE ORIGEN	SOLUCION
1. Obstrucción de distribuidores.	Inspeccionar distribuidores.
2. Canalización del lecho.	Contralavar.
3. Valles y colinas.	Inspeccionar soporte del lecho y distribuidor inferior.
4. Depósitos sobre el lecho de resina.	Contralavar.
5. Válvulas múltiples.	Muestrear antes y después la válvula.
6. Contaminación de fierro.	Tratamiento con ácido clorhídrico inhibido.
7. Precipitación de CaSO_4 .	Introducción de regenerante a pasos.
8. Cloro.	Remover cloro con purificador activado o tratamiento del influente con Na_2SO_3 .
9. Bolsas de aire.	Contralavar.

5.0.0. Muestreo y determinación de la calidad de la resina de intercambio iónico.

Para determinar la existencia de algún problema en la resina, se hace necesario un análisis de ésta por medio de una toma de muestra.

Objetivo: Muestreo para verificar sus características físico-químicas.

1) TOMA DE MUESTRA

- a) Es deseable que la resina muestreada esté en la fase regenerada.
- b) Abrir registro de nombre.
- c) Drenar la unidad hasta un nivel de 5 cm. aproximadamente sobre el nivel superior de la resina.
- d) Si los internos son metálicos y se cuenta con refuerzos suficientes, introducir aire en flujo ascendente a un régimen de 1500 litros/minuto M^2 con una presión máxima de 0.3 Kg/cm, esto con el fin de homogenizar todo el lecho y no permitir bandas de acumulación de finos y poder tener tamaños de resinas promedios que sean representativos de todo el volumen de resinas en el recipiente.
- e) Si los internos no son metálicos o no se puede introducir aire deberán tomarse cuatro muestras del corazón del lecho (una de cada cuadrante), después juntarlas y mezclarlas lenta y completamente.
- f) Obtener aproximadamente un litro de muestra por columna.
- g) Es deseable que la muestra sea enviada en recipiente de vidrio o plástico resistente.
- h) Cerrar la unidad y proceder a prepararla para ponerla en servicio nuevamente.

2) CASOS ESPECIALES

- a) En unidades donde se tengan lechos estratificados se deberá — muestrear conforme a lo indicado en los puntos anteriores, tomándose nota qué tipos de resinas forman el estrato así como los vo-

lúmenes de cada una de ellas en el mismo.

- b) En unidades de lechos mixtos se simplifica el procedimiento de toma de muestra, pues basta con seguir la secuencia de regeneración y al terminar ésta, antes de entrar de nuevo la unidad a servicio se deberá hacer el muestreo, también como en el caso de lechos estratificados se tomará nota de los tipos de resinas así como sus volúmenes que conforman el Monobed.

6.0.0. Procedimiento para la evaluación técnica de la operación del sistema de intercambio iónico, ejemplo: el existente en FES-C.

Como ya se hizo mención en capítulos anteriores y apoyándonos en éstos, el volumen de agua a tratar y la calidad son factores determinantes en diseño y operación de sistemas de intercambio iónico.

Estudiando el sistema I.I. de la FES-C como primer paso se procedió a analizar el agua cruda que suministra el influente de la — planta desmineralizadora ubicada en campo-1, obteniendo los siguientes resultados:

Agua de alimentación FES-C Campo-1

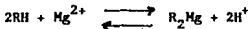
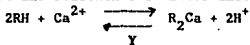
Calcio (Ca^{2+})	64	ppm. como CaCO_3
Magnesio (Mg^{2+})	72	ppm. como CaCO_3
Sodio (Na^+)	121	ppm. como CaCO_3
Bicarbonatos (HCO_3^{-1})	208	ppm. como CaCO_3
Carbonatos (CO_3^{2-})	0	ppm. como CaCO_3
Hidróxidos (OH^-)	0	ppm. como CaCO_3
Sulfatos (SO_4^{2-})	10	ppm. como CaCO_3
Cloruros (Cl^{-1})	39	ppm. como CaCO_3
Dureza total	136	ppm. como CaCO_3
Dureza de no carbonatos	0	ppm. como CaCO_3
Dureza de carbonatos	208	ppm. como CaCO_3
Alcalinidad F	0	ppm. como CaCO_3
Alcalinidad M	208	ppm. como CaCO_3
Fosfatos (PO_4^{3-})	0	ppm. como CaCO_3
Silice (SiO_2)	60	ppm. como CaCO_3
Conductividad	410	MMHOS
pH	8.1	
Turbiedad		UTJ
Sedimento	—	
Color	—	

Es necesario conocer estas determinaciones, ya que diferentes épocas del año o diferentes fuentes de agua ocasionan variaciones en la salinidad y en la relación de diferentes iones, teniendo como consecuencia una disminución en la producción de agua desmineralizada de la unidad de intercambio iónico. Por lo que deberá establecerse el nuevo control por volumen tratado o grado de utilización de la columna.

De aquí la importancia de llevar a cabo análisis para control de calidad de agua de las plantas desmineralizadoras. Dichos análisis se mencionan en el punto 3.1.0., y una vez obtenidos los análisis de agua cruda se conocerá la eficacia de la regeneración y el grado de utilización de la columna; dichos conceptos se explican a continuación.

Es preciso el conocimiento de la capacidad del lecho de la resina y de la eficacia del proceso, como ya se ha mencionado en puntos anteriores. La capacidad "teórica" de una resina es el número de grupos iónicos (número equivalente de iones cambiables), contenidos por unidad en peso o volumen de resina. Sin embargo, en la práctica se opera una capacidad muy inferior a la teórica.

Debido a que las reacciones de intercambio sean:



son reacciones de equilibrio, y se necesitarían cantidades impracticables de regenerante para invertir completamente el equilibrio hacia la izquierda. El grado de capacidad teórica alcanzado en una operación se denomina "grado de utilización de la columna" y se define como el cociente entre las capacidades de trabajo y teórica. El término "eficacia" se usa para designar el grado de utilización del regenerante. La eficacia de una columna es el cociente entre la capacidad de trabajo de una unidad y la capacidad teórica que podría obtenerse después de aplicar una cantidad determinada de regenerante.

La eficacia se refiere a la salida de un cambiador según la cantidad de regenerante aplicado en igualdad de condiciones.

Las características de una resina son tales que se alcanzan eficacias elevadas con niveles bajos de regeneración. Sin embargo, con niveles bajos de regeneración se obtienen capacidades de lecho bajas.

En la práctica se sacrifica algo de eficacia con el fin de lograr una utilización de columna razonable. Es por esto que se debe de ponderar la eficacia de regeneración -que representa un mayor gasto de operación a largo plazo- con la utilización de la columna, -que representa una inversión de capital.

En la mayor parte de las operaciones de desmineralización se utilizan eficacias del 70-45% y utilizaciones de columna de 30-65% - respectivamente.

La tabla 6-1 ilustra relaciones típicas entre el nivel de regeneración, eficacia y utilización de la columna.

Las eficacias fueron calculadas a partir de datos suministrados - por Kunin (1958) para la Amberlite IR-120 (resina de poliestireno con el grupo sulfónico), agua dura con una dureza de 500 mg/l CaCO_3 , una carga de 4,45 l/seg M^3 de resina y empleando una solución de cloruro de sodio al 10% como regenerante a distintos niveles, se tiene:

TABLA No. 6-1

Nivel de regeneración (g ClNa/l resina)	Dureza eliminada (g CO ₃ Ca/l resina)		Rendimiento de la regene ración (%)	Utilización de la columna (%) (b)
	(a) Teórica	Actual		
1	0.85	0.83	98	14
2	1.70	1.32	78	22
3	2.55	1.83	72	30
5	4.25	2.85	67	47
10	8.50	3.90	46	64
15	12.75	4.65	36	76
20	17.00	5.00	29	82

(a) Basado en la cantidad de ClNa usado.

(b) Basado en la capacidad total de intercambio de la resina de - 97.6 g/l.

Así mismo se observará si el agotamiento fue debido a la fuga de Na⁺ lo que implica una disminución de la A.M.L., aumento de pH y conductividad, entonces se determina que fue la unidad catiónica la que se agotó o bien aumento de sílice, sin variación de la conductividad y caída de pH se tendrá que fue la unidad aniónica la que se agotó, dicho comportamiento se explica en el punto 3.6.0.

Basándose en estos criterios se pondrá mayor cuidado de controlar los pasos en el proceso regenerativo de la unidad catiónica y/o aniónica según sea el caso de cuál de ellas o en ambas se produjo el agotamiento. Con esto se señala que es necesario un buen control para cada unidad.

Por lo expuesto anteriormente se requiere hacer análisis del influente (agua cruda) del sistema de intercambio iónico cada semana, con el objeto de generar un perfil de concentraciones basado éste en las variaciones de calidad de agua que suministra el influente del sistema desmineralizador de la F.E.S.-C. Pues este estudio e información redundará en una mejor predicción de diferen-

tes épocas del año y control por volumen tratado de la P.D.

Ahora bien, los análisis para comprobar la calidad del efluente del sistema de intercambio iónico, deberá, efectuarse tanto al inicio en la puesta en servicio como en el transcurso de operación con el objeto de verificar la calidad del agua, ya que es probable que en el sistema de I.I. no se haya efectuado una correcta regeneración por problemas de equipo, flujo de regenerante, etc., y el sistema podría agotarse antes de obtener el grado de utilización de la columna esperado, de igual forma analizar la muestra al poner fuera de servicio la planta desmineralizadora para conocer en qué condiciones se dejará. Los análisis se efectuarán cuando esté operando el sistema de I.I. cada dos horas para volúmenes considerables o en función del tiempo que esté en operación la planta, teniendo cuidado cuando se acerque el agotamiento por volumen tratado, para evitar contaminar el efluente de la unidad.

Ahora bien, en el mes de marzo de 1990 se efectuaron los análisis de agua cruda, que suministra a la planta desmineralizadora de la F.E.S.-C. así como también la calidad del efluente de dicho sistema. Procediendo con autorización proporcionada a la Profra. I.Q. I. Carmen Arriaga O. a regenerar la P.D. de donde se genera la información que se expone en el siguiente punto.

7.0.0. Observaciones y propuesta del planteamiento para la solución de -
dicho sistema.

OBSERVACIONES

Se tiene problema de caída de presión en el retrolavado independientemente de la producida por la cama de resina en las unidades catiónica y aniónica.

Aunque para detectar esta anomalía también se tiene principalmente la limitante de no contar con un medidor de presión y flujo en cada una de las unidades de intercambio iónico.

Es importante tener estos instrumentos de medición para una buena operación basándose en el control de presión y flujo, ya que al efectuar el primer paso del proceso regenerativo de la resina (retrolavado), en la unidad catiónica se observa presión baja y mala distribución de flujo pues se requiere de un largo tiempo para la descompactación del lecho (1.5 horas aproximadamente), ya que hasta entonces se obtienen precipitados blancos que son cristales de calcio, producto de una deficiente regeneración.

Las unidades de intercambio no cuentan con venteo ni internos que permitan una distribución homogénea del regenerante debido a que los distribuidores deben encontrarse aproximadamente a (3") por encima del nivel del lecho de resina, no deben hallarse a más altura para así garantizar que la introducción tenga un desplazamiento tipo pistón.

PROPUESTA

Para un sistema como el instalado en la F.E.S.C. Campo-1 es conveniente la elección o diseño adecuado a las necesidades para tratar el caudal requerido, éste deberá contar con cabezales de distribución, instrumentos de medición flujo y presión, venteos, calentador de agua de dilución para la regeneración de la unidad aniónica, así como metodología de análisis químicos de agua cruda y desmineralizada.

PROBLEMAS

Los problemas originados por estas deficiencias son:

El regenerante no entra a una velocidad adecuada ya que no es — constante la introducción, por no existir un desplazamiento tipo pistón, es decir, homogéneo en toda la cama de resina.

Mala distribución de reactivos regenerantes tanto en la unidad catiónica como aniónica, ya que el por ciento de finos no se acomoda en la parte superior del lecho, producto de un mal retrolavado, produciendo canalización de la solución regenerante lo que conduce a una distribución irregular del mismo y por ende que no quede en condiciones óptimas de capacidad de intercambio la resina.

Posible contaminación por sílice (SiO_2) en la unidad aniónica, y contaminación de sulfato de calcio en la unidad catiónica.

Para confirmar lo anterior se hicieron las siguientes determinaciones:

UNIDAD CATIONICA

C.E. = a 800 mhos. El valor sin contaminación máximo es igual a — 10 mhos.

Acidez Mineral Libre que nos indica la concentración de ácidos — fuertes debido al intercambio de la unidad catiónica es igual a — cero, lo que indica que no hay intercambio iónico.

UNIDAD ANIONICA

Sílice como SiO_2 = 60 p.p.m.

RECOMENDACIONES

Para evitar la precipitación de sales de calcio se recomienda: — unidad catiónica introducir el regenerante al 2% del inicio hasta la mitad del tiempo o corrida de introducción del regenerante, y la otra mitad de la corrida se introducirá a una concentración — del 4%. Siendo básico que se efectúe un buen retrolavado para que

no exista canalización y sea óptima la regeneración. De igual forma el flujo debe de ser el recomendado por el fabricante.

Cuando la unidad aniónica se encuentra contaminada por sulfato, se recomienda efectuar la regeneración a una temperatura de 50°C al introducir el regenerante para hacer más cuantitativa la regeneración y tener un 2% de fuga de sulfato aproximado.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente trabajo se han cubierto los objetivos trazados, ya que con el apoyo del estudio y conocimiento del proceso de sistemas de intercambio iónico, así como los problemas de tipo operacional y — criterios de diseño, los cuales servirán para el desarrollo de un sistema desmineralizador aplicado para el tratamiento de un agua específica. En — donde el factor principal del costo de operación está constituido por los regenerantes y por la regeneración, el cual varía según la calidad del — agua cruda y básicamente por el desarrollo de una buena operación. Siendo la base principal de este contexto el desarrollo y secuencia de — otros puntos así como los ya citados, para efectos de poder dar una solución a problemas de intercambio iónico.

Los datos como son flujo de retrolavado, de servicio e introducción de regenerante así como condiciones de temperatura para tener un porcentaje de fuga de sílice permisible en la unidad aniónica, altura de distribuidor de regenerante, así como otros ya referidos son proporcionados por el fabricante de la resina, que procura por medio de estas referencias de tipo experimental, su producto sea manejado en condiciones óptimas (temperatura, — pH, concentración de sales, presión y flujos), con el objeto de garantizar un buen funcionamiento y tiempo de vida útil de las resinas intercambiadoras de iones.

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

ION EXCHANGE RESINS

Robert E. Kunin
Edit. Academic Press Inc.
U.S.A. 1976

ION EXCHANGE RESINS

Engineering manual for the amberlite
Rohm and Haas Company
U.S.A. 1979

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER

APHA. AWWA. WPCF.
13th. Edition
U.S.A. 1971

MANUAL DEL AGUA. SU NATURALEZA, TRATAMIENTO Y APLICACIONES

Frank N. Kemmer
Mc Graw Hill
U.S.A. 1979

CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA

Walter J. Weber, Jr.
Edit. Reverte, S.A.
U.S.A. 1979

ROHM AND HAAS ION EXCHANGE RESINS

Laboratory Guide
U.S.A.

TABLA DE PROPIEDADES TÍPICAS Y APLICACIONES

Amberlite resinas de intercambio iónico
Química Trepic, S.A.
MEXICO 1980

PROBLEMAS DE OPERACION EN SISTEMAS DE INTERCAMBIO IONICO**Robert E. Kunin****Rohm and Hass Co.****U.S.A. 1979****MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO****Robert H. Perry, Cecil H. Chilton****Edit. Mc Graw Hill****U.S.A. 1978**