

34
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

USO DEL INTERCAMBIADOR CATIONICO DEBIL EN
SISTEMAS CERRADOS DE AGUA DE ENFRIAMIENTO



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A

J A I M E D E L G A D I L L O R A M I R E Z



FACULTAD DE
QUÍMICA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F.

1993



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CAPITULO I	INTRODUCCION	1
CAPITULO II	GENERALIDADES	5
CAPITULO III	SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	36
CAPITULO IV	TRATAMIENTO CON INTERCAMBIADOR CATIONICO DEBIL	59
CAPITULO V	CONCLUSIONES	111
CAPITULO VI	TABLAS Y GRAFICAS	115
CAPITULO VII	GLOSARIO Y BIBLIOGRAFIA	129

CAPITULO I

INTRODUCCION

Considerando la importancia que tienen los servicios auxiliares en las plantas industriales para transformar las materias primas en productos y que los problemas de operación y mantenimiento que en dichos servicios se presentan, afectan directamente la producción y por lo tanto la economía de la empresa, es por ello, que el conocimiento de experiencias obtenidas en el estudio particular de uno de estos servicios resulta de mucha utilidad para el entendimiento y prevención de ese tipo de problemas.

Para una planta industrial los servicios auxiliares son tan importantes como el diseño propio de las unidades de proceso. Uno de los servicios primarios es el "agua", el cual es vital para la operación de una planta industrial.

En la actualidad, una de las principales necesidades que se tiene dentro de la industria en general, es la de enfriar todo tipo de fluidos. Esta operación de enfriamiento se realiza normalmente en los cambiadores de calor, los que en su mayoría emplean agua como medio de enfriamiento.

Al hablar del agua y de las impurezas que generalmente la acompañan, se ha visto que éstas son la causa de problemas en los equipos de evaporación, calentamiento, enfriamiento, etc., ocasionando incrustaciones y/o corrosión, que a su vez originan pérdidas de eficiencia y fallas en los equipos, con los consiguientes paros costosos al tener que efectuar cambios de piezas, limpiezas y en algunos casos, las consecuencias pudieran ser fatales para el personal que opera los equipos. Es por esto que se hace necesaria la eliminación de estas impurezas mediante un método adecuado, funcional y económico que en otras palabras esto viene a ser el tratamiento del agua a utilizar.

Asimismo, es importante señalar que el agua que se usa en los procesos industriales como medio de enfriamiento y particularmente en la industria petroquímica, es sin duda el tipo de agua que se maneja

en mayores cantidades, alcanzando cifras de hasta cientos de miles de litros por minuto⁽¹⁾. Como consecuencia, cualquier mejora en el tratamiento del agua de enfriamiento podría representar considerables ahorros.

También, dado que el agua es un recurso cada vez más escaso y la calidad de la misma no siempre es la deseada, se hace necesario enfriarla y tratarla para su nuevo uso.

El presente trabajo intenta describir y evaluar un método de tratamiento de agua tomando en cuenta factores que le son intrínsecos y algunos otros que resultan útiles para su mejor aplicación y comprensión. Dicho método está enfocado al tratamiento del agua de repuesto (make-up) del sistema de agua de enfriamiento conocido como "torre de enfriamiento" y en particular aquellas instaladas en las plantas de refinación de petróleo (crudo), donde los volúmenes de agua de enfriamiento tiene demandas de considerable magnitud⁽²⁾.

El método propuesto de tratamiento de agua, se vale de materiales ampliamente conocidos como resinas de intercambio iónico (catión débil). Asimismo, para su

mayor economía plantea, por un lado, el aprovechamiento de materiales de regeneración "gastados", es decir, ácido que con anterioridad pudo haber sido utilizado como medio de regeneración en sistemas de desmineralización de agua, y por otro lado, la utilización de una resina con alta eficiencia de regeneración y alta capacidad para eliminar determinadas impurezas presentes en el agua.

En el desarrollo el presente trabajo se describen en forma general los tópicos principales respecto al agua, los sistemas de enfriamiento de la misma y los sistemas más comunes empleados en el tratamiento de dicho tipo de agua; intentando con lo anterior proporcionar una visión de los elementos generales necesarios, para así, continuar con la descripción, diseño y cálculo típico del sistema de tratamiento del agua de repuesto para una torre de enfriamiento, por medio de una resina de intercambio iónico tipo catión débil ciclo hidrógeno. Posteriormente se señalan algunas conclusiones importantes, se anexan las tablas y gráficas utilizadas y se incluye finalmente un glosario de términos manejados así como la bibliografía básica consultada.

CAPITULO II

GENERALIDADES

El agua como se encuentra en la naturaleza no es totalmente "pura", si así fuera no serían necesarios los análisis de agua ni los tratamientos para acondicionarla a los usos que se destina. Cualquiera que sea su origen, el agua contiene impurezas en solución o en suspensión, la determinación de estas impurezas constituye el análisis químico de las aguas.

2.1. Fuentes de Abastecimiento

Las fuentes de abastecimiento de agua se pueden clasificar de la siguiente forma:

- 1.- Agua de mar
- 2.- Agua de lluvia
- 3.- Aguas superficiales
- 4.- Aguas subterráneas

Agua de Mar:

La principal fuente de agua sobre la Tierra son los océanos, a donde las aguas regresan finalmente. El agua se evapora por acción del calor solar, formando nubes que en

contacto con corrientes de aire frío, se condensan precipitándose en forma de lluvia.

Agua de Lluvia:

El agua de lluvia a medida que pasa por la atmósfera, va disolviendo oxígeno, nitrógeno y gas carbónico, que son los gases que componen generalmente el aire. A su paso también encuentra materias que están en suspensión o disueltas en la atmósfera, tales como, humo, gases, bacterias, esporas de microorganismos, etc. De esta agua aproximadamente 1/3 regresa al océano por medio de corrientes superficiales y 2/3 se evapora o se va al seno de la tierra para aparecer en lagunas y pozos, o llega finalmente al océano por medio de corrientes subterráneas.

Aguas Superficiales:

El agua que se obtiene de corrientes superficiales, puede estar turbia por la presencia de arcillas y barro. Está expuesta a contaminación por desechos animales y humanos, aguas negras de ciudades, aguas

industriales, de desecho y en las inundaciones; los pantanos pueden descargar sus aguas a las corrientes de agua superficiales acarreando materia vegetal y en descomposición, color y microorganismos.

Las aguas superficiales obtenidas de lagunas, lagos y depósitos cerrados, son similares a las aguas de los ríos, sin embargo, dentro de estas masas de agua tiene lugar una autopurificación y la calidad del agua puede cambiar considerablemente.

Aguas Subterráneas:

Las aguas subterráneas obtenidas de pozos poco profundos, pueden ser duras o suaves dependiendo de las características minerales de las áreas circundantes. Con la filtración natural a través de la arena se elimina la turbiedad y gran parte de la materia orgánica. Las aguas de pozos profundos son claras e incoloras debido a la mencionada filtración que tiene lugar a través de las capas de arena.

2.2. Impurezas del Agua

Las impurezas que pueden estar presentes en el agua, como ya se mencionó, pueden clasificarse en sólidos en suspensión, sólidos disueltos y gases disueltos.

Los sólidos en suspensión son los que no se disuelven en el agua y pueden ser eliminados por procedimientos físicos, por ejemplo: la arena, arcillas, etc. pueden ser eliminadas por filtración.

Los sólidos disueltos como su nombre lo indica, son compuestos que se encuentran disueltos en el agua y que no pueden separarse por filtración u otro procedimiento mecánico, ejemplo: la presencia de dureza o de cloruros en el agua.

Los gases pueden estar disueltos en el agua y se pueden eliminar por ebullición, desaereación, etc.

Todas estas impurezas del agua natural o cruda son causa de dificultades de más o menos importancia por lo que se hace necesario determinar su concentración para posteriormente eliminarlas mediante un tratamiento adecuado.

En la tabla 2.1 se listan las impurezas comunmente encontradas en el agua, las dificultades principales que ocasionan, así como algunos de los métodos de tratamiento^(a).

Concentraciones:

En el análisis de una agua es necesario determinar la presencia de estas impurezas, las cuales se encuentran en cantidades relativamente pequeñas. Es por esta razón que el resultado de un análisis de agua se expresan sus concentraciones, en partes por millón (p.p.m), en lugar de expresarlas en porcentajes.

Una parte por millón significa una parte de la sustancia en un millón de partes de agua, independientemente de la unidad de peso empleada. Considerando que la densidad del agua es igual a 1 g/ml se puede expresar una parte por millón como: un miligramo por litro o como un gramo por metro cúbico.

Debido a que se determinan diversos constituyentes en un análisis de agua, varios de estos se reportan en una unidad común de

TABLA 2.1

IMPUREZAS COMUNES EN EL AGUA Y EFECTO POSIBLE
CUANDO SE EMPLEAN PARA ALIMENTACION DE CALDERAS <2, 4, 6>

Constituyente	Fórmula química	Fuente principal del contaminante	Efecto posible cuando se encuentra presente en agua para calderas	Tratamiento para removerlo del agua
Sólidos en suspensión		Drenaje superficial, residuos industriales	Arrastres, espuma, lodos o incrustación	Sedimentación libre, coagulación, filtración, evaporación.
Sílice	SiO ₂	Depósitos minerales	Incrustación	Sedimentación libre, coagulación, filtración, evaporación, intercambio iónico.
Carbonato de calcio	CaCO ₃	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporación.
Bicarbonato de calcio	Ca(HCO ₃) ₂	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento por calentamiento, con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Sulfato de calcio	CaSO ₄	Depósitos minerales	Incrustación, corrosión	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Cloruro de calcio	CaCl ₂	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Bicarbonato de magnesio	Mg(HCO ₃) ₂	Depósitos minerales	Incrustación	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Cloruro de magnesio	MgCl ₂	Depósitos minerales	Incrustación, corrosión	Ablandamiento con productos químicos, materiales de intercambio iónico, evaporadores.
Ácidos libres	HCl, H ₂ SO ₄	Drenaje de minas, residuos industriales	Corrosión	Neutralización, seguida en ocasiones de ablandamiento o evaporación.
Cloruro de sodio	NaCl	Aguas negras, residuos industriales, depósitos minerales	Inerte, pero puede ser corrosivo bajo ciertas condiciones	Evaporación y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	Depósitos minerales	Arrastres, espuma, fragilización	Evaporación y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Bicarbonato de sodio	NaHCO ₃	Depósitos minerales	Arrastres, espuma, fragilización	Evaporación y desmineralización con materiales de intercambio iónico.
Ácido carbónico	H ₂ CO ₃	Absorción de la atmósfera, depósitos minerales, descomposición de materia orgánica	Corrosión.	Desaeración.
Oxígeno	O ₂	Absorción de la atmósfera	Corrosión	Desaeración.
Grasa y aceite		Residuos industriales	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma	Coagulación, filtración, evaporación.
Materia orgánica y aguas negras		Residuos domésticos e industriales	Corrosión, depósitos, arrastres, espuma	Coagulación, filtración, evaporación.

peso , es decir, referido a la unidad de peso de otra sustancia que generalmente es el carbonato de calcio, de fórmula química CaCO_3 . Cuando los constituyentes se reportan de esta manera se pueden sumar o restar directamente.

La tendencia actual sin embargo, es expresar los resultados de un análisis en equivalentes por millón (e.p.m.), que se obtienen dividiendo su concentración expresada en p.p.m. de CaCO_3 entre su peso equivalente (peso molecular entre su valencia), o si está expresada su concentración en p.p.m. de CaCO_3 dividiendo ésta entre 50 que es el peso equivalente del CaCO_3 .

Determinación y presentación de resultados:

De acuerdo con las impurezas contenidas en el agua cruda, es necesario valorar su contenido mediante el análisis químico. Sus principales constituyentes son las materias minerales disueltas, las cuales se clasifican en elementos con carga positiva llamados cationes y elementos y/o radicales con carga eléctrica negativa denominados aniones.

Los cationes que comunmente se encuentran en el agua son el calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), los cuales se encuentran combinados formando sales con los aniones. Otros cationes que pueden existir en el agua en menor proporción, son el hierro (Fe^{+++}) y el manganeso (Mn^{++}).

Los aniones comunmente presentes son los bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos y en aguas contaminadas los nitritos.

La sílice es también otro anión que se encuentra siempre en las aguas en forma de silicatos solubles y en ocasiones en estado coloidal.

Los gases que se encuentran en el agua cruda son el bióxido de carbono, el oxígeno y el nitrógeno y en algunas ocasiones contiene gas sulfhídrico.

La forma más común de presentar el resultado de estas determinaciones se muestra en la tabla 2.2<17>

T A B L A 2.2
ESTUDIO DE TRATAMIENTO DE AGUA <17>

ANALISIS EXPRESADO EN PARTES POR MILLON

	4						
	5						
	6						
	PPM COMO	1	2	3	4	5	6
Calcio.....(Ca ++)	CaCO ₃						
Magnesio.....(Mg ++)	CaCO ₃						
Sodio.....(Na +)	CaCO ₃						
TOTAL CATIONES	CaCO ₃						
Bicarbonatos.....(HCO ³⁻ -)	CaCO ₃						
Carbonatos.....(CO ₃ --)	CaCO ₃						
Hidróxidos.....(OH -)	CaCO ₃						
Cloruros.....(Cl -)	CaCO ₃						
Sulfatos.....(SO ₄ --)	CaCO ₃						
Nitratos.....(NO ₃ -)	CaCO ₃						
TOTAL ANIONES	CaCO ₃						
Dureza total.....	CaCO ₃						
Bloxiado de Carbono.....	CO ₂						
Hierro.....	Fe						
Manganeso.....	Mn						
Silica.....	Si O ₂						
Turbidez.....							
Color.....							
pH.....							
.....							
.....							
CONSUMO APROXIMADO DE PRODUCTOS QUIMICOS							
TIPO DE QUIMICO Y % DE PUREZA						KILOGRAMOS DE QUIMICOS POR METRO ³	

2.3. Tratamientos Industriales del Agua

Los tipos de tratamiento aplicables a las aguas empleadas en una planta industrial pueden clasificarse como:

A) Tratamiento interno

B) Tratamiento externo

Tratamiento Interno:

Consiste en adicionar al interior de las calderas, por ejemplo, algunos compuestos químicos para evitar la agresividad de las impurezas que no se eliminaron en el tratamiento externo o las que se formaron debido a las altas temperaturas en el interior de la caldera. Se puede considerar también como tratamiento interno, los compuestos químicos que se adicionan para acondicionar el agua de enfriamiento en un sistema de recirculación.

Tratamiento Externo:

Llamado así porque todas las reacciones químicas y/o los equipos de tratamiento, acondicionan el agua antes de ser alimentada a los equipos que la requieren. Cabe señalar

que dentro de este tipo de tratamiento se encuentra el propuesto en la presente tesis.

Los tipos de tratamiento de agua usados industrialmente, dependen principalmente, de dos factores importantes del agua:

- A) Su análisis o contenido de impurezas
- b) Calidad requerida del efluente según el uso que se le vaya a dar.

Los principales procesos externos para lograr la eliminación de sedimentos, turbidez, color, materia orgánica, dureza y sales minerales del agua, son los siguientes:

- A) Sedimentación
- B) Coagulación
- C) Asentamiento
- D) Filtración
- E) Ablandamiento
- F) Desgasificación y desaereación
- G) Osmosis inversa
- H) Intercambio iónico

Estos procesos se aplican separadamente por lo general, sin embargo, algunas veces se hacen combinaciones de varios de ellos.

Sedimentación:

La sedimentación se aplica cuando se trata de aguas superficiales que llevan grandes cantidades de lodos y que están sujetas a cambios en su concentración de partículas debido a lluvias o a otros agentes externos.

Este tratamiento se refiere al proceso en el que la materia en suspensión es eliminada, sin la ayuda de la adición de un material coagulante, retardando el flujo de agua tal que éste se muestre en reposo y la fuerza gravitacional actúe sobre las partículas.

Usualmente la eliminación de materia en suspensión efectuada por este método es parcial, el grado de eliminación (30% al 80%), depende del tamaño y naturaleza de la partícula, temperatura del agua y tiempo de retención.

El tamaño de partículas está considerado en un amplio intervalo, desde gránulos de arena a partículas de dimensiones coloidales (diámetro mayor a 0.1 mm). Naturalmente aquellas partículas remanentes que después de varios períodos de sedimentación no se hayan eliminado, requerirán entonces de algún

proceso de coagulación o de asentamiento.

Es importante efectuar pruebas de sedimentación para poder determinar los tiempos requeridos, así como la dosificación adecuada del agente químico coagulante para lograr una eliminación conveniente.

La sedimentación puede efectuarse en lagos, lagunas, recipientes o tanques, todo ello dependiendo, en gran parte, de los tiempos de retención.

Cuando la sedimentación se efectúa en tanques o fosas, se deben instalar baffles para prevenir circulación insuficiente que reduzca los tiempos de retención. —

En la selección y definición de un sistema de sedimentación, se deben considerar ciertos factores importantes como son:

- a) Concentración del influente (turbidez)
- b) Tamaño y densidad de partículas
- c) Cantidad de agua cruda a tratar
- d) Concentración deseada del efluente
- e) Límites de turbidez con los que el equipo puede trabajar
- f) Factores experimentales

Coagulación:

La coagulación es un proceso mediante el cual las partículas que causan la turbidez y cuyo tamaño es tan pequeño que necesitarían un tiempo de sedimentación muy grande, son agrupadas en partículas mayores que precipitan.

Al agregar un agente coagulante a una agua que contenga materia suspendida coloidal se desarrollan cambios físicos y químicos que producen sustancias gelatinosas llamadas flóculos, los cuales se agrupan entre sí ocluyendo sólidos y formando cuerpos mayores que sedimentan.

Por lo general se usan como coagulantes compuestos de sales de hierro y aluminio⁽²⁸⁾.

El pH influye mucho en la en la formación de los coagulantes y depende de las características minerales del agua a tratar. La temperatura también afecta este proceso.

Al agregar un coagulante al agua cruda se disminuye la alcalinidad de la misma y si el pH disminuye del óptimo hay que agregar también algún agente alcalinizante. Se suele añadir también alguna sustancia que ayude al

coagulante a que su acción sea más efectiva(6).

Para poder calcular en forma más precisa la cantidad de reactivos a dosificar es necesario tomar en cuenta el cambio de análisis del agua al agregar algún coagulante.

Los equipos de floculación son tanques donde se hace girar el agua a velocidades bajas por medio de paletas. Existen muchas clases de estos equipos(7).

Asentamiento:

Este tipo de tratamiento es muy simple y está íntimamente relacionado con la floculación-coagulación. Consiste en dejar asentarse las partículas formadas después de lograr o someter a coagulación una agua cruda.

Se puede decir que el asentamiento es una función complementaria de los procesos de coagulación-floculación y clarificación.

Filtración:

La filtración es un proceso por medio del cual se eliminan sólidos suspendidos en el agua al hacerla pasar por un medio poroso.

Esta operación se usa para eliminar completamente la turbidez y los sólidos remanentes después de procesos de coagulación.

También constituye el paso final de muchos procesos de ablandamiento por precipitación. Generalmente es usual colocar filtros antes de ablandadores por intercambio iónico y sistemas de desmineralización.

Se puede decir que los tipos de filtros para agua tienen gran variedad, pero normalmente se emplean como medios filtrantes escala calcita, carbón activado⁽⁴⁶⁾, pedacera de mármol, magnetita y otras sustancias.

Las características y aplicaciones de algunos de estos materiales filtrantes son:

Arena.- Es el medio más utilizado para la filtración de agua fría, debe estar libre de barro, arcilla u otro material soluble en ácido. Tiene el inconveniente de contaminar con sílice.

Antracita.- Se usa cuando la arena no es recomendable (filtración de agua en sistemas de ablandamiento cal-carbonato en caliente). Sus ventajas sobre la arena son: menor densidad y forma irregular. Tiene ciclos de

filtración más largos y atrapa mayor turbidez.

Carbón activado.- Se usa para adsorber desechos orgánicos que dan color, sabor y olor, así como para eliminar cloro y potabilizar agua.

El espesor de la capa filtrante se ve influenciado por el tamaño de las partículas del medio filtrante, mientras más pequeñas sean, menor podrá ser el espesor de la capa filtrante, pero al mismo tiempo mayor será la pérdida de carga y viceversa. Muchas veces es conveniente colocar el medio filtrante en varias capas de diferentes tamaños de un material simple o de varios.

Existen varias clases de filtros:

- a) Mecánicos
- b) De placas
- c) De tierras diatomáceas

Para seleccionar el tipo de filtro se consideran varios aspectos importantes, como son:

- a) Flujo de agua a tratar
- b) Calidad del influente y del agua filtrada
- c) Disponibilidad de terreno

d) Medio filtrante, etc.

Procesos de Ablandamiento:

El ablandamiento de agua por medio de productos químicos depende de la conversión de los compuestos solubles que son responsables de la dureza del agua en compuestos insolubles que precipitan y que pueden eliminarse mecánicamente.

La dureza en el agua se debe a la presencia de sales de calcio y de magnesio, como son: bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos. El hierro, aluminio y manganeso también causan dureza pero se hayan en cantidades pequeñas.

Por lo general la dureza de agua se divide en:

Temporal-----Carbonatos (bicarbonatos)

Permanente-----No carbonatos

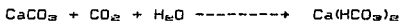
La cantidad de dureza presente en un agua varía mucho en cada lugar y depende de las formaciones geográficas que están en contacto con ella.

El proceso de ablandamiento puede

dividirse en las siguientes etapas:

- a) Cálculo de los productos químicos requeridos basados en los análisis químicos del agua a tratar
- b) Dosificación de los reactivos
- c) Mezclado rápido y agitación para producir la floculación
- d) Dar un periodo de tiempo que permita el asentamiento de los sólidos producidos
- e) Separar el agua clarificada para su uso después de filtrada

El CaCO_3 presente en el agua es soluble debido a que se combina con CO_2 , de acuerdo a la siguiente reacción:



Al aplicar calor la reacción anterior es reversible.

El proceso de ablandamiento en frío con cal-carbonato se refiere a aquél en el cual el agua es tratada con los reactivos a temperatura ambiente.

Al hacer reaccionar la cal y el carbonato con el contenido de minerales que tiene el agua cruda se produce gran cantidad de lodos.

compuestos principalmente por CaCO_3 y Mg(OH)_2 .

Existen diversas alternativas de disposición de dichos lodos:

- a) Disposición en ríos o lagos.
- b) Desechado y transporte para relleno de tierras.
- c) Secado y venta como CaCO_3 .
- d) Calcinado para transformarlo en CaO y usarlo de nuevo o venderlo.

El proceso en caliente esencialmente es el mismo que el proceso en frío, difiere solamente en la velocidad de formación de los precipitados y en que no se requiere cal para eliminar el CO_2 , ya que el agua caliente a temperatura de operación (aproximadamente 100°C), no puede retenerlo. El equipo usado para este proceso puede ser continuo o intermitente. Varían mucho los diseños de estos sistemas, sobre todo en su parte de eliminación de lodos. Algunos constan de inyector de productos químicos, mezclador, cámara de floculación, clarificador con descarga de lodos. Otros tienen mezclador, cámara de floculación o de clarificación o ambas, recipiente de asentamiento de lodos y

filtros.

Desgacificación y Desaereación:

Ciertos gases como CO_2 , N_2 , H_2S , SO_2 y CH_4 se disuelven en el agua y aceleran sus propiedades corrosivas. En cuanto mayor cantidad de gases disueltos mayor es la corrosividad del agua y mayor el ataque que influye sobre las paredes de los equipos.

Los gases se disuelven en el agua hasta su punto de saturación siguiendo las leyes de Dalton y de Henry⁽²⁾, por lo que cada gas ejerce su presión y no se ve afectado por las presiones que ejercen los otros gases.

Los términos de desgacificación y desaereación se refieren a lo mismo, sólo que el primero está orientado a gases que son diferentes al aire.

Por lo general una desgacificación se efectúa mediante una aereación, es decir, cuando se quieren eliminar los gases disueltos en el agua sin importar que tengan oxígeno disuelto. Cuando no debe tener tampoco oxígeno disuelto se debe aplicar una

desaeración, es decir, poner el agua en contacto con vapor.

La eliminación de gases puede ser parcial o total según se necesite. Para agua de alimentación a calderas, se requiere que la cantidad de oxígeno presente sea prácticamente cero y en otros casos se requiere eliminar el CO_2 del efluente de las unidades de intercambio iónico catiónicas, con el fin de economizar en unidades aniónicas.

La eliminación de gases del agua se efectúa por medios mecánicos o térmicos, por adición de productos químicos o por combinación de esos procesos ^{<2.4.2>}.

El método más practicado es el de calentar el agua en calentadores abiertos o de contacto que se conocen como desaeradores.

Para eliminar el CO_2 se utiliza una corriente de aire que se pone en contacto a contracorriente con el agua en un desgasificador. Para eliminar oxígeno se usa una corriente de vapor para agotar el agua con la que se pone en contacto a contracorriente.

La eliminación de gases se favorece con:

- a) Incremento de temperatura

- b) Incremento del tiempo de aereación
- c) Incremento del volumen de aire en contacto con el agua
- d) Incremento de la superficie de contacto del agua expuesta al aire
- e) La eficiencia del proceso es mayor cuando la concentración del gas por eliminar es alta en el agua y baja en el aire.

Puesto que la solubilidad del O_2 , N_2 y CO_2 es cero en el punto de ebullición, el agua fría puede desaerearse si se reduce la presión hasta que hierva.

Ósmosis Inversa:

La ósmosis inversa es un método científico que invierte el proceso natural según el cual una solución diluida pasa espontáneamente a través de una membrana semipermeable hacia una solución más concentrada.

El principio básico de la ósmosis inversa es sencillo: sólo se aplica suficiente presión a la solución concentrada y al invertir el

flujo a través de la membrana semipermeable, se "filtran" las sales y otros sólidos disueltos. Para lograrlo es necesario disponer de una membrana especial, fabricada de material sintético con la propiedad de ser altamente permeable al agua y una barrera efectiva contra las sales y otros minerales disueltos, además, la membrana debe ser durable, económica y de fácil instalación en un sistema simple y compacto.

Ninguna fuente natural proporciona agua de calidad suficiente para asegurar el funcionamiento a largo plazo de una planta de ósmosis inversa. Toda agua, por lo tanto, debe ser previamente tratada hasta cierto grado. Las impurezas y contaminantes que afectan al proceso se agrupan en cuatro categorías⁽⁴⁾:

- A) Incrustantes
- B) Oxidos metálicos
- C) Sólidos en suspensión
- D) Microorganismos

Todos los tipos de contaminantes pueden tratarse con la tecnología existente. Es probable que uno de los métodos o la

combinación de varios de ellos servirá para tratar adecuadamente el agua disponible.

Las aplicaciones de la ósmosis inversa cubren un campo muy vasto: desde la purificación de aguas salobres para uso doméstico o de riego, tratamiento de agua de mar, hasta la producción de agua "ultra pura", para la fabricación de componentes electrónicos.

Intercambio Iónico:

La mayor aplicación a la fecha para el intercambio iónico ha sido el tratamiento de aguas, pero no es la única área en la cual esta herramienta ha sido utilizada.

Originalmente se usaron zeolitas, las cuales son compuestos de aluminio y sílice que tienen la propiedad de intercambiar iones. Algunos autores siguen haciendo la división general de las zeolitas, como:

Zeolitas naturales y Zeolitas sintéticas.

Actualmente se ha generalizado el uso de las zeolitas o resinas sintéticas de intercambio iónico, que son materiales

orgánicos que también tienen la propiedad de intercambiar iones. Siendo los grupos activos de estos compuestos, los sulfónicos, poliestireno y carbón sulfonatado, principalmente^{«11»}.

Estos procesos de intercambio iónico para el tratamiento del agua generalmente incluyen intercambio ión sodio que se refiere al ablandamiento con resinas forma sodio; intercambio ión hidrógeno o ablandamiento con resinas forma hidrógeno y el intercambio aniónico que por lo general es seguido de un intercambio ión hidrógeno para efectuar una desmineralización o desionización que se puede aplicar aniones específicos.

Ablandamiento con resinas forma sodio.-

En forma general, consiste en hacer pasar agua a través de un lecho de este tipo de resinas las cuales tienen la propiedad de cambiar los iones Ca^{++} y Mg^{++} por iones Na^+ y K^+ .

El intercambio se efectúa rápidamente en todo tipo de sales de calcio y magnesio combinadas con HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- , etc.

Cuando llega el momento en que el ablandamiento del agua ya no es total, se debe efectuar una regeneración de la resina, intercambiando los iones Ca^{++} y Mg^{++} acumulados por iones Na^+ . Esta regeneración se efectúa con salmuera.

Se debe aclarar que no es posible lograr ni un agotamiento ni una regeneración al 100% de la resina.

La selectividad de adsorción de una resina tiene preferencia hacia los cationes de más valencias y hacia los de mayor peso molecular, es decir:



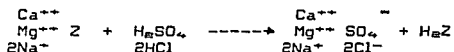
Algunas veces se requieren mayores y en otras menores cantidades de sal para regeneración, esto va a depender principalmente de:

- a) Tipo de material de intercambio iónico
- b) Grado de dureza del agua
- c) Efectividad de distribución de la salmuera en el lecho de resina
- d) Procedimientos aplicados para ahorro de sal
- f) Ablandamiento incompleto del agua para

que se libere.

La otra diferencia que se encuentra en el proceso de las resinas de sodio es que con las resinas de hidrógeno, la regeneración se efectúa con HCl o con H₂SO₄.

Las reacciones de regeneración son las siguientes:

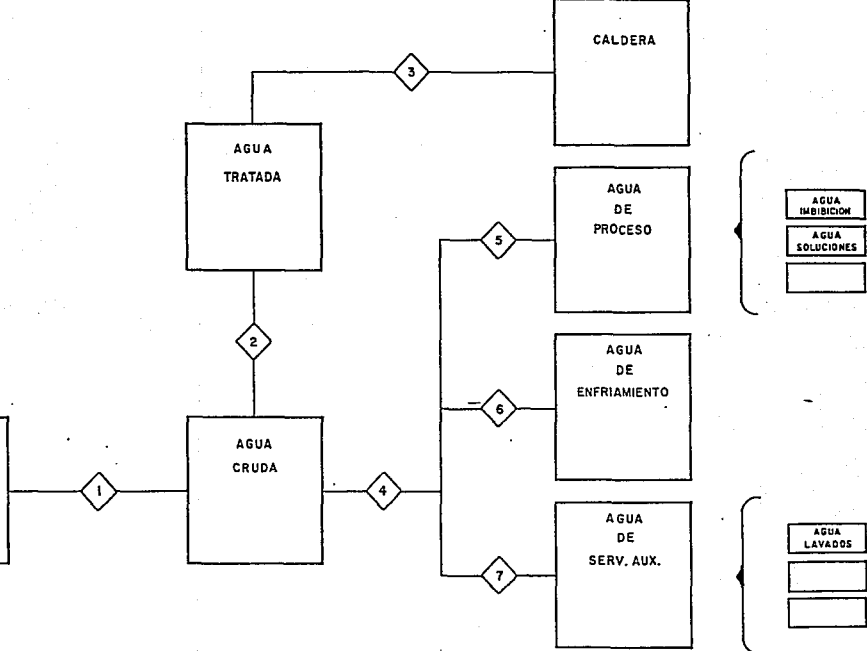


Intercambio aniónico.- Este se realiza con compuestos poliméricos inertes que contienen grupos nitrógeno activos que reaccionan como el amoníaco y el hidróxido de amonio, denominándose intercambiadores aniónicos débilmente alcalinos, que eliminan iones que provienen de ácidos fuertes.

Las aminas cuaternarias y el hidróxido de amonio son intercambiadores aniónicos básicos que pueden neutralizar tanto ácidos fuertes como débiles formando las sales correspondientes.

Desionización (Desmineralización).- Por mucho tiempo el único medio de obtener agua libre de sales disueltas fue la destilación. Pero desde el desarrollo de resinas de

intercambio iónico, ha sido posible producir agua de alta pureza usando un proceso en dos etapas de intercambio iónico. Este proceso ha sido conocido como desionización o desmineralización y consiste de una primera etapa de intercambio de cationes por iones hidrógeno y el efluente de esta primera etapa, que contiene los ácidos de los aniones originales presentes en el agua, se hace pasar a través de un lecho de intercambio aniónico que los elimina¹¹.



NOTA

	1	2	3	4	5	6	7
E							
m ³ /h							
Cp							
Kg/m ³							
°C							
Kg/cm ³ mas							

CAPITULO III

SISTEMAS DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

El grado de pureza del agua depende del uso particular que se le vaya a dar. Si el agua cruda es impura como suele serlo, convendría tener varios sistemas de agua separados para evitar purificar toda el agua que llega a una Planta.

El tratamiento puede incluir generalmente un filtrado y una sedimentación para eliminar sólidos en suspensión, pero su tratamiento subsecuente dependerá del uso que se tenga destinado a cada tipo de agua.

3.1 El Agua según su Uso Industrial

El suministro típico del agua a una planta de proceso puede clasificarse de la siguiente forma:

- A) Agua de proceso
- B) Agua de alimentación a calderas
- C) Agua para usos sanitarios

- D) Agua contraincendio
- E) Agua para servicios varios
- F) Agua de enfriamiento

Cada una de las cuales se puede describir brevemente de la manera siguiente:

Agua de Proceso:

Es el agua que se usa en un proceso como compuesto reaccionante, solvente o para evitar la contaminación de productos o el envenenamiento de catalizadores. Se necesita que esté altamente purificada.—Para esto, generalmente el agua ablandada debe ser además desmineralizada.

Agua de Alimentación a Calderas:

Las calderas modernas de alta presión requieren de agua muy pura. El agua para este uso también se ablanda y posteriormente se purifica desmineralizándola. Además del tratamiento inicial que se le dé, el agua de alimentación a calderas, puede separarse

continuamente del sistema para volverse a tratar ajustando previamente su pH. Esta agua se retorna a la caldera junto con el condensado y el agua de reposición (make up).

Agua para Usos Sanitarios:

Este tipo de agua debe ser potable y estar libre de bacterias patógenas. En poblaciones pequeñas, muchas veces una parte del agua de la planta tratadora debe usarse para este fin. Esta agua se clora y se bombea a un sistema independiente. Mediante pruebas bacteriológicas se puede establecer el cloro residual que debe quedar en la solución para que se asegure la destrucción de todas las bacterias en el agua tratada.

Agua Contra incendio:

Este es un servicio intermitente y para asegurar su capacidad suficiente cuando sea requerido, otros servicios podrán interrumpirse de ser así necesario. El almacenamiento más usado en la industria para

este tipo de agua son los tanques elevados.

La instalación de un sistema de agua contraincendio debe tener la particularidad, en caso de requerirse así, de poder interconectarse con el almacenamiento de agua más grande de que se disponga y éste por lo general es el de agua cruda, ya que el agua contraincendio no requiere de tratamiento previo. También es muy usada el agua de mar como agua contraincendio.

Agua para Servicios Varios:

Este tipo de agua se utiliza para operaciones diversas de lavado, como son limpieza de una determinada área de trabajo, etc. Esta agua debe estar limpia de sedimentos, pero no requiere de ningún tipo de tratamiento posterior. Esta agua no debe ser consumida por el personal.

Agua de Enfriamiento:

Este tipo de agua es una de las que se usa en mayor cantidad en una planta de proceso y de la cual tratarán los

siguientes capítulos al ser su tratamiento por intercambio iónico el objeto del presente trabajo.

Si el agua de enfriamiento proviniera de una fuente inagotable, ésta podría usarse una vez y desecharse, pero como es un recurso escaso, se recircula generalmente a una torre de enfriamiento y se vuelve a usar. Los consumos de agua varían según las temperaturas y el uso particular que se le dé.

Para el agua de enfriamiento es necesario un tratamiento que evite la incrustación, corrosión y formación de algas y hongos, debiéndose incrementar los tratamientos si el sistema es de recirculación.

Para evitar las incrustaciones se agregan al agua pequeñas cantidades de tensoactivos, los cuales aumentan la solubilidad de las sales en el agua evitando que éstas precipiten. También suelen agregarse anticorrosivos como son los cromatos o fosfatos^{<3>}.

Muchas veces se acostumbra en la práctica agregar ácido sulfúrico en cantidades moderadas al agua de enfriamiento ya que éste

convierte el CaCO_3 en CaSO_4 , más soluble y evita además la formación de algas.

Algunas veces se usa agua de mar como agua de enfriamiento, sobre todo en lugares cercanos a la costa donde el agua es "escasa".

3.2 Sistemas Cerrados de Enfriamiento de Agua

En la actualidad, una de las principales necesidades que se tiene dentro de la industria en general, es la de enfriar todo tipo de fluidos. Esta operación de enfriamiento se realiza normalmente en los cambiadores de calor, los que en su mayoría emplean agua como medio de enfriamiento.

Dado que el agua es un recurso cada vez más escaso y la calidad de la misma no siempre es la deseada se hace necesario enfriarla y tratarla para su nuevo uso dentro de circuitos cerrados de enfriamiento.

La siguiente clasificación de los sistemas cerrados de enfriamiento de agua se

basa en la forma de suministrar el medio de enfriamiento (aire) al equipo:

- A) Alberca de enfriamiento
- B) Albercas o pozos de pulverización
- C) Torre atmosférica de tiro natural
- D) Torre atmosférica de tiro natural con espreas
- E) Torre hiperbólica
- F) Torre de tiro forzado a contracorriente
- G) Torre de tiro inducido a contracorriente
- H) Torre de tiro inducido a flujo cruzado

Con la finalidad de contar con una mejor visión de las características de los sistemas arriba mencionados, a continuación se señalan algunas características principales de los mismos:

Alberca de Enfriamiento

Consiste de una alberca o pozo donde simplemente se deja reposar el agua para su enfriamiento.

Las principales ventajas son:

- Bajo costo de construcción
- Largo tiempo de residencia
- Maneja grandes volúmenes de agua

Las desventajas que este tipo de equipo presenta son:

- Baja transferencia de calor
- Se requiere de una gran área para su ubicación
- Operación limitada a las características del medio ambiente
- Contaminación con materia orgánica, por lo que requiere mantenimiento.

Alberca o Pozo de Pulverización

Es un equipo muy semejante al anterior, con la única diferencia que cuenta con un conjunto de espumas para favorecer el contacto directo del aire y el agua pulverizada.

Las principales ventajas que este equipo presenta son:

- Bajo costo de construcción
- Largo tiempo de residencia
- Maneja grandes volúmenes de agua

Las desventajas que este tipo de equipo presenta son:

- Requiere de una gran área para su ubicación
- Pérdidas considerables de agua por arrastre
- Mantenimiento a espreas
- Operación condicionada a medio ambiente
- Alta contaminación con materia orgánica

Torre Atmosférica de Tiro Natural

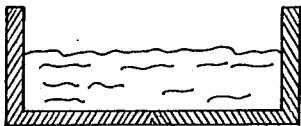
Este tipo de torre funciona como chimenea, ya que la diferencia de densidades entre el aire de la torre y el del exterior, causa un flujo natural de aire frío.

Las ventajas que esta torre presenta son:

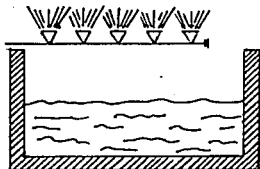
- Un área pequeña de ubicación
- Bajo costo de mantenimiento
- Costo bajo de operación

Las desventajas que estas torres presentan son:

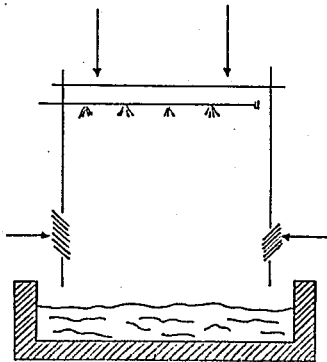
- Costo muy alto de construcción
- Su rango de enfriamiento está limitado a las temperaturas y condiciones del medio ambiente



ALBERCA DE ENFRIAMIENTO



ALBERCA O POZO DE PULVERIZACION



TORRE ATMOSFERICA TIPO NATURAL

Torre Atmosférica de Tiro Natural con Espreas

Este tipo de torre es muy semejante al anterior, con la diferencia que ésta cuenta con un grupo de espreas, además de un grupo de persianas (mamparas) que tienen como finalidad cambiar la dirección del aire.

Las ventajas que este tipo de torre presenta son:

- No existe gasto de energía eléctrica por ventilación
- Poco gasto de mantenimiento (mayor que la torre anterior)

Las desventajas que esta torre presenta son:

- Alto costo de construcción
- Pérdidas de agua por arrastre
- No cuenta con relleno por lo tanto su eficiencia disminuye

Torre Hiperbólica

El principio de operación de este tipo de torres se basa en la diferencia de densidades entre el aire saturado que sale de la torre y el aire que entra. Este flujo de aire es

inducido en la chimenea de gran dimensión que está colocada encima del relleno de la torre,

Las ventajas que este tipo de torre presenta son:

- Tiene pocas pérdidas por arrastre
- No existen gastos por conceptos de ventilación

Las desventajas de esta torre son:

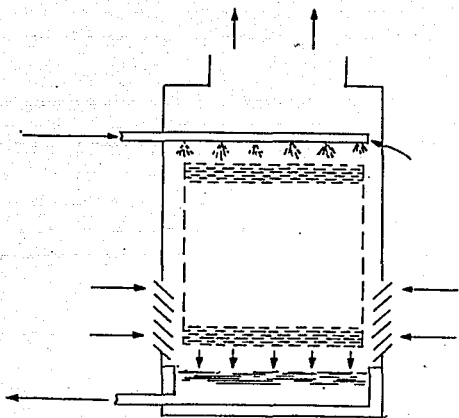
- Gastos de inversión muy altos
- Su eficiencia está limitada a las condiciones del medio ambiente

Torre de Tiro Forzado a Contracorriente

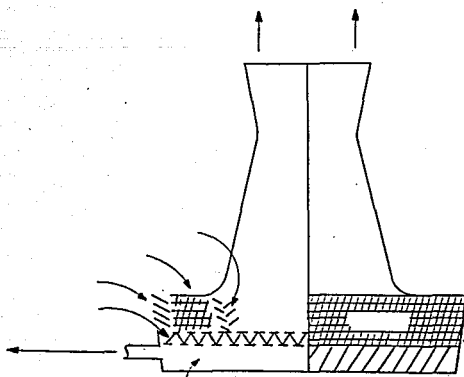
Con este tipo de torres se inicia el grupo de las llamadas de tiro mecánico. La torre está equipada con uno o varios ventiladores a la entrada del aire, estos ventiladores tienen la finalidad de impulsar el aire a través de la torre. De este modo el agua fluye hacia el basín y el aire que entra por la parte inferior de la torre fluye en contracorriente.

Las ventajas que este tipo de torres presenta son:

- Efectiva para acercamientos pequeños



TORRE ATMOSFERICA DE TIRO NATURAL
CON ESPREAS



TORRE PARABOLICA

- Requieren de menos área efectiva para llevar a cabo el enfriamiento.
- Pocas pérdidas por arrastre
- El tipo de motores empleados en los ventiladores son del tipo sin protección al calor y/o humedad

Las desventajas que esta torre presenta son:

- Gran consumo de energía eléctrica por bombeo y ventilación
- Alto costo de construcción
- Tienen mucha recirculación de vapores y aire caliente y esto afecta su eficiencia

Torre de Tiro Inducido a Contracorriente

En este tipo de torres, la disposición o colocación de los ventiladores es en la parte superior, es decir a la salida del aire caliente. Su mecánica de operación consiste en extraer el aire caliente de toda la torre por medio del ventilador. La operación se lleva a cabo en contracorriente de acuerdo al sentido del agua, ya que ésta sigue la

trayectoria de arriba hasta el fondo de la torre, mientras que la trayectoria del aire es en sentido opuesto del fondo de la torre a la parte superior.

Las ventajas que este tipo de torre presenta son:

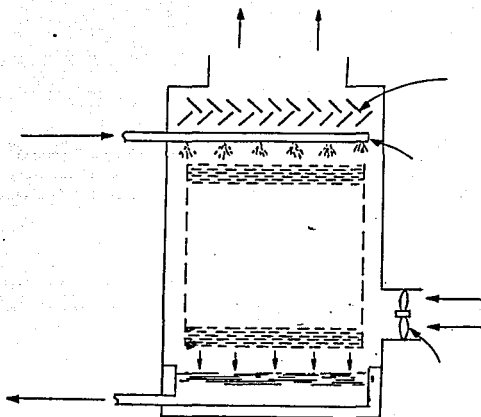
- Para acercamientos pequeños
- Area efectiva menor que tiro forzado
- Poca pérdida por arrastre
- Su caída de presión para el agua y aire es del orden de 3/4 pulg. de agua

Las desventajas lue este tipo de torres presenta son:

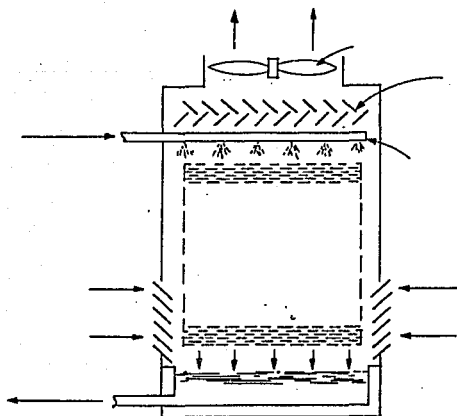
- Mayor altura que la de flujo cruzado
- Mayor costo de operación que la flujo cruzado
- Tienen más efecto por recirculación de aire caliente

Este tipo de torre cuenta con las siguientes partes o sistemas:

- Sistema de distribución de agua (bombeo)
- Relleno (empaquet)
- Sistema de ventilación (ventiladores)
- Eliminadores de rocío



TORRE DE TIRO FORZADO A CONTRACORRIENTE



TORRE DE TIRO INDUCIDO A CONTRACORRIENTE

- Estanque de agua (basín)
- Persianas
- Equipo para dosificación de químicos

Torre de Tiro Inducido a Flujo Cruzado

Las características de este tipo de torre son muy semejantes al caso anterior. La colocación de los ventiladores es también en la parte superior rigiéndose bajo el mismo principio de operación, lo diferente es que el flujo de aire con respecto al agua, es cruzado.

Las ventajas que este tipo de equipo presenta son:

- Tienen menor altura que la torre a contracorriente
- Tienen menor consumo de energía eléctrica por ventilación y bombeo
- Su caída de presión es del orden de 1/2 pulg. de agua
- Da un mayor acercamiento
- Se utiliza para flujos de hasta 10 000 gal/min como máximo

Las desventajas que este equipo presenta

son:

- Requiere una mayor área de exposición, por lo que el área de terreno es mayor
- Tiene más pérdidas por arrastre
- Tiene un alto costo por mantenimiento

Este tipo de torres cuenta con las siguientes partes:

- Sistema de distribución de agua
- Relleno (empaquet)
- Sistema de ventilación (ventiladores)
- Eliminadores de rocío
- Persianas
- Equipo para dosificación de químicos

En lo sucesivo el tema se enfocará concretamente a las torres del tipo tiro inducido a flujo cruzado.

Todas las torres de enfriamiento, sin excepción, se rigen por el mismo mecanismo de operación, el cual consiste en poner en contacto directo una corriente de agua caliente con una corriente de aire frío. El contacto de ambas, da lugar a una transferencia de masa y calor en forma simultánea, logrando que disminuya la temperatura del agua.

En la parte superior de la torre el agua caliente se pone en contacto con el aire de salida que es más frío que el agua, se observa que la presión parcial del agua fuera del líquido y su temperatura correspondiente, son mayores que las del aire de salida. De aquí se deduce que ambos potenciales sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando por lo tanto, la entalpia del aire. En esta forma, es posible que la temperatura del agua descienda debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada antes de alcanzar el fondo de la torre por donde entra el aire, sin embargo, el límite al que la temperatura del agua de salida puede llegar en una torre de enfriamiento, es el que está adiabáticamente en

equilibrio con el aire de entrada, es decir, el bulbo húmedo.

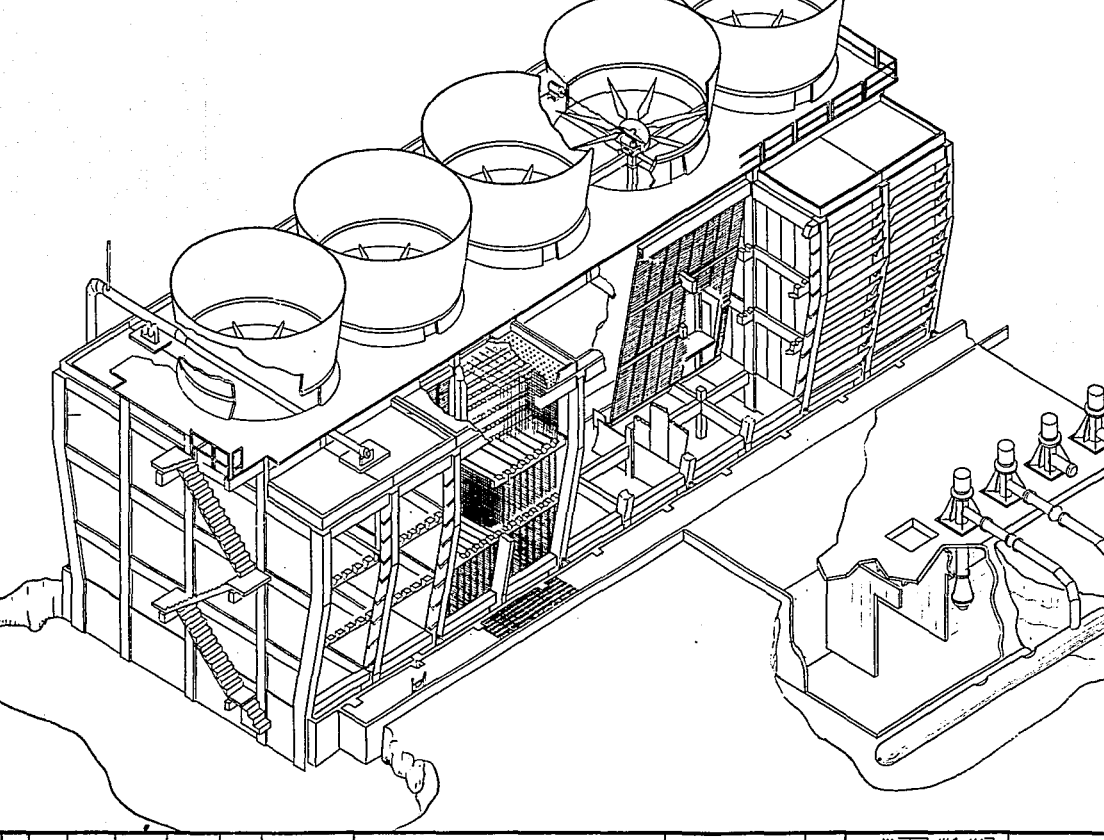
La caída del agua puede ser libre o sobre una serie de empaques según el tipo de torre, pero siempre con la finalidad de establecer contacto entre el agua y el aire para lograr la disminución de la temperatura del aire. Utilizando empaque, inicialmente se forma una película y luego gotas, que van cayendo hasta golpear el siguiente empaque; esto da lugar a que se enfríe y el aire se humidifique.

La forma de suministrar el aire a cualquier tipo de torre, es un factor determinante en la operación y eficiencia de misma, las dos maneras de suministrarlo son: por tiro natural y por tiro mecánico ya sea inducido o bien forzado.

Como se mencionó anteriormente la torre de enfriamiento presenta pérdidas del agua que se enfría dentro de la misma, las pérdidas más significativas son aquéllas por arrastre de vapor y las debidas a la purga que periódica o continuamente se efectúa con la finalidad de

mantenerla operando sin atascamientos por precipitaciones de sales minerales al aumentar la concentración de las mismas.

El objetivo general de la presente tesis es describir y calcular un sistema de tratamiento que permita acondicionar el agua que se utiliza tanto para la primera corrida de servicio, como para reponer las pérdidas (make-up), que se presentan regularmente en una torre de enfriamiento.



CAPITULO IV

TRATAMIENTO CON INTERCAMBIADOR CATIONICO DEBIL

Antes de su tratamiento propiamente dicho, las aguas crudas se someten generalmente a un pretratamiento que comprende un cierto número de operaciones físicas y/o químicas que tienen por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que, por su naturaleza o tamaño, crean problemas en los tratamientos posteriores. Por otro lado, los procesos químicos de ablandamiento y descarbonatación consisten en añadir reactivos al agua para que los diversos iones perjudiciales se transformen en precipitados insolubles. Dichos procesos también pueden llevarse a cabo por intercambio iónico, ya que constituye un excelente método de tratamiento que se aplica tanto para las aguas de superficie como para las de pozo.

La necesidad de cumplir con los requerimientos de agua ha originado muchos avances en el diseño de equipo, ha requerido la incorporación de nuevas ideas, las que

en muchos casos tienden a apartarse de la suavización convencional.

4.1 Suavización

Un proceso económico, aplicable para la eliminación de dureza presente en el agua, que no es permitida cuando el agua se emplea como agua de repuesto en sistemas de enfriamiento, es la suavización o ablandamiento.

El nivel de impurezas de calcio, magnesio y bicarbonatos, deben ser abatidos para evitar incrustaciones y/o corrosiones que a su vez originan pérdidas de eficiencia y fallas principalmente en los equipos de enfriamiento y generación de vapor.

Existen varios métodos para suavizar el agua, entre los más conocidos se encuentran los siguientes:

- A) Suavización mediante dosificación de cal-carbonato en frío.
- B) Suavización mediante dosificación de cal-carbonato en caliente.
- C) Suavización por intercambio iónico ciclo

sodio.

D) Suavización por intercambio iónico ciclo hidrógeno.

Como se ha mencionado anteriormente, los procesos químicos de desendurecimiento y descarbonatación consisten en añadir reactivos al agua para que los diversos iones perjudiciales se transformen en precipitados insolubles.

Por lo anteriormente descrito en la presente tesis y en el amplio material bibliográfico (B.B.O) disponible en el campo de la suavización mediante reactivos químicos, procederemos a describir algunos conceptos importantes de los procesos de suavización del agua mediante materiales de intercambio iónico.

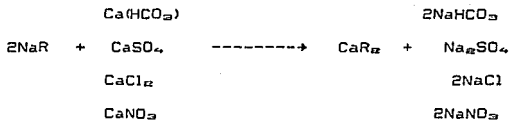
4.2 Suavización por Intercambio Iónico Ciclo Sodio

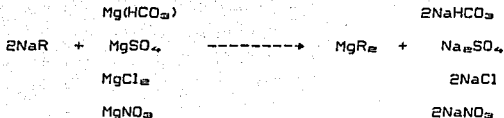
El propósito principal de la suavización por medio de las resinas catiónicas ciclo sodio es el de eliminar los iones que forman las incrustaciones en equipos de enfriamiento y generadores de vapor, es decir, el calcio y el magnesio, sustituyéndolos por una cantidad equivalente de iones sodio.

Se usan generalmente, resinas poliestirénicas sulfonadas, que pueden tratar caudales mucho más grandes de agua. Además estas resinas no se dañan por su uso en agua caliente o en aguas que tengan un pH alto. Están hechas por la copolimerización del estireno y divinilbenceno, seguidas de una sulfonación.

Cuando se pasa un agua a través de un lecho de un intercambiador de cationes ciclo sodio, el calcio y el magnesio se quedan en dicho lecho y en forma simultánea proporciona una cantidad equivalente de sodio a cambio de ella.

Usando el símbolo R para el radical correspondiente al intercambiador de cationes, a continuación se dan las reacciones de suavización para los compuestos de calcio y magnesio:

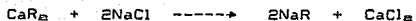




Cuando disminuye la capacidad del intercambiador de cationes para producir agua completamente suavizada, se dice que está agotada y se pone fuera de servicio temporalmente para reacondicionarlo:

- a) Primero se retrolava, para lavar y clasificar la cama hidráulicamente.
- b) Regenerarla con una solución de sal común (cloruro de sodio al 10%), la cual elimina el calcio y el magnesio en forma de sus cloruros que son solubles y simultáneamente se restaura el intercambiador de cationes a su forma sodio.
- c) Se enjuaga la cama de los productos solubles de la regeneración y del exceso de sal.
- d) Nuevamente la unidad se pone en servicio, lista para suavizar otro volumen igual de agua.

Las reacciones de regeneración se pueden expresar como:



Normalmente se usan tanques separados, el tanque de almacenamiento de salmuera saturada y el tanque de medición de la misma. En algunas plantas (generalmente grandes), se usan piletas de concreto para el almacenamiento de sal, tienen una capacidad de 1 1/4 o más furgones de ferrocarril de sal, simplificando así su manejo, ya que ésta se puede descargar directamente en la pileta y permitir al comprador obtener precios de carro completo siendo más barata que comprarla envasada en sacos.

Algunas de las limitaciones de los suavizadores ciclo sodio son las siguientes:

- a) pH máximo de agua cruda, 11.0
- b) pH mínimo de agua cruda, cualquiera.
- c) Temperatura de operación máxima, 43.3 °C
- d) Las aguas que tienen turbidez no deben pasarse a través de un suavizador ciclo sodio, ya que los depósitos acumulados cubrirán las partículas de resina y

reducirán su eficiencia. Se permite una turbidez máxima de 5 ppm.

e) La cantidad máxima de hierro en el agua cruda no debe exceder de 0.5 ppm por cada 1 ppm de dureza hasta 50 ppm de hierro.

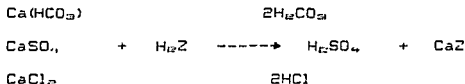
El hierro en forma férrica (Fe^{+++}), es adverso a la zeolita debido a que precipita en ella cubriéndola.

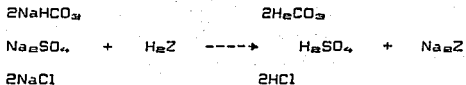
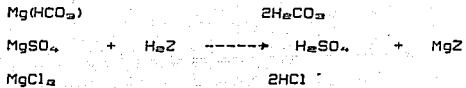
4.3 Suavización por intercambio iónico. Ciclo Hidrógeno

La suavización por intercambio iónico ciclo hidrógeno, involucra un tratamiento con una resina catiónica débil. Usualmente, el agua es pasada a través de un intercambiador catiónico a ciclo hidrógeno (H_2^+Z), para intercambiar los cationes en solución por iones en hidrógeno.

Las reacciones efectuadas son las siguientes:

a) Suavización.





b) Regeneración.



Como se observa, el agua tratada contiene los ácidos correspondientes, que son, ácido carbónico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico. Se puede eliminar prácticamente todo el ácido carbónico libre aereando el efluente o tratándolo por desaereación al vacío. Como no se puede tolerar acidez mineral libre en el agua para sistemas de enfriamiento, el ácido debe ser neutralizado.

Esto puede obtenerse en dos formas, ya sea agregando sosa caústica para elevar la alcalinidad y neutralizar el ácido, o por la mezcla de efluente ácido con el efluente de una unidad catiónica ciclo sodio, la que contiene bicarbonato de sodio.

Mediante la mezcla de las aguas ácidas y alcalina suavizada, en cantidades apropiadas, puede asegurarse la obtención de la alcalinidad deseada. En este caso, la desaereación sigue al mezclado para eliminar el bióxido de carbono adicional que se desprende.

En algunos casos resulta más económico mezclar agua suavizada efluente de un intercambiador ciclo hidrógeno con agua cruda hasta lograr tener un pH adecuado y lograr con esto un número de ciclos de concentración óptimo en los sistemas de enfriamiento.

4.4 Intercambiadores Catiónicos

Los intercambiadores catiónicos se dividen en dos grupos:

- a) Intercambiadores de cationes débilmente ácidos.

b) Intercambiadores de cationes
fuertemente ácidos

Los Intercambiadores débilmente ácidos, utilizados para sistemas de suavización ciclo hidrógeno, se caracterizan por la presencia de radicales carboxílicos (COOH^-), que pueden equipararse a los ácidos orgánicos del tipo del ácido fórmico o acético^{«11»}.

Los productos carboxílicos presentados como $(\text{COOH})_n\text{R}$, son del tipo débilmente ácido. En el ablandamiento del agua, son capaces de fijar los iones calcio, magnesio o sodio correspondientes a los bicarbonatos, liberando ácido carbónico, pero no pueden intercambiar los cationes en equilibrio con aniones sulfato, cloruro o nitrato.

Existen actualmente toda una serie de resinas de gran porosidad denominadas, según los fabricantes, macroporosas, macrorreticulares, isoporosas, etc. Se discute mucho todavía sobre las estructuras exactas de estos tipos de resinas.

Las resinas macroporosas presentan dos tipos de ventajas:

- a) Mejor resultado de tratamiento y mayor resistencia al envenenamiento en presencia de aguas cargadas de coloides orgánicos.

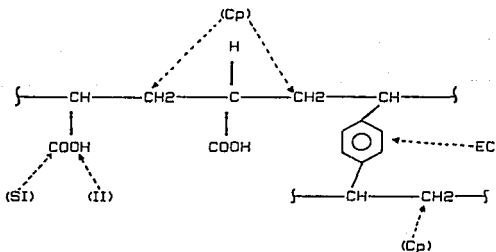
El porcentaje de materias orgánicas que retiene es mayor que en el caso de las resinas clásicas, pero también es igualmente superior el porcentaje de elución en la regeneración.

b) Mejor resistencia mecánica, tanto a los esfuerzos físicos (presión-depresión), como a los químicos.

A continuación se presenta la estructura química de la resina usada para la suavización de agua a ciclo hidrógeno por intercambio iónico.

Resina carboxílica catión débil, Amberlite

IRC-84



Donde:

EC: Enlace de cruzamiento

CP: Cadena de polimero

SI: Sitio de intercambio

II: Ión intercambiable

Para obtener la eficiencia óptima en una operación de intercambio de iones, una parte fundamental es la selección de la resina o combinación de resinas adecuadas.

Para la fabricación de resinas, principalmente se efectúa una polimerización de diversos materiales como son el estireno y el divinil benceno, constituyendo éstos la parte base de la resina (R_2) y teniendo unido a ella el grupo intercambiable (H^+).

La fabricación de la resina es de mucha importancia, ya que de la estructura formada dependerán varias de sus propiedades físicas como el grado de hinchamiento, el contenido de humedad y la porosidad, entre otras; la resistencia y capacidad de la resina dependerá del material usado, procedimiento de fabricación, número y tipo de enlaces.

En base a los párrafos anteriores, se deduce que el diseño de una resina intercambiadora de iones con fines comerciales, implica la selección de un número de enlaces adecuados que favorezca un

equilibrio entre su comportamiento cinético y sus propiedades hidráulicas.

Para la selección de la resina adecuada, se deben tomar en cuenta las impurezas presentes en el agua disponible y el grado de pureza que se desea obtener.

Como se mencionó anteriormente, la suavización a ciclo hidrógeno se realiza en dos etapas principales:

En la etapa (a) los cationes disueltos en el agua son intercambiados por hidrógeno. La reacción general es la siguiente:



Donde:

R_m^- es el sitio aniónico fijo de la resina intercambiadora catiónica

a^+ es el catión (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++})

El intercambio se lleva a cabo con resinas catiónicas débiles, que contienen un grupo funcional $COOH^-$, éstas sólo eliminarán la parte del total de los cationes que es equivalente a la

Existen muchas formas de solucionar esa fuga:

La primera, cuando la resina carboxilica es seguida por una resina sulfónica ciclo sodio.

Segundo, si la dureza permanente es baja, la resina catiónica podría ser colocada en la misma unidad con la resina carboxilica, pero mantenida en el fondo. La sal no afectará la resina carboxilica y no desdoblará sales.

Tercero, alimentando carbonato de sodio al agua cruda, para que la concentración alcalina sea equivalente o iguale a la dureza, esto eliminará la fuga de dureza.

4.5 Diseño y Cálculo del Sistema

Por medio de la presente memoria de cálculo se pretende mostrar el diseño de las unidades de tratamiento del agua de repuesto en sistemas cerrados de enfriamiento de agua (torres de enfriamiento), mediante el uso de un intercambiador catiónico débil ciclo hidrógeno.

Para simplificar el procedimiento se han manteniendo fijos algunos datos como son:

- a) Número de unidades o trenes a utilizar.
- b) Dimensiones del equipo (recipientes, bombas, etc.).
- c) Condiciones de operación (presión y temperatura).
- d) Tipo de resina.

Los parámetros que se pueden variar son:

- a) Flujos (se tiene la limitante de poder manejar 3900 gal/min por los tres trenes).
- b) Tiempos de servicio.

El diseño de la unidad de tratamiento de agua de la Refinería de Tula, Hidalgo se muestra con el procedimiento manual.

Se adjunta toda la información necesaria para su elaboración (gráficas, equivalencias de unidades, referencias, etc.).

Bases de Diseño:

La planta tratadora de agua mediante catión débil ciclo hidrógeno, que operará en la Refinería de Tula, Hidalgo; será diseñada para una capacidad (Q) de 3900 gal/min.

Para efectuar correctamente el ablandamiento de agua, será necesario instalar cuatro trenes en total: tres en servicio y uno en regeneración.

Cada tren tendrá un ciclo de servicio de 12 horas y 4 horas de regeneración.

Q = 3900 gal/min.

NT = 3 unidades en servicio y uno en regeneración.

Para efectuar el diseño de la unidad en la refinería de Tula, Hidalgo, y en general en cualquier lugar donde se instale un sistema suavizador catión débil (ciclo hidrógeno), se deberán tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Como se ha mencionado en el desarrollo de la presente tesis, el agua que ha sido pretratada y y aún contiene impurezas que es necesario eliminarlas para evitar problemas, sobre todo cuando el efluente es usado en torres de enfriamiento, debe someterse a tratamiento por suavización.

Para iniciar el cálculo, todas las impurezas contenidas en el agua alimentada, deben ser expresadas como partes por millón de CaCO_3 . Si el análisis de la planta a diseñar no está expresado como anteriormente se menciona, el primer paso será efectuar las conversiones necesarias para obtener un análisis homogéneo.

- 1.- En el caso particular de la Refinería de Tula Hidalgo, se proporciona el análisis mostrado en la tabla 4.1, "Análisis de Agua Cruda", en el cual se observa lo siguiente:

Tabla 4.1 " Análisis de Agua Cruda "

SUSTANCIA		(1)	(2)	(3)	(4)
CATIONES					
Calcio	Ca ⁺⁺	---	277	----	277
Magnesio	Mg ⁺⁺	42	---	4.10	172
Sodio	Na ⁺⁺	174	---	2.18	379
Hidrógeno	H ⁺	---	---	----	---
CATIONES TOTALES.....			828		
ANIONES					
Bicarbonatos	HCO ₃	---	375	----	375
Carbonatos	CO ₃ ⁻	---	---	----	---
Hidroxilos	OH ⁻	---	---	----	---
Fosfatos	PO ₄ ⁻	---	---	----	---
Cloruros	Cl ⁻	---	246	----	246
Sulfatos	SO ₄ ⁻	199	---	----	207
Nitratos	NO ₃ ⁻	---	---	----	---
ANIONES TOTALES.....			828		
Dureza Total					
Alcalinidad A			375		375
Alcalinidad B					
Dureza no carbonatada					
Alcalinidad de sodio					
Bióxido de Carbono	CO ₂				
Sílice	SiO ₂	69.9	---	0.83	58
Hierro	Fe				
Turbidez					
Color					
Sólidos totales + SiO ₂					
pH		7.9			7.9

DONDE:

- (1) ppm de sustancia
- (2) ppm de CaCO₃ equivalente
- (3) Factor de conversión
- (4) Composición expresada como ppm CaCO₃

En la Tabla 4.1, aparecen dos columnas de Factores de Conversión referidos a CaCO_3 ; la primera proporciona el factor para convertir las ppm de "sustancia" a ppm de CaCO_3 equivalente; en la segunda está el factor para convertir las ppm de CaCO_3 a ppm de "sustancia" equivalente.

En este caso particular el cálculo es el siguiente:

$$17.02 \text{ ppm sustancia} \times 4.10 = 70 \text{ ppm } \text{CaCO}_3 \\ \text{equivalente.}$$

El sodio está también expresado como ppm de sustancia y su valor numérico es 174. Para expresarlo como ppm de CaCO_3 , el factor es 2.18. Entonces:

$$174 \text{ ppm sustancia} \times 2.18 = 379 \text{ ppm } \text{CaCO}_3 \\ \text{equivalente.}$$

Los factores usados para homogeneizar el análisis proporcionado se encuentran en la columna 3 de la tabla 4.1. Si otros factores de conversión fueran requeridos, consúltense las tablas 1 y 1-A que se anexan en el capítulo VI.

Finalmente el análisis homogeneizado se encuentra tabulado en la columna 4, todo expresado en ppm de CaCO₃.

Para efectuar el diseño de la unidad de tratamiento de agua, también es necesario indicar la calidad del efluente requerido en la salida de cada etapa del tratamiento.

En el caso de la refinería de Tula Hidalgo, se dispone de la información contenida en la tabla 4.2 "Calidad Esperada del Efluente". Como se podrá observar en la columna cuatro están las restricciones más importantes, ya que este efluente es considerado como agua tratada o bien, agua suavizada, la cual puede ser utilizada para alimentar a las torres de enfriamiento como agua de repuesto.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Tabla 4.2 "Calidad Esperada del Efluente"

SUSTANCIA		(1)	(2)	(3)
CATIONES				
Calcio	Ca ⁺⁺	277	---	----
Magnesio	Mg ⁺⁺	172	74	74
Sodio	Na ⁺⁺	379	379	379
Hidrógeno	H ⁺	---	---	---
CATIONES TOTALES.....		828	453	453
ANIONES				
Bicarbonatos	HCO ₃	375	---	----
Carbonatos	CO ₃ ⁼⁼	---	---	----
Hidroxilos	OH ⁻	---	---	----
Fosfatos	PO ₄ ⁻	---	---	----
Cloruros	Cl ⁻	246	246	246
Sulfatos	SO ₄ ⁻	207	207	207
Nitratos	NO ₃ ⁻	---	---	----
ANIONES TOTALES.....		828	453	453
Dureza Total				
Alcalinidad A		375		
Alcalinidad B				
Dureza no carbonatada				
Alcalinidad de sodio				
Bióxido de Carbono CO ₂				
Sílice	SiO ₂	58		
Hierro	Fe			
Turbidez				
Color				
Sólidos totales + SiO ₂		886	511	511
pH		7.9	6.3	6.3

DONDE:

- (1) Agua Pretratada
- (2) Efluente de la unidad ciclo hidrógeno
- (3) Efluente del descarbonatador

Nota: Todo el análisis está expresado en ppm CaCO₃

El siguiente paso es la selección de las resinas que se van a utilizar en el ablandamiento de acuerdo al sistema deseado.

Se requerirá de una resina catiónica débil.

Las resina recomendada para este sistema es: CATION DEBIL: Amberlite IRC-84 o similar; en las tablas 4 y 5 se encuentran sus características físicas e hidráulicas, condiciones de operación y otras notas importantes. El reactivo utilizado para regeneración es ácido sulfúrico.

3.- Selección de Niveles de Regeneración.

Es importante elegir correctamente el nivel de regeneración para el catión, (NR)c, es decir:

El volumen de regenerante alimentado a la unidad por pie cúbico de resina. De esta manera, esta elección determinará la capacidad

de intercambio del material iónico, el consumo de reactivos y el volumen de resina.

Para fijar el nivel de regeneración del suavizador a ciclo hidrógeno (catión débil), se dispone de la Tabla 4, donde se puede leer un nivel de regeneración del 110% sobre el teórico necesario.

Respecto a la fuga tanto de magnesio como de sodio, es importante conocer la relación de dureza/alcalinidad, ya que si:

La relación es mayor o igual a uno, habrá fuga no sólo de todo el sodio presente, sino también parte de magnesio, tanto como la diferencia de dureza menos alcalinidad.

Por el contrario, si la relación dureza/alcalinidad es menor que la unidad, se removerá todo el calcio, todo el magnesio y parte del sodio, tanto como el equivalente a la suma de calcio, magnesio y sodio expresados en ppm CaCO_3 ; esto dependiendo del porcentaje de la corrida o tiempo de operación, y a la

acidez mineral libre, como se puede observar en las gráficas Nº's 4 y 5 anexas.

De la tabla 4.2 "Calidad Esperada del Efluente", se observa que la cantidad de:

magnesio es	172	ppm	CaCO ₃
calcio es	277	"	"
sodio es	379	"	"
bicarbonatos es	"	"	375

Cuando la relación dureza/alcalinidad es igual o mayor que la unidad, habrá fuga de magnesio y de todo el sodio presente. La fuga de magnesio está dada por:

$$\begin{aligned}\text{Fuga de magnesio} &= (277 + 172) - 375 \\ &= 74 \text{ ppm CaCO}_3\end{aligned}$$

El siguiente caso es cuando la relación dureza/alcalinidad es menor que la unidad, y se tiene lo siguiente:

De la gráfica Nº 5, se fija el porcentaje de corrida, así como la cantidad de sales formadas, es decir:

$$\begin{aligned}\text{Sales formadas} &= 277 + 172 + 379 - 375 \\ &= 453 \text{ ppm CaCO}_3\end{aligned}$$

Como en la gráfica sólo se tiene hasta 280 ppm CaCO_3 de sales formadas, se entra con este valor y con la curva N° 4.

Al 20% de corrida se leerá una acidez mineral libre de 24 ppm, que corresponde a cero de fuga de alcalinidad; al 80% de corrida, se leerá una acidez mineral de cero pero con una fuga de alcalinidad de 2%, finalmente cuando se trabaje al 100% de corrida se tendrá una fuga del 10% del total.

Pero si más del 10% del total de alcalinidad como fuga puede ser tolerado, se extenderá la corrida y se presentará el fenómeno elución; pudiéndose dar el caso de fugar dureza como magnesio, pero esto sería perjudicial para los procesos de enfriamiento. En caso de presentarse lo anterior, se hará uso de la gráfica N° 5, en la cual, con la cantidad de dureza se encontrará la curva correspondiente y nos dará la fuga de alcalinidad aunada a la suma de Ca^{++} y Mg^{++} menos HCO_3^- .

Cálculo de la Unidad Suavizadora a Ciclo
Hidrógeno - Cation Débil

- 1.- El primer paso es calcular la relación dureza/alkalinidad y proceder a leer las gráficas específicas de la resina Amberlite IRC-84.

Análisis disponible de agua influente a la unidad.

Temp. = 55 °F considerando que es agua de pozo

Ca⁺⁺ = 277 ppm CaCO₃

Mg⁺⁺ = 172 ppm CaCO₃

Na⁺ = 379 ppm CaCO₃

HCO₃⁻ = 375 ppm CaCO₃

Dureza = Dureza Ca⁺⁺ + Dureza Mg⁺⁺

Dureza = 277 + 172 = 449 ppm CaCO₃

Alcalinidad como HCO₃⁻ = 375 ppm CaCO₃

$$\begin{array}{r} \text{Dureza (H)} \qquad \qquad \qquad 449 \\ \hline \text{Alcalinidad (A)} \qquad \qquad 375 \\ \hline \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad = \qquad 1.197 \end{array}$$

H/A = 1.197

Como la relación es mayor que 1 se tiene dureza temporal y permanente, por lo que a la salida del suavizador se eliminará todo el calcio , parte del magnesio pero nada de sodio

a) La fuga de magnesio estará dada por:

$$\text{Mg}^{++} \text{ ppm CaCO}_3 = \text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{++}$$

$$\text{Mg}^{++} \text{ ppm CaCO}_3 = 172 - 375 + 227$$

$$\text{Mg}^{++} \text{ ppm CaCO}_3 = 74$$

b) La cantidad de kilogramos a eliminar por cada galón de agua tratar, esto es tomando en cuenta la relación H/A = 1.97, indica que la resina eliminará únicamente los cationes equivalentes a la alcalinidad debida a los bicarbonatos, es decir:

$$\begin{aligned} \text{kilogramos a remover} &= \frac{375 \text{ ppm CaCO}_3}{17100 \text{ ppm CaCO}_3} \\ &= 0.02193 \frac{\text{Kgr}}{\text{gal}} \end{aligned}$$

2.- Cálculo de la capacidad de eliminación:

Se determina en base al total de cationes y con la relación dureza/alcalinidad.

Con estos datos se hace uso de la gráfica No. 6 anexa.

Total de cationes = 828 ppm CaCO₃ (tabla 4.1)

H/A = 1.197 (calculada en el punto 1 anterior)

T = 55 °F considerando agua de pozo

Se tiene una capacidad de 54 Kgr/pie²

3.- Cálculo del volumen de resina:

a) Volumen total de agua a tratar.-

Calculado en base al flujo por unidad y al tiempo de operación, es decir:

$$Q = 3900 \text{ gal/min}$$

$$\text{Tiempo de operación} = 12 \text{ horas}$$

$$\text{Tiempo de regeneración} = 4 \text{ horas}$$

Número de trenes: 3 en operación y 1 en regeneración.

Con lo anterior se tiene:

$$3900 \frac{\text{gal/min}}{\text{tren}} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \times 12 \text{ hr} \times \frac{3 \text{ tren}}{\text{planta}}$$

Volumen de agua a tratar = 936,000 gal

b) Cantidad de impurezas (iones) a eliminar.-

Se calculan en base al volumen total de agua a tratar, así como a los kilogramos por galón, calculados en el punto 1.b anterior.

$$0.02193 \frac{\text{Kgr}}{\text{gal}} \times 936 \text{ 000 gal} = 20 \text{ 526.48 Kgr}$$

c) Determinación del volumen teórico de resina.- Se obtiene tomando en consideración la capacidad de la resina calculada en el punto 2, así como los kilogramos totales a eliminar, obtenidos en el punto 3.b, es decir:

Capacidad de la resina = 54 kgr/pie³

Kilogramos por servicio = 20 526.48

$$VR = \frac{20\ 526.48\ \text{Kgr}}{54\ \text{Kgr/pie}^3} = 380.12\ \text{pie}^3$$

4.- Corrección del volumen de resina tomando en cuenta la relación de flujo y volumen de resina.

$$\text{Relación} = \frac{1300\ \text{gpm}}{380.12\ \text{pie}^3} = 3.42\ \text{gpm/pie}^3$$

Con este valor entrando a la gráfica No. 2, se tiene que:

Capacidad = 49 Kgr/pie³

5.- Volumen real de resina de acuerdo a la capacidad corregida:

Se toman en cuenta los kilogramos totales a eliminar (calculados en el punto 3.b) y la

capacidad ya mencionada:

$$VR = \frac{20\ 526.48\ \text{Kgr}}{49\ \text{Kgr/pie}^3} = 418.91\ \text{pie}^3$$

6.- Corrección del volumen de resina debido a:

a) Agua de Enjuague.

Esta corrección se efectúa en base a las ppm CaCO_3 contenidos en el agua de enjuague y se calcularán los kilogramos totales que hay que eliminar debido a esta etapa operacional.

Para lo anterior se usa la Tabla No. 4, donde la recomendación es de 50-75 gal/pie³. Se eligió 75 gal/pie³.

$$\begin{aligned}\text{Vol. agua enjuague} &= VR \times 75\ \text{gal/pie}^3 \\ &= 418.91\ \text{pie}^3 \times 75\ \text{gal/pie}^3 \\ &= 31\ 418.25\ \text{gal}\end{aligned}$$

Además en este volumen irá incluido el volumen de la etapa operacional de desplazamiento, que se introducirá a razón de:

- Desplazamiento: 0.25 a 1.0 gal/pie³
- Ejuague: 1.25 gal/pie³

Volumen de agua para desplazamiento:

$$418.91 \text{ pie}^3 \times 7.48 \text{ gal/pie}^3 = 3133.5 \text{ gal}$$

a razón de 1 gpm/pie³.

Volumen de agua de enjuague:

$$31418.25 - 3133.5 = 28284.7 \text{ gal}$$

a razón de 1.25 gpm/pie³.

Los kilogramos contenidos en el agua de enjuague y de desplazamiento, resultan de multiplicar los kilogramos por galón por el total de galones necesarios para estas etapas, es decir:

$$0.02193 \text{ Kgr/gal} \times 31418.25 \text{ gal}$$
$$= 689 \text{ Kgr}$$

Por lo tanto los kilogramos a eliminar por concepto de servicio, enjuague y desplazamiento serán:

$$20526.48 + 689 = 21215.48 \text{ Kgr}$$

7.- Volumen máximo de Resina:

Tomando en cuenta los kilogramos totales calculados en el punto 6 anterior y la capacidad corregida de la resina, calculada en el punto 4; se tiene que el volumen

máximo de resina es:

$$\text{VR maximo} = \frac{21\ 215,48 \text{ Kgr}}{49 \text{ Kgr/pie}^3} = 432,97 \text{ pie}^3$$

Es importante señalar que no se toman en cuenta los kilogramos que trae consigo el agua de retrolavado (también es pretratada), porque esta etapa es anterior a la regeneración; así como el agua de dilución; todo ello por recomendación del fabricante.

B.- Determinación de la Caída de Presión en la "cama" de resina.

El volumen de resina calculado en el punto 7 anterior, es cuando se va a iniciar el servicio, pero cuando éste termina, la resina presentará un hinchamiento; para esto, el fabricante recomienda un incremento de volumen del 25%, ello en base a la relación H/A = 1, es decir:

$$432,97 \text{ pie}^3 \times 1,25 = 541,21 \text{ pie}^3$$

(ver Tabla No. 2).

a) Cálculo de la Caída de presión:

Utilizando la Gráfica No. 1, y con:

Relación de flujo/área

$$Q = 1300 \text{ gpm}$$

$$\text{Area} = 0.785 D^2 = 0.785(10.5 \text{ pie})^2$$

$$= 86.59 \text{ pie}^2$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{1300 \text{ gpm}}{86.59 \text{ pie}^2} = 15.01 \text{ gpm/pie}^2$$

Temperatura = 55 °F

Resulta una caída de presión:

3 psi/pie (Ver gráfica No. 1)

Como se tiene un volumen de resina igual a 541.21 pie³, esto significa una altura de cama de:

$$\text{Altura} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Area}} = \frac{541.21 \text{ pie}^3}{86.59 \text{ pie}^2}$$

$$\text{Altura} = 6.25 \text{ pies}$$

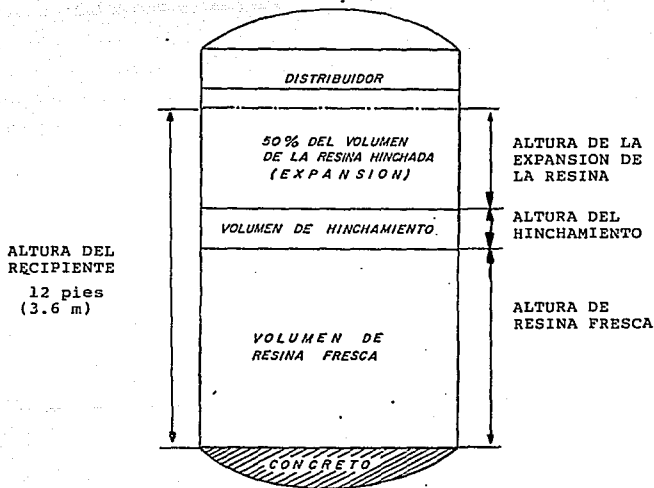
Por lo cual se tendrá una caída de presión en toda la cama igual a:

$$\Delta P \text{ Total} = 6.25 \text{ pies} \times 3 \text{ psi/pie}$$

$$\Delta P \text{ Total} = 18.75 \text{ psi}$$

Por criterio del fabricante de resina, ésta se expandirá como máximo un 50%

VOLUMEN MAXIMO DE RESINA



durante la etapa de retrolavado por lo que la nueva altura será de:

Altura = 6.25 pies x 1.50

Altura = 9.37 pies

Dicha altura es aceptable ya que el distribuidor se encuentra a 12.5 pies de altura en el interior del recipiente.

NOTA: Hasta este punto se puede considerar que la unidad ha sido diseñada.

RESUMEN DE RESULTADOS

CAPACIDAD DE LA UNIDAD:	Q = 1300 gal/min-tren	
NUMERO DE TRENES:	NT = 3 operando y uno en regeneración	
RESINA SELECCIONADA:	Amberlite IRC-84	
CAPACIDAD DE LA RESINA: (Kgr/pie ³)	Teórica	54
	Corregida	49
VOLUMEN DE AGUA A TRATAR: (Galones)	Servicio	936 000
	Enjuague	31 418
KILOGRANOS A REMOVER: (Kilogramos)	Servicio	20 526
	Enjuague	689
	Totales	21 215
VOLUMEN DE RESINA: (pie ³)	Teórico	380.12
	Corregido	418.97
	Máximo	432.97
	C/hinchamiento (25%)	541.21
CAIDA DE PRESION: (lb/pulg ²)	Total	18.75

4.6 Secuencia de Regeneración

La secuencia de regeneración está constituida por una serie convencional de etapas, cuyo orden y duración varía de acuerdo con varios factores, tales como:

- Calidad del agua a tratar
- Requerimientos del efluente
- Tipo de resina utilizada, etc.

Estas etapas generalmente son:

- 1) SERVICIO
- 2) RETROLAVADO
- 3) REGENERACION
- 4) DESPLAZAMIENTO
- 5) ENJUAGUE
- 6) VACIADO

A continuación se describen las características más importantes de las etapas típicas de regeneración. Cada etapa se ilustra en las figuras anexas, asimismo se recomienda ver el diagrama general de operación típica, adjunto.

Servicio

Etapa inicial del ciclo operacional del proceso de tratamiento de agua por intercambio iónico, en el cual el influente (agua cruda o pretratada), es pasado a través del lecho de resina catiónica para eliminar iones específicos del agua por una cantidad equivalente de iones del material de intercambio.

La etapa de servicio normalmente finaliza por alguno o varios de los criterios siguientes:

- Alta alcalinidad del efluente
- Galones totales tratados
- Alta caída de presión del flujo de agua a través del lecho de resina
- Tiempo de operación permitido
- Variaciones de pH en el efluente

De acuerdo al diagrama general de operación típica, la entrada del agua se realiza al abrir la válvula VCF-01, consiguiendo con ello que el distribuidor colocado en el interior de la unidad reparta el agua uniformemente sobre el lecho de resina, permitiendo así que el intercambio sea

más eficiente. El efluente resultante abandona la unidad al abrir la válvula VCF-02.

Retrolavado

Normalmente es la primera etapa de la secuencia de regeneración y está diseñada para un flujo en sentido contrario al de servicio, usado en volumen y velocidad suficientes.

Su finalidad es eliminar trazas de material finamente dividido que pudiera estar presente en la cama de resina, además de clasificar las partículas: las más densas se van al fondo y las menos densas a la parte superior.

Durante el retrolavado se produce la expansión del "lecho" o "cama", donde las perlas de resina se separan y ascienden hacia la parte superior del recipiente, este retrolavado debe hacerse de tal modo que toda la cama sea removida.

El agua gastada en el retrolavado es colectada por el distribuidor de agua pretratada y desalojada al drenaje. El flujo de retrolavado y el diseño interno de la

unidad, deberán evitar pérdidas potenciales de resina durante la realización de esta etapa.

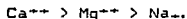
El flujo ascendente de agua cruda a través del lecho de resina, se alimenta al abrir la válvula VCF-03 y se desaloja abriendo la válvula VCF-06.

Regeneración

Cuando ha finalizado la etapa de servicio y después del retrolavado deberá regresarse a su estado original usando una solución ácida.

La introducción del regenerante químico es a co-corriente y la dosificación (libras/pie cúbico de resina), concentración, flujo y tiempo de permanencia estarán determinadas para cada aplicación.

En un sistema de intercambio de iones, siempre se tienen pequeñas fugas, éstas dependen del nivel de regeneración. Además la selectividad de los cationes para efectuar el intercambio obedece al siguiente orden:



Durante la regeneración a flujo ascendente, la parte superior del lecho se convierte completamente a la forma hidrógeno,

pero no así la parte inferior. Los cationes del influente son intercambiados por iones hidrógeno en la parte superior del lecho.

Otro problema que se puede presentar al usar regeneración convencional es la precipitación de sulfato de calcio. Cuando se regenera la "cama" con ácido sulfúrico a mayor concentración al 0.7% es posible que el calcio precipite tapando los canales de intercambio de la resina, impidiendo la eliminación de las impurezas. Si se regenera con ácido al 0.7%, no se presentarán problemas de precipitación.

La introducción del regenerante (ácido diluido) a la unidad a través del distribuidor correspondiente, se consigue al abrir la válvula VCF-05. La salida del regenerante se realiza al abrir la válvula VCF-06, permitiendo que éste sea conducido al drenaje químico.

La dilución del ácido químico concentrado se lleva a cabo en las TEE's de dilución (TEE-01 y 02). El ácido concentrado procede del tanque de día correspondiente (TH-01),

bombeado por las unidades BA-01 A ó B y pasando por la válvula VCF-16.

Desplazamiento

Con esta etapa se persigue purgar con agua pretratada las líneas que condujeron el regenerante ácido a la unidad y además desplazar el ácido presente en la misma.

Esta etapa precede generalmente a la etapa de enjuague y es por así decirlo, una extensión de la etapa de introducción del regenerante, usando en esta ocasión únicamente agua en la misma dirección que siguió la introducción del regenerante.

El desplazamiento está diseñado para dar contacto final entre la resina y el regenerante, eliminando la mayor parte éste.

El agua es alimentada a la unidad abriendo las válvulas VCF-05 y 16 y es desalojada al abrir la válvula VCF-06.

Enjuague

Esta etapa tiene como finalidad lavar la resina de las impurezas y trazas de ácido que aún permanecieran dentro de la unidad.

Este enjuague final es siempre conducido en la misma dirección que el flujo de servicio siendo, por lo tanto, prácticamente parte del ciclo de servicio excepto que el efluente es manejado como agua gastada.

El agua se introduce a través de la válvula VCF-01 y su salida es por la apertura de la válvula VCF-06.

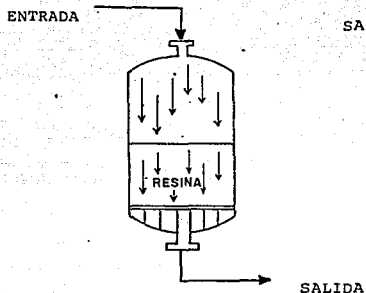
Paro

Etapa opcional, no incluida dentro de la secuencia operacional, en la cual todas las válvulas permanecen cerradas.

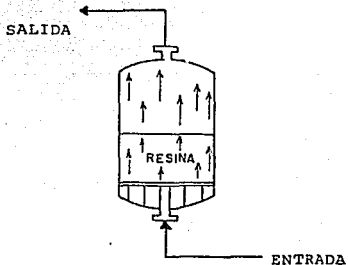
Vaciado Total

Etapa opcional, no incluida en la secuencia operacional, en la cual se abren las válvulas VCF-09 y VCF-06.

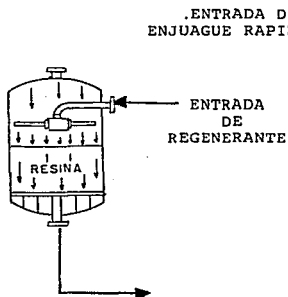
SECUENCIA DE REGENERACION



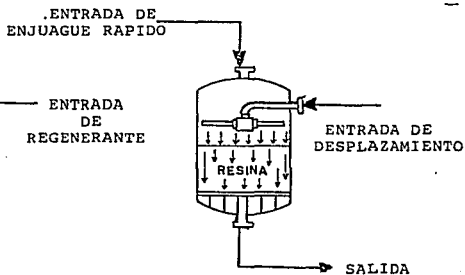
SERVICIO



RETROLAVADO

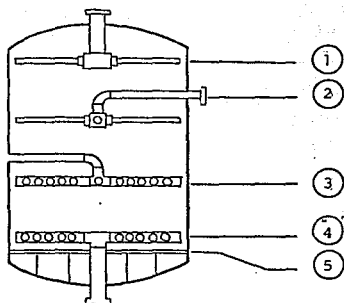


INTRODUCCION DE REGENERANTE



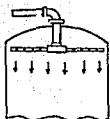
DESPLAZAMIENTO Y ENJUAGUE

DISTRIBUCION GENERAL DE INTERNOS

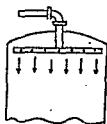


- ① DISTRIBUIDOR DE AGUA DE SERVICIO
COLECTOR DE AGUA DE RETROLAVADO
- ② DISTRIBUIDOR DE REGENERANTE
- ③ COLECTOR INTERFACIAL
(SOLO EN SISTEMAS DE LECHOS MEZCLADOS)
- ④ COLECTOR DE AGUA TRATADA
COLECTOR DE REGENERANTE
ENTRADA DE AGUA DE RETROLAVADO
- ⑤ PLATO SOPORTE (FONDO FALSO)

DISTRIBUIDOR DE AGUA CRUDA



CABEZAL

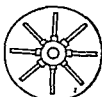


LATERAL

DISTRIBUIDOR DE REGENERANTE



CABEZAL

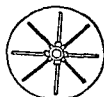


LATERAL

DISTRIBUIDOR COLECTOR



CABEZAL



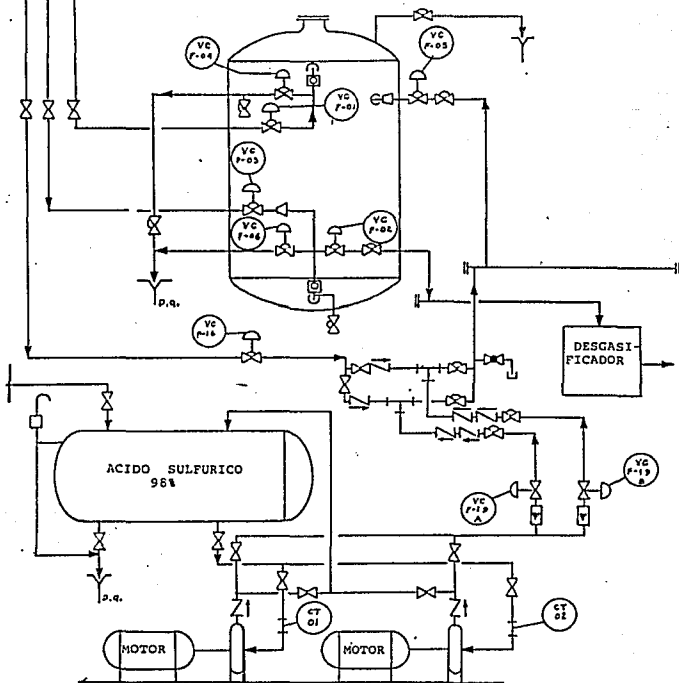
LATERAL



RETENEDOR

AGUA
PRETRATADA

DIAGRAMA GENERAL DE OPERACION TIPICA



4.7 Cálculo de las Etapas de Regeneración

SERVICIO

Con tres trenes en servicio y uno en regeneración.

$$Q = 3900 \text{ gpm.}$$

Tiempo de Operación: 12 horas.

Tiempo de Regeneración: 4 horas.

RETROLAVADO

El fabricante recomienda recomienda un flujo de 5-7 gpm/pie² (ver Tabla No. 4).

El volumen de agua para retrolavado será por lo menos igual a un volumen del tanque, es decir:

$$\text{Area} = 0.785 D^2 = 0.785 (10.5 \text{ pie})^2$$

$$\text{Area} = 86.58 \text{ pie}^2$$

Volumen parte recta:

$$\text{Area} \times \text{Altura} = 86.59 \text{ pie}^2 \times 13.5 \text{ pie}$$

$$\text{Volumen P. R.} = 1169 \text{ pie}^3$$

$$\text{Volumen tapa toriesférica: } 91.2 \text{ pie}^3$$

Volumen Tanque:

$$1169 \text{ pie}^3 + 91.2 \text{ pie}^3 = 1260 \text{ pie}^3$$

Volumen total :

$$1260 \text{ pie}^3 \times 7.48 \text{ gal/pie}^3 = 9425 \text{ gal}$$

De la recomendación del fabricante, se

eligen 7 gpm/pie²:

$$7 \text{ gpm/pie}^2 \times 86.59 \text{ pie}^2 = 606.13 \text{ gpm}$$

Si se requieren 9425 gal, estos se introducirán en un tiempo de:

$$\frac{9425 \text{ gal}}{606.13 \text{ gal/min}} = 15.55 = 16 \text{ min}$$

REGENERACION

La regeneración se efectúa con ácido sulfúrico a una concentración del 0.7%, para evitar precipitaciones de sulfato de calcio.

Nivel de regeneración: 110 % del teórico

(ver tabla 4).

Volumen de resina: 541.21 pie³,

considerando hinchamiento.

Capacidad de la resina: 49 Kgr/pie³

Kilogramos a remover = $V_{R\text{máximo}} \times \text{Capac.}$

$$= 541.21 \text{ pie}^3 \times 49 \text{ Kgr/pie}^3$$

$$= 26519.29 \text{ Kgr}$$

Kilogramos a remover por servicio:

$$26519.29 \text{ Kgr}$$

Kilogramos totales = 26 519.29 X 1.10

29 171 Kgr

Libras necesarias de ácido sulfúrico:

29 171 Kilogramos

$$\begin{array}{r} 1.02 \text{ lb CaCO}_3 \\ \hline 1 \text{ lb H}_2\text{SO}_4 \end{array} \times 7 \begin{array}{r} \text{Kgr} \\ \hline 1 \text{ lb CaCO}_3 \end{array}$$

$$= 4\ 085.6 \text{ lb H}_2\text{SO}_4$$

$$\text{Densidad H}_2\text{SO}_4 \text{ @ } 98\% = 15.02 \text{ lb H}_2\text{SO}_4$$

$$\text{Densidad H}_2\text{SO}_4 \text{ @ } 0.7\% = 0.058 \text{ lb H}_2\text{SO}_4$$

Gal

$$\begin{array}{r} 4\ 085.6 \text{ lb H}_2\text{SO}_4 \\ \hline 15.02 \text{ lb H}_2\text{SO}_4 \end{array} = 272.01 \text{ gal H}_2\text{SO}_4 \text{ } 98\%$$

Gal

$$\begin{array}{r} 4\ 085.6 \text{ lb H}_2\text{SO}_4 \\ \hline 0.05873 \text{ lb H}_2\text{SO}_4 \end{array} = 69\ 565 \text{ gal H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0.7\%$$

Gal

Agua para dilución = 69 565.8 - 272.01

$$= 69\ 293.80 \text{ Gal Agua}$$

Por recomendación del fabricante (tabla 4), se tiene un flujo de regeneración de 0.25-1.0 gpm/pie³

Tomando 1 gpm/pie³, se tiene:

$$\text{Flujo de regenerante} = \text{VR}_{\text{max}} \times 1 \text{ gpm/pie}^3$$

$$541.21 \text{ pie}^3 \times 1 \text{ gpm} \div \text{pie}^3 = 541.21 \text{ gpm}$$

Tiempo que dura la regeneración:

$$\frac{\text{Vol. H}_2\text{SO}_4 \text{ @ } 0.7\%}{\text{Flujo de regenerante}} = \frac{69 \ 565.80 \text{ gal}}{541.21 \text{ gal}} \div \text{min}$$

$$= 128.5 \text{ minutos}$$

Flujo de agua para dilución:

$$\frac{\text{Volumen de agua para dilución}}{\text{Tiempo de regeneración}} = \frac{69 \ 293.86}{128.5}$$

$$= 539.25 \text{ gpm}$$

Flujo de H₂SO₄ @ 98%:

$$\frac{272.01 \text{ gal}}{128 \text{ min}} = 2.12 \text{ gpm}$$

DESPLAZAMIENTO

El volumen necesario para desplazar y enjuagar está dado por la recomendación del fabricante (tabla 4), que es de 50 a 75 gal/pie³ de resina.

Tomando el valor mayor tenemos:

$$\begin{aligned}\text{Vol Enjuague} &= 541.21 \text{ pie}^3 \times 75 \text{ gal/pie}^3 \\ &= 40\,590.75 \text{ gal}\end{aligned}$$

Para el desplazamiento se requiere por lo menos un volumen igual al ocupado por la resina:

$$\begin{aligned}\text{VR}_{\text{máx}} &= 541.21 \text{ pie}^3 \times 7.48 \text{ gal/pie}^3 \\ &= 4\,048.25 \text{ gal}\end{aligned}$$

Que se introducirá al recipiente a razón de 1 gpm/pie³.

Flujo de agua para dilución: 659.46 gpm

Por lo que se requiere de un tiempo para desplazar de:

$$\frac{4\,048.25 \text{ gal}}{539.25 \text{ gal/min}} = 8 \text{ min}$$

ENJUAGUE

Tomando la recomendación especificada en el punto anterior se tiene que:

$$\begin{aligned}\text{Agua disponible para enjuagar y desplazar} \\ &= 40\,590.75 \text{ gal}\end{aligned}$$

Agua para enjuague:

$$= 49\,653.75 \text{ gal} - 4\,952.13 \text{ gal}$$

$$= 36\ 542.5\ \text{gal}$$

Los cuales se introducirán a razón de 1.5 gpm/pie³ de resina.

Como este volumen se introducirá por la línea de servicio, se tiene que:

$$\text{Flujo de servicio} = 1300\ \text{gpm}$$

$$\text{Tiempo de enjuague} = \frac{36\ 542.5\ \text{gal}}{1300\ \text{gal/min}}$$

$$= 28\ \text{minutos}$$

R E S U M E N

<u>ETAPA</u>	<u>FLUJO (gal/min)</u>	<u>TIEMPO (minutos)</u>
RETROLAVADO	606	16
REGENERACION	662	128
DESPLAZAMIENTO	660	8
ENJUAGUE	1300	28
		<hr/>
		180 min
		3 hr

CAPITULO V

CONCLUSIONES

El uso directo de ácido sulfúrico para el control de la alcalinidad en las torres de enfriamiento, está siendo eliminado por las normas de control de la contaminación ambiental, ya que implica el uso de cromatos para el control del crecimiento de algas. Además de que se tienen problemas serios para la dosificación del ácido a la torre de enfriamiento debido a la dificultad de controlar la adición del mismo a la torre.

Para ahorrar en el consumo de reactivos, evitar problemas de contaminación y proteger el medio ambiente se pueden considerar las siguientes recomendaciones:

- Utilizar sistemas de intercambio iónico con alta eficiencia de regeneración.
- Cuando el análisis del agua lo permita, utilizar resinas débilmente ácidas y alcalinas en combinación con resinas fuertemente ácidas y alcalinas, para una mayor utilización de los

regenerantes, ya que con el excedente del regenerante de las unidades fuertemente ácidas y/o básicas se pueden regenerar las resinas débilmente ácidas y/o básicas.

- Recuperar los excesos de regenerantes con sistemas de tanques, tuberías y válvulas que recirculen las soluciones de dichos regenerantes.
- Con un sistema balanceado químicamente se puede efectuar una neutralización de los pequeños excedentes de reactivos, utilizando una unidad neutralizadora de intercambio iónico a base de resinas.
- Se puede recuperar agua de los sistemas de desmineralización y/o suavización recirculando los enjuagues, lo cual significa un ahorro adicional.

Por otro lado, algunas ventajas que se obtienen con el sistema de tratamiento de agua de repuesto de torres de enfriamiento por medio de resinas de intercambio iónico débilmente ácidas, son las siguientes:

- Reducción de la purga en la torre de enfriamiento y por consiguiente reducción en los requerimientos de agua de repuesto a la misma.

Esto es especialmente importante donde la disponibilidad del agua es baja y/o su costo alto.

- Reducción de los depósitos incrustantes en los sistemas de enfriamiento por la mayor formación de carbonato de calcio y por el consiguiente alargamiento de la vida útil de los equipos y reducción de paros por mantenimiento a los mismos.
- Eliminación de la necesidad de dosificar ácido sulfúrico directamente a la torre de enfriamiento y además eliminar los problemas que se presentan al tener un exceso o un faltante de ácido a la misma.
- Reducción de la formación y subsecuente disposición del sulfato de calcio, los cuales van asociados directamente con el ácido sulfúrico.

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

Todos los métodos de suavización por intercambio iónico, generalmente utilizan resinas tipo fuerte, consecuentemente un exceso importante de regenerante es usado desde este punto de vista. Las resinas débiles como la carboxilica se hacen atractivas puesto que se regeneran con sólo 100-120% de la cantidad teórica de ácido para regeneración, además se evita el problema de la descarga, ya que ésta requiere poca neutralización.

Lo anterior juega un papel muy importante en el momento de seleccionar un sistema de intercambio.

CAPITULO VI

TABLAS Y GRAFICAS

T A B L A 1-A

QUIMICOS USADOS EN TRATAMIENTO DE AGUA, SU PESO ATOMICO, PESO EQUIVALENTE Y FACTORES DE CONVERSION A CaCO₃ <12,13>

A	B	C	D	E	F
Aluminum	Al	27.0	9.0	3.56	0.18
Aluminum Bicarbonate	Al(HCO ₃) ₃	131.9	44.4	1.13	0.49
Aluminum Chloride	AlCl ₃ · 6H ₂ O	241.	80.5	0.62	1.61
Aluminum Hydroxide	Al(OH) ₃	78.0	26.0	1.92	0.52
Aluminum Sulfate	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O	666.4	131.1	0.45	2.22
Aluminum Sulfate	Al ₂ (SO ₄) ₃ (anhydrous)	342.1	57.0	0.88	1.14
Alumina	Al ₂ O ₃	101.9	17.0	2.84	0.34
Sodium Aluminate	NaAlO ₂	153.9	27.8	1.80	0.55
Alum Ammonium	Al ₂ (SO ₄) ₃ · (NH ₄) ₂ SO ₄ · 24H ₂ O	906.6	151.1	0.33	3.02
Alum Potassium	Al ₂ (SO ₄) ₃ · K ₂ SO ₄ · 24H ₂ O	948.8	156.1	0.32	3.12
Ammonia	NH ₃	17.0	17.0	1.00	1.00
Ammonium (Ion)	NH ₄ ⁺	18.0	18.0	2.78	0.86
Ammonium Chloride	NH ₄ Cl	53.5	53.5	0.93	1.07
Ammonium Hydroxide	NH ₄ OH	35.1	35.1	1.62	1.70
Ammonium Sulfate	(NH ₄) ₂ SO ₄	132.	65.1	0.76	1.32
Barium	Ba	137.4	68.7	0.73	1.37
Barium Carbonate	BaCO ₃	197.4	98.7	0.58	1.97
Barium Chloride	BaCl ₂ · 2H ₂ O	244.3	122.2	0.41	2.44
Barium Hydroxide	Ba(OH) ₂	171.	85.7	0.49	1.71
Barium Nitrate	Ba(NO ₃) ₂	261.3	130.6	0.38	2.60
Barium Oxide	BaO	153.	76.7	0.65	1.53
Barium Sulfate	BaSO ₄	233.4	116.7	0.43	2.33
Calcium	Ca	40.1	20.0	2.50	0.40
Calcium Bicarbonate	Ca(HCO ₃) ₂	162.1	81.1	1.62	1.62
Calcium Carbonate	CaCO ₃	100.08	50.1	1.00	1.00
Calcium Chloride	CaCl ₂	111.9	55.9	0.61	1.11
Calcium Hydroxide	Ca(OH) ₂	74.1	37.1	1.35	0.74
Calcium Hypochlorite	Ca(OCl) ₂	143.1	71.5	0.70	1.43
Calcium Nitrate	Ca(NO ₃) ₂	164.1	82.1	0.51	1.64
Calcium Oxide	CaO	56.1	28.0	1.79	0.56
Calcium Phosphate	Ca ₃ (PO ₄) ₂	310.3	51.7	0.97	1.63
Calcium Sulfate	CaSO ₄ (anhydrous)	136.1	68.1	0.74	1.36
Calcium Sulfate	CaSO ₄ · 2H ₂ O (gypsum)	172.2	86.1	0.58	1.72
Carbon	C	12.0	3.00	16.67	0.06
Chlorine (Ion)	Cl ⁻	35.5	35.5	0.61	1.71
Copper (Cupric)	Cu ²⁺	63.6	31.8	1.57	0.64
Copper Sulfate	CuSO ₄	160.	50.0	0.62	1.60
Copper Sulfate (Cupric)	CuSO ₄ · 5H ₂ O	250.	78.0	0.40	2.50
Iron (Ferric)	Fe ³⁺	55.8	27.9	1.79	0.56
Iron (Ferrous)	Fe ²⁺	55.8	18.6	2.69	0.37
Ferrous Carbonate	FeCO ₃	116.	58.0	0.66	1.16
Ferrous Hydroxide	Fe(OH) ₂	89.9	44.9	1.11	0.90
Ferrous Oxide	FeO	71.8	35.9	1.39	0.72
Ferrous Sulfate	FeSO ₄ (anhydrous)	151.9	76.0	0.66	1.52
Ferrous Sulfate	FeSO ₄ · 7H ₂ O	278.0	139.0	0.36	2.78
Ferrous Sulfate	FeSO ₄ (anhydrous)	151.9	151.9	oxidation	
Ferric Chloride	FeCl ₃	162.	54.1	0.93	1.62
Ferric Chloride	FeCl ₃ · 6H ₂ O	270.	90.1	0.56	1.80
Ferric Hydroxide	Fe(OH) ₃	107.	35.6	1.41	0.71
Ferric Oxide	Fe ₂ O ₃	160.	53.6	0.88	0.53
Ferric Sulfate (Ferrisul)	Fe ₂ (SO ₄) ₃	399.9	66.7	0.75	1.33
Ferrous or Ferric	Fe or Fe	55.8	55.8	oxidation	
Fluorine	F	19.0	4.75	2.63	0.38
Hydrogen (Ion)	H ⁺	1.01	1.01	50.0	0.02
Iodine	I	127.	127.	0.40	2.54
Lead	Pb	207.	104.	0.48	2.08
Magnesium	Mg	24.3	12.2	4.00	0.24
Magnesium Bicarbonate	Mg(HCO ₃) ₂	146.3	73.2	0.68	1.46
Magnesium Carbonate	MgCO ₃	84.3	42.2	1.19	0.84
Magnesium Chloride	MgCl ₂	95.2	47.6	0.68	0.95
Magnesium Hydroxide	Mg(OH) ₂	58.3	29.2	1.71	0.58
Magnesium Nitrate	Mg(NO ₃) ₂	148.3	70.2	2.48	0.40
Magnesium Oxide	MgO	40.3	20.2	1.68	1.48
Magnesium Phosphate	Mg ₃ (PO ₄) ₂	262.9	43.8	1.14	0.88
Magnesium Sulfate	MgSO ₄	120.4	60.2	1.20	1.20
Manganese (Manganous)	Mn ²⁺	54.9	27.4	1.82	0.55
Manganese (Manganic)	Mn ³⁺	54.9	18.3	2.73	0.37
Manganese Chloride	MnCl ₂	125.8	62.9	0.80	1.26
Manganese Dioxide	MnO ₂	86.9	43.4	0.63	0.43
Manganese Hydroxide	Mn(OH) ₂	88.0	44.4	1.13	0.89
Manganic Oxide	Mn ₂ O ₃	158.	26.3	1.90	0.53
Manganous Oxide	MnO	70.9	35.5	1.41	0.71

A: SUSTANCIA

B: FORMULA

C: PESO ATOMICO O MOLECULAR

D: PESO EQUIVALENTE

E: FACTOR DE CONVERSION

SUSTANCIA A CaCO₃ EQUIV.

F: FACTOR DE CONVERSION

CaCO₃ EQUIV. A SUSTANCIA

T A B L A 1-B

QUIMICOS USADOS EN TRATAMIENTO DE AGUA, SU PESO ATOMICO,
PESO EQUIVALENTE Y FACTORES DE CONVERSION A CaCO₃ <12,13>

A	B	C	D	E	F
Nitrogen (Valence 3)	N ⁺⁺⁺	14.0	4.67	1.57	0.09
Nitrogen (Valence 5)	N ⁺⁺⁺	14.0	4.67	1.57	0.09
Oxygen	O	16.0	8.00	6.25	0.16
Phosphorus (Valence 3)	P ⁺⁺⁺	31.0	10.3	4.85	0.21
Phosphorus (Valence 5)	P ⁺⁺⁺	31.0	10.3	4.85	0.21
Potassium	K	39.1	12.7	1.28	0.78
Potassium Carbonate	K ₂ CO ₃	138	69.1	0.72	1.38
Potassium Chloride	KCl	74.5	74.5	0.67	1.49
Potassium Hydroxide	KOH	56.1	56.1	0.89	1.12
Silver Chloride	AgCl	143.3	143.3	0.35	2.87
Silver Nitrate	AgNO ₃	169.9	169.9	0.29	3.40
Silica	SiO ₂	60.1	30.0	0.63	0.60
Silicon	Si	28.1	7.03	7.11	0.14
Sodium	Na	23.0	23.0	2.18	0.46
Sodium Bicarbonate	NaHCO ₃	84.0	84.0	0.60	1.68
Sodium Bisulfite	NaHSO ₃	120.			
Sodium Bisulfate	NaHSO ₄	106.	53.0	0.94	1.06
Sodium Carbonate	Na ₂ CO ₃	286.	143.	0.35	2.86
Sodium Chloride	NaCl	58.5	58.5	0.85	1.17
Sodium Hypochlorite	NaClO	74.5	37.3	0.67	1.49
Sodium Hydroxide	NaOH	40.0	40.0	0.80	0.80
Sodium Nitrate	NaNO ₃	85.0	85.0	0.59	1.70
Sodium Nitrite	NaNO ₂	69.0	34.5	0.73	1.38
Sodium Oxide	Na ₂ O	62.0	31.0	0.61	0.62
Trisodium Phosphate	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O (18.7% P ₂ O ₅)	380.2	126.7	0.40	2.53
Trisodium Phos. (anhydrous)	Na ₃ PO ₄ (18.7% P ₂ O ₅)	164.0	54.7	0.91	1.69
Di-sodium Phosphate	Na ₂ HPO ₄ · 2H ₂ O (18.8% P ₂ O ₅)	354.2	118.1	0.62	2.39
Di-sodium Phos. (anhydrous)	Na ₂ HPO ₄ (50% P ₂ O ₅)	142.0	47.3	1.05	0.95
Mono-sodium Phosphate	NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O (15.4% P ₂ O ₅)	138.1	46.0	0.82	0.92
Mono-sod. Phos. (anhydrous)	NaH ₂ PO ₄ (59.1% P ₂ O ₅)	120.0	40.0	1.25	0.80
Meta-Phosphate (Magan)	NaPO ₃ (69.1% P ₂ O ₅)	102.0	34.0	1.47	0.68
Sodium Sulfate	Na ₂ SO ₄	142.1	71.0	0.70	1.22
Sodium Sulfate (ANH)	Na ₂ SO ₄	322.1	161.1	0.31	3.22
Sodium Thiosulfate	Na ₂ S ₂ O ₃	158.1	158.1	0.63	1.59
Sodium Tetrathionate	Na ₂ S ₄ O ₆	270.2	135.1	0.37	2.71
Sodium Sulfite	Na ₂ SO ₃	126.1	63.0	0.79	1.26
Sulfur (Valence 2)	S ⁺⁺	32.1	16.0	3.11	0.32
Sulfur (Valence 4)	S ⁺⁺	32.1	8.02	6.25	0.16
Sulfur (Valence 6)	S ⁺⁺	32.1	5.34	9.36	0.11
Sulfur Dioxide	SO ₂	64.1	32.0		
Tin	Sn	119.			
Water	H ₂ O	18.0	9.00	3.56	0.18
Zinc	Zn	65.4	32.7	1.53	0.65

RADICALES ACIDOS

Bicarbonate	HCO ₃	61.0	61.0	0.82	1.22
Carbonate	CO ₃	60.0	30.0	0.83	.80
Carbon Dioxide	CO ₂	44.0	44.0	1.14	.88
Chloride	Cl	35.5	35.5	1.41	.71
Iodide	I	126.9	126.9	0.39	2.54
Nitrate	NO ₃	62.0	62.0	0.81	1.24
Nitrite	NO ₂	46.0	46.0	0.94	0.84
Hydrate	OH	95.0	31.7	1.58	0.63
Phosphate	PO ₄	142.0	23.7	2.11	0.37
Phosphorous Oxide	P ₂ O ₅	32.1	16.0	1.63	0.32
Sulfide	S	96.1	48.0	1.04	0.96
Sulfite	SO ₃	80.1	40.0	1.25	0.80
Sulfur Trioxide	SO ₃				

ACIDOS

Hydrogen	H	1.0	1.0	50.00	0.02
Acetic Acid	CH ₃ CO ₂ H	60.1	0.83	1.20	0.82
Carbonic Acid	H ₂ CO ₃	62.0	31.0	1.61	0.62
Hydrochloric Acid	HCl	36.5	36.5	1.37	0.73
Nitric Acid	HNO ₃	63.0	63.0	0.79	1.26
Phosphoric Acid	H ₃ PO ₄	98.0	32.7	1.53	0.63
Sulfurous Acid	H ₂ SO ₃	82.1	41.1	1.22	0.82
Sulfuric Acid	H ₂ SO ₄	98.1	49.0	1.02	0.98
Hydrogen Sulfide	H ₂ S	34.1	17.05	2.93	0.34
Manganous Acid	H ₂ MnO ₃	104.9	52.5	0.95	1.05

A, B, C, D, E, E, F : VER TABLA 1-A

T A B L A 2

% DE HINCHAMIENTO EN BASE A LA ALCALINIDAD
DEL AGUA <12,13>

CATIONES ASOCIADOS CON LA ALCALINIDAD

% SODIO	% CALCIO Y MAGNESIO	% HINCHAMIENTO
100	0	20
75	25	18
50	50	15
25	75	12
0	100	10

T A B L A 3

% DE HINCHAMIENTO DE LA RESINA AMBERLITE IRC-84 COMO
UNA FUNCION DEL GRADO DE CONVERSION COMPLETA A PARTIR
DE LA FORMA HIDROGENO <12,13>

% CONVERSION	SODIO	CALCIO Y MAGNESIO
0	0	0
50	30	9
100	65	15

T A B L A 4

CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS
POR EL FABRICANTE DE LA
RESINA IRC-84 <12, 13>

pH Limitation	5 to 14
Maximum Temperature	250°F (120°C)
Minimum Bed Depth	24 inches (0.61 m)
Backwash Flow Rate	5 to 7 gpm/ft ² (12.3 to 17.2 m/hr) @ 70°F (21°C) (sodium form)
Regenerant Concentration	1 to 4% hydrochloric acid 0.7% sulfuric acid
Regenerant Flow Rate	0.25 to 1.0 gpm/ft ² (2.0 to 8.0 l/hr/l)
Regenerant Level	110% of operating
Rinse Flow Rate	0.25 to 1.0 gpm/ft ² (2.0 to 8.0 l/hr/l) Initially to displace regenerant, then 1.5 gpm/ft ² (12.0 l/hr/l)
Rinse Water Requirements	Approximately 50 to 75 gal/ft ² (6.7 to 10.0 l/l)
Service Flow Rate	1 to 5 gpm/ft ² (8.0 to 40.1 l/hr/l)
Exchange Capacity	See Text

T A B L A 5

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS
DE LA RESINA AMBERLITE IRC-84 <12,13>

Ionic Form (as supplied)	Hydrogen
Shape	Spherical Particles
Moisture	43%*
Density	46 to 47 lbs/ft ³ (736 to 752 g/l)
Shipping Weight	47 lbs/ft ³ (752 g/l)
Effective Size	0.42*
Screen Grading (Wet)	12 to 50 mesh (U.S. Standard Screens)
Uniformity Coefficient	1.25 maximum
Fines Content	3% maximum through 50 mesh U.S. Standard Screens
Swelling	65% from the hydrogen to sodium form* 15% from the hydrogen to calcium form* (complete conversion)
Total Exchange Capacity	
a. Volumetric	4.0 meq/ml minimum 87 kg/ft ³ at CaCO ₃
b. Weight	10.0 meq/g of dry resin minimum
Temperature Limitations	250°F (120°C maximum)

*approximate

T A B L A 6

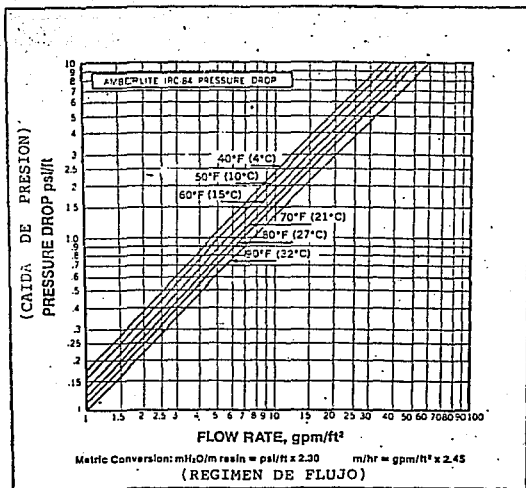
EQUIVALENCIA DE UNIDADES^{<12,13>}

DE	MULTIPLICADO POR	RESULTADO.
Pie ³ / SEG.	448.8312	GAL/min
M ³ / HR.	4.4033	GAL/MIN.
LITRO/SEG	15.8521	GAL/MIN.
MILLONES DE GAL/DIA	694.4444	GAL/MIN.
lbs	7	KILOGRANOS
GRS	0.01543	KILOGRANOS
KILOGRAMOS	15.43	KILOGRANOS
KILOGRANOS	0.143	lbs.
KILOGRANOS	65	lbs.
KILOGRANOS -	0.065	lbs.

p.p.m. SO ₄ ²⁻	1.04	ppm. como CaCO ₃
p.p.m. Cl ⁻	1.41	ppm como CaCO ₃
ppm. CO ₂	1.14	ppm. como CaCO ₃
ppm. SiO ₂	0.83	ppm. como CaCO ₃
ppm. NO ₃ ⁻	0.82	ppm como CaCO ₃
ppm. HCO ₃ ⁻	0.82	ppm como CaCO ₃
ppm. Ca ⁺⁺	2.50	ppm como CaCO ₃
ppm Mg ⁺⁺	4.10	ppm como CaCO ₃
ppm Na ⁺	2.18	ppm como CaCO ₃

GRAFICA 1

CAIDA DE PRESION EN LA RESINA
 AMBERLITE IRC-84 <12,13>



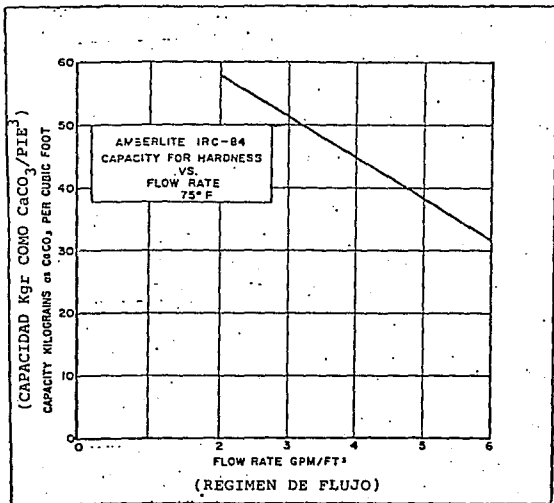
G R A F I C A 2

CAPACIDAD PARA ELIMINAR DUREZA

VS

REGIMEN DE FLUJO <12,13>

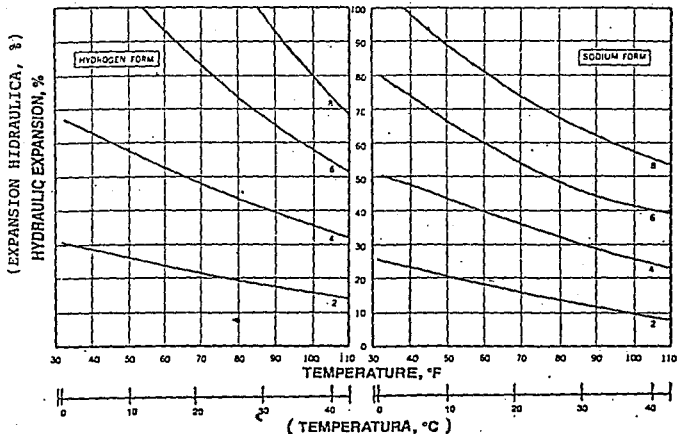
(23.8 °C)



GRAFICA 3

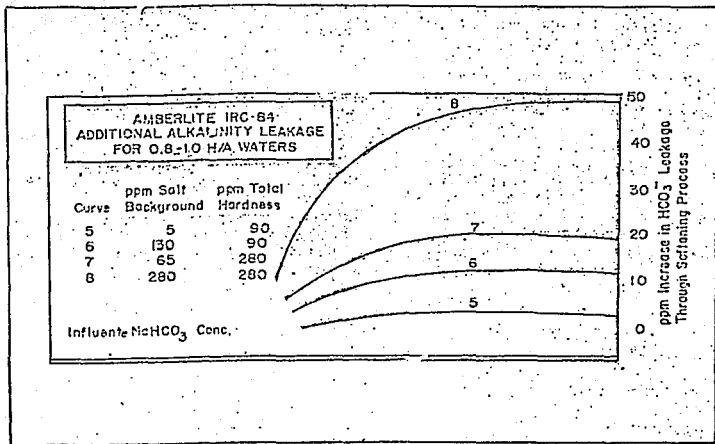
EXPANSION HIDRAULICA DE
RESINA AMBERLITE IRC-84 <12,13>

(EXPANSION HIDRAULICA PARAMETRO: REGIMEN DE FLUJO)
HYDRAULIC EXPANSION DATA PARAMETER: FLOW RATE, gpm/ft²



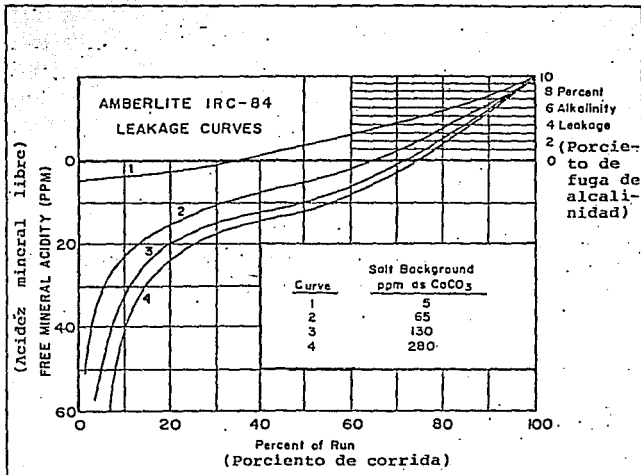
G R A F I C A 4

FUGA ADICIONAL DE ALCALINIDAD PARA
 AGUAS CON RELACION D/A 0.8 - 1.0
 AL UTILIZAR LA RESINA AMBERLITE
 IRC-84 <12,13>



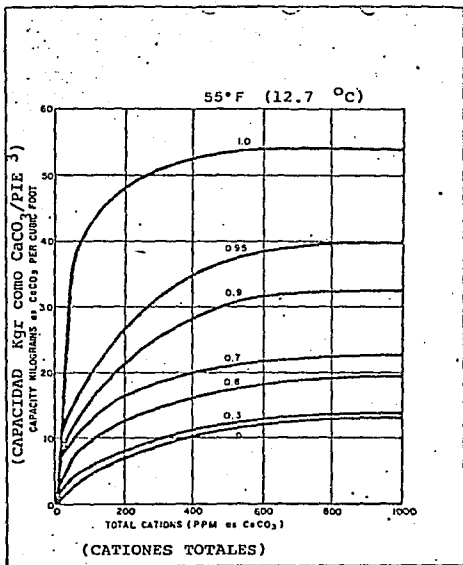
GRAFICA 5

CURVAS DE FUGA DE ALCALINIDAD PARA
LA RESINA AMBERLITE IRC-84 <12,13>



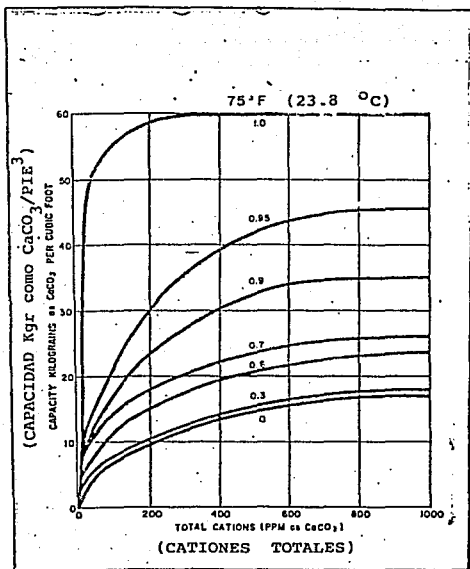
G R A F I C A 6

CAPACIDAD DE LA RESINA
AMBERLITE IRC-84 A 12.7 °C <12,13>



GRAFICA 6-A

CAPACIDAD DE LA RESINA
AMBERLITE IRC-84 A 23.8 °C <12,13>



CAPITULO VII

GLOSARIO Y BIBLIOGRAFIA

7.1 GLOSARIO <17>

ACIDEZ	Una expresión de la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución
ACIDEZ MINERAL LIBRE	Acidez debida a la fuga de cloruros y sulfatos contenidos en la acidez mineral total.
AGOTAMIENTO	Estado en el cual la resina ya no es capaz de efectuar intercambio iónico.
ALCALINIDAD	Una expresión de la concentración de los aniones totales alcalinos o grupos hidroxilo presentes en una solución; también representa en un análisis de agua, los bicarbonatos y ocasionalmente los boratos, los silicatos y los fosfatos.
ALCALINIDAD DE BICARBONATOS	Es la presencia en una solución de iones OH^- resultantes de la hidrólisis de carbonatos o bicarbonatos. Cuando estas sales reaccionan con agua, se produce una

- base fuerte y un ácido débil y el agua se torna alcalina.
- ATRICCION** El rozamiento de una partícula contra otra en un lecho de resina, que da por resultado la fractura de las perlas de resina.
- CAIDA DE PRESION** Reducción de la presión del fluido, ocasionada en este caso por el paso del agua a través de una cama de resina. Es una medida de la resistencia que el lecho de resina ofrece al flujo.
- CAMA O LECHO** La altura que alcanza la resina en una columna, después de que ésta fué adecuadamente acondicionada para una operación eficiente.
- CANALIZACION** Hendiduras que se forman a través del lecho de resina, debido a procedimientos incorrectos de operación, como altos flujos, insuficiente distribución o recolección de flujos, etc.
- CAPACIDAD** La habilidad de reacción que poseen los materiales de intercambio iónico. Esta capacidad se expresa como kilogranos por pie cúbico (kgr/pie^3), donde el numerador representa el peso de los iones removidos

	del agua y el denominador el volumen utilizado de resina.
CARBOXILICO	Término que describe un grupo ácido específico (COOH ⁻).
CATION	Ión cargado positivamente.
CICLO	Secuencia completa de una operación de suavización de agua por intercambio iónico. Por ejemplo, un ciclo completo incluye servicio, regeneración, retrolavado y enjuague.
CICLO	En operación, la eliminación de cationes
HIDROGENO	del agua influente es acompañada por el intercambio con una cantidad equivalente de iones hidrógeno provenientes del material de intercambio.
CICLO	La operación de un intercambio catiónico
SODIO	donde la eliminación de cationes específicos del agua influente es acompañada por el intercambio con una cantidad equivalente de iones sodio provenientes del material de intercambio.
CLASIFICACION	Reacomodo de las partículas en una unidad
HIDRAULICA	de intercambio iónico. A medida que el agua fluye en retrolavado a través del lecho, las partículas más grandes se

sedimentan y las más pequeñas emergen a la superficie.

- COLADERA PARA RESINA** Coladera utilizada para prevenir la fuga total de la resina del interior del recipiente cuando en el distribuidor de salida exista alguna falla.
- CONDUCTIVIDAD** Medida de la resistencia eléctrica específica de una solución.
Propiedad medible de una solución, de la que nos valemos para conocer la concentración de iones en una solución.
- DEIONIZACION** Implica la eliminación de todos los constituyentes eléctricamente cargados (iones) de sales ionizables, (tanto orgánicas como inorgánicas) de una solución.
- DENSIDAD** La masa de un volumen dado de resina.
- DESGASIFICADOR (VACIO)** Equipo de proceso usado en suavización para reducir o eliminar el bióxido de carbono libre y el aire contenido en el agua, haciendo pasar el agua a través de un recipiente empacado que opera a vacío.
- DESGASIFICADOR (TIRO FORZADO)** Equipo de proceso usado en suavización para reducir o eliminar del agua el bióxido de carbono libre, poniéndolo en

- contacto con aire.
- DISOCIACION** Ionización o separación de un compuesto en sus iones.
- DISTRIBUIDOR (DE ENTRADA)** Un sistema mecánico localizado en la parte superior del recipiente a través del cual el agua es introducida al recipiente para ser tratada. Cuando este distribuidor está colocado en la parte superior, puede actuar como colector para el agua de retrolavado que se descarga al drenaje.
- DISTRIBUIDOR (DE SALIDA)** Un sistema mecánico localizado en la parte inferior del recipiente a través del cual el agua ya suavizada es colectada y extraída de la unidad. Cuando este distribuidor se coloca en la parte inferior puede ser útil para introducir el agua de retrolavado de la resina.
- DISTRIBUIDOR (REGENERANTE)** Sistema mecánico a través del cual se introduce la solución regenerante.
- DUREZA** Presencia de las sales de calcio y magnesio, principales causantes de incrustaciones en calderas y otros medios de calentamiento y/o enfriamiento.

EFICIENCIA	El rendimiento operacional de un intercambiador de iones. Se expresa como la cantidad de regenerante requerido para efectuar la eliminación de un determinado componente en solución (Kg sal removida/ Kg ácido).
EFLUENTE	Producto líquido o gaseoso descargado o saliendo de un proceso. En este caso particular, agua suavizada que sale de un sistema de intercambio iónico.
ELECTROLITO	Compuesto químico que se disocia o se ioniza en agua, para producir una solución que conduce la corriente eléctrica.
ELUCION	El desplazamiento de iones que previamente reaccionaron con la resina, utilizando una solución con mayor potencial químico, cuyos iones son intercambiados por los que se encuentran en la resina.
ENJUAGUE	Parte de la secuencia de regeneración de un intercambiador, que consiste en pasar agua a través de la cama de resina con el objeto de eliminar la solución

	regenerante residual.
ENLACE	El tipo de enlace de un monómero o grupo
CRUZADO	de monómeros, para formar una matriz de resina tridimensional.
ENSUCIAMIENTO DE RESINA	Impurezas que se acumulan en los sitios de intercambio y disminuyen la capacidad de la resina. Este fenómeno implica que disminuya la calidad del efluente, dando como resultado fuga de ácidos orgánicos y fuga de sólidos disueltos, que se detecta por una alta conductividad y bajos valores de pH. Para corregir lo anterior, se hace necesario emplear mayor volumen de agua para enjuague y por lo tanto un mayor tiempo en la fase de regeneración. El ensuciamiento de la resina intercambiadora de iones puede deberse a impurezas del regenerante, bacterias en el agua por tratar, etc.
ESPACIO LIBRE	Zona libre o vacía por encima del lecho de resina para permitir su expansión en la fase de retrolavado.
ESTABILIDAD QUIMICA	Resistencia a la degeneración química que la resina debe poseer para resistir contactos con sustancias que la atacan.

EXPANSION DEL LECHO	Efecto hidráulico producido durante el retrolavado, en el cual las perlas de resina se separan y ascienden a la parte superior de la columna. Esta expansión se controla regulando el flujo de retrolavado.
SECUENCIA DE REGENERACION	Una secuencia de regeneración consiste cuando menos de cuatro etapas: separación de la resina (retrolavado) para limpiar la cama, para limpiar la cama, introducción del regenerante, enjuague lento o desplazamiento del regenerante y enjuague rápido para remover todas las trazas de regenerante de la cama de resina.
FINOS	Partículas extremadamente pequeñas de resina, resultado de la atricción.
FUGA	Fenómeno mediante el cual algunos de los iones indeseables del influente no son eliminados y aparecen en el efluente.
GRANO	Unidad de peso: 0.0648 gramos.
GRANOS POR GALON	Expresión de la concentración de material en solución, generalmente expresada como carbonato de calcio (CaCO_3). Un grano

por galón (CaCO_3) es equivalente a 17.1 ppm (parte por millón).

HINCHAMIENTO

La expansión de las perlas de resina, que ocurre cuando los grupos reactivos de la resina son convertidos de una forma iónica a otra. Existen resinas que presentan hinchamiento reversible e irreversible.

INFLUENTE

Un material líquido o gaseoso que se introduce a un proceso. En este caso particular de suavización de agua se refiere al agua introducida para ser suavizada dentro de un sistema de intercambio iónico.

INTERCAMBIADOR

Recipiente cerrado conteniendo material de intercambio iónico, a través del cual el agua es pasada para ser suavizada dentro de un sistema de intercambio iónico.

**INTERCAMBIO
CATIONICO**

Es el desplazamiento de una partícula cargada positivamente, por otra de mayor potencial químico, en una resina catiónica.

**NIVEL DE
REGENERACION**

El peso de regenerante usado por volumen de material de intercambio iónico

	(resina), normalmente expresado como libras de regenerante por pie cúbico de material de intercambio.
OPERACION COLUMNAR	Forma convencional de utilizar las resinas de intercambio iónico a través de la cual se hace pasar agua cruda a tratar, ya sea en flujo ascendente o descendente.
pH	Una expresión de la acidez de una solución. Y es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno.
PROFUNDIDAD DEL LECHO	La altura que alcanza la resina en una columna después que ésta fué adecuadamente acondicionada para una operación eficiente.
PUNTO DE AGOTAMIENTO	El momento en que aparecen en el efluente iones indeseables que no fueron eliminados por la resina, similares a los que se introducen con el agua cruda influente. Esto es una indicación de que la regeneración es necesaria.
REGENERACION	Restauración de la actividad de un intercambiador de iones, mediante el reemplazo de iones atrapados de la solución tratada, por iones presentes

antes del tratamiento.

REGENERANTE	Solución usada para restaurar la actividad de un intercambiador de iones. Las soluciones ácidas son usadas para restaurar un intercambiador catiónico a su forma hidrógeno, las salmueras pueden ser usadas para convertir intercambiadores catiónicos a la forma sodio.
REGIMEN DE FLUJO	Volumen de solución pasado a través de cierta cantidad de resina en un tiempo dado. Normalmente se expresa como galones de solución por minuto por pie cúbico de resina.
RETROLAVADO	Flujo ascendente de agua a través del lecho de resina para lavar y reclasificar la resina después de la corrida de servicio.
SERVICIO	Aquella parte del ciclo operacional de un proceso de suavización por intercambio iónico, en el cual el influente es pasado a través de un lecho de material de intercambio iónico, para eliminar iones específicos del material de intercambio.

7.2 BIBLIOGRAFIA

- 1.- Gómez Zúñiga Fco., "Curso de Tratamiento de Aguas de la Refinería Miguel Hidalgo", I.M.P., 1983.
- 2.- Powell S. T., "Acondicionamiento de Agua para la Industria", Edit. LIMUSA, Mex. 1979.
- 3.- Mc. Coy James W., "The Chemical Treatment of Cooling Water". Chemical Publishing Co., New York, 1974.
- 4.- Mc. Coy James W., "The Chemical Treatment of Boiler Water", Chemical Publishing Co., New York, 1981.
- 5.- American Petroleum Institute, "Manual on Disposal of Refinery Waste, Volume on Liquid Wastes", Washington D. C., 1969.
- 6.- Gómez Gómez E., "Operación y Mantenimiento de Calderas y Recipientes a Presión", Centro de Educación Continua, U.N.A.M., Mex.

- 7.- "Standard Methods Sampling Particulate Ion-Exchange Materials", A.N.S.I./A.S.T.M. D-26877-77.
- 8.- "Standard Test Methods of Physical and Chemical Properties of Particulate Ion-Exchange Resins", A.S.T.M. D-218777.
- 9.- "Standard Test Methods for Operating Performance on Particulate Cation-Exchange Materials", A.S.T.M. D-1782-72.
- 10.- Ion Exchange Equipment, "Performance Test Codes", The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1973.
- 11.- Applebaum S. B., "Desmineralization by Ion Exchange", Academic Press, N. Y. and London, 1968.
- 12.- Rohm and Haas Company, "Amberlite Ion Exchange Technology", Bulletin, Philadelphia, Pa., 1978.
- 13.- Rohm and Haas Company, "Amberlite Ion Exchange Resins Laboratory Guide", Philadelphia, Pa., 1977.

- 14.- Weis R., Stierwalt L., "Design and Operation of Cooling Tower Sidestream Treatment System", 41st Annual Meeting International Water Conference, Pittsburg, Pennsylvania, 1980.
- 15.- Curso "Operación y Mantenimiento de Servicios Auxiliares", Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, A. C. (IMIQU), Mex., 1978.
- 16.- Aguilar Martinez Joaquín E.; TESIS "Sistemas de Filtración para Plantas de Tratamiento de Agua Potable"; Fac. de Química, UNAM; México D.F.
- 17.- Curso "Tecnología del Intercambio Iónico en Tratamiento de Agua"; Educación Continua y Cursos Especiales, Facultad de Química, Coordinación de Extensión Académica, UNAM; México D.F. 1980.