

CC

TA462

U5

v. 3



1020082527

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN

SISTEMA DE NUEVO LEÓN

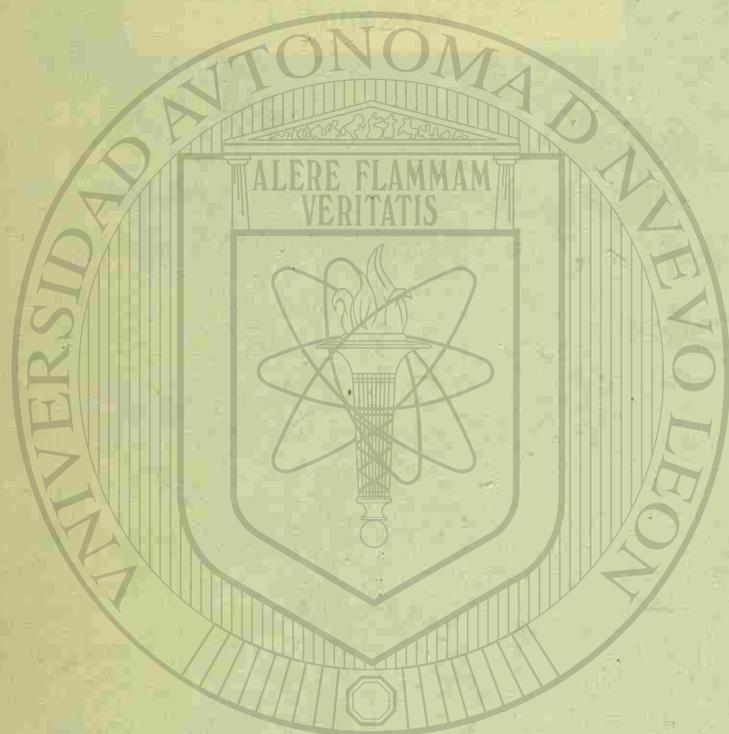
DE BIBLIOTECAS





UNIVERSIDAD DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESCUELA DE GRADUADOS • INGENIERIA EN SALUD PUBLICA

VOLUMEN III



UANI

**CORROSION
e INCRUSTACION
en TUBERIAS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEON

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS XXXV ANIVERSARIO

ABRIL DE 1967

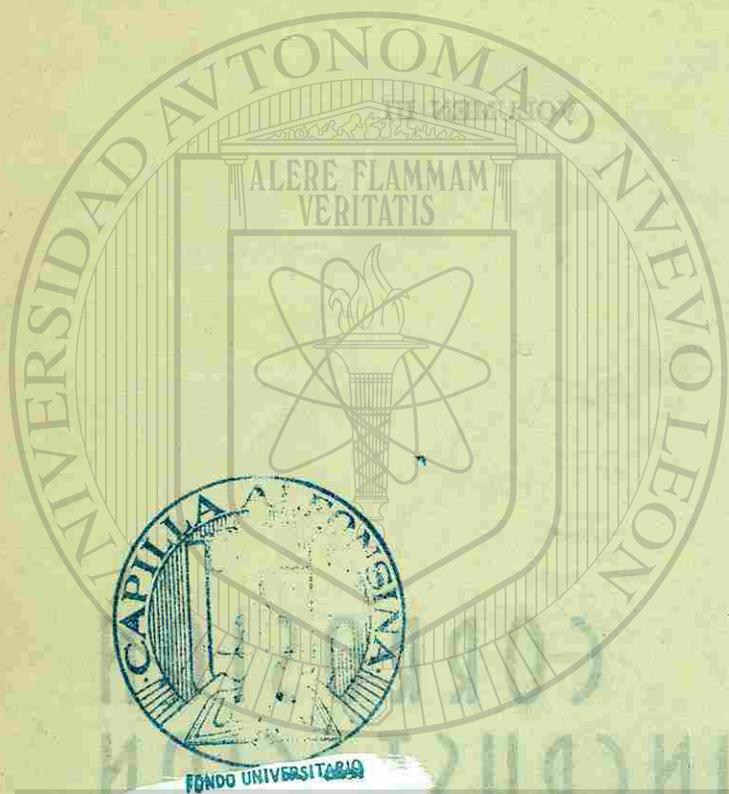
MONTERREY, MEXICO

TA 462

U5

Y.3

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESCUELA DE GRADUADOS - INGENIERIA EN SALUD PUBLICA



FONDO UNIVERSITARIO

130977

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

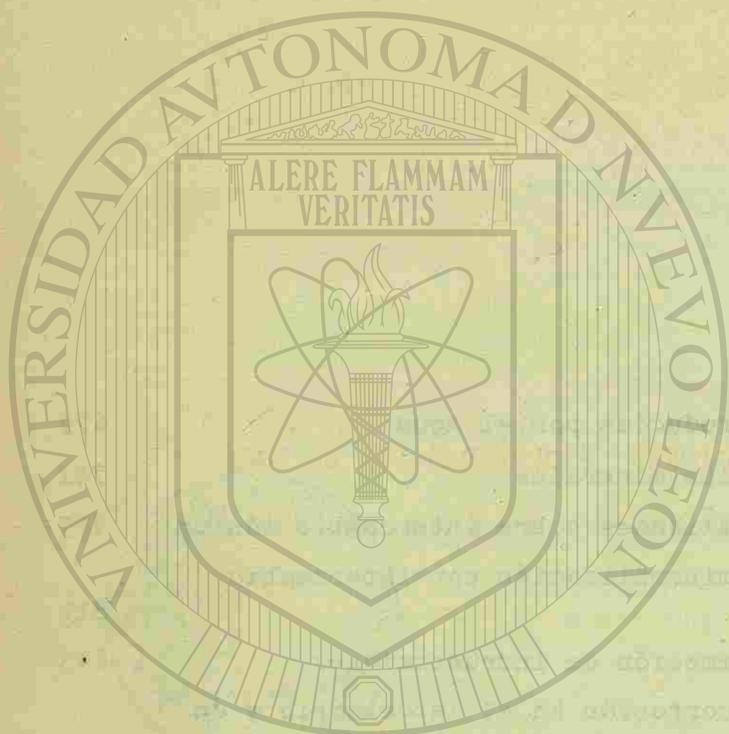
MONTERREY, MEXICO

BRIL DE 1987

Volumen III

Incrustación producida por el agua	679
Remoción de sales minerales	741
Teoría y generalidades sobre intercambio iónico	777
Proceso de desmineralización por intercambio iónico	811
Prevención y remoción de incrustaciones	875
Control de la corrosión en el laboratorio y en el campo	915





UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

INCRUSTACIONES PRODUCIDAS POR EL AGUA

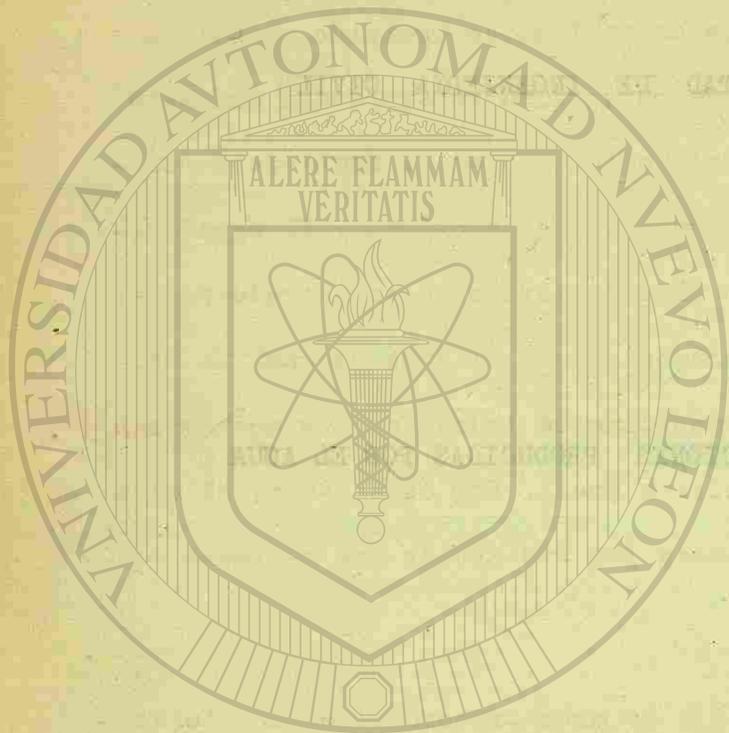
JUANIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. FRANCISCO V. CHAPA H.

MONTERREY, N.L. MARZO 1967.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INTRODUCCION

Generalidades.-

El agua es un líquido insípido, incoloro e inodoro, cuya constitución química es expresada mediante la fórmula H_2O , la cual indica que es la combinación de dos volúmenes de hidrógeno y uno de oxígeno. El agua químicamente pura, es un líquido raramente encontrado en tal estado; esto es ocasionado porque el agua es casi un solvente universal, y prácticamente todas las sustancias son solubles en ella en cierto grado. Por ésta razón, el agua es fácilmente contaminada por sustancias que se ponen en contacto con ella.

La fuente de agua primordial en la tierra son los océanos, ésta agua es evaporada por acción de la energía calorífica radiada por los rayos solares, generándose con esto la formación de las nubes, las cuales al ponerse en contacto con corrientes de aire frío, se condensan en forma de lluvia o nieve. Desde el instante en que la lluvia cae a la tierra, se contamina con impurezas del aire (CO_2 , O_2 , H_2S , polvos, etc.) y posteriormente es im-

purificada por la solución de minerales y metales de la corteza terrestre.

Por último, el agua se purifica nuevamente por evaporación. Esta secuencia de operaciones físicas -- que sufre el agua (evaporación, condensación, filtración) se le denomina EL CICLO DEL AGUA.

La acción solvente del agua sobre los minerales es influenciado grandemente por la acción de los gases como el CO_2 y O_2 .

La atmosfera contiene aproximadamente 0.04% en volumen de dióxido de carbono, y este se disuelve fácilmente en el agua en las precipitaciones pluviales. El contenido del CO_2 en el agua es incrementado por la descomposición de materia orgánica y la presencia de desperdicios industriales. Es por ésta serie de condiciones, el que el agua no se obtenga completamente pura de las fuentes de abastecimiento, como son:

Pozos artesianos, rios, lagos etc., sino en forma de una solución completa conteniendo tanto com---

puesto inorgánicos, como orgánicos.

La composición química de cualquier agua demuestra en gran parte la zona geológica donde fué obtenido.

Las aguas duras son obtenidas de zonas ricas en caliza (CaCO_3) ó de yeso (CaSO_4), las aguas alcalinas proceden de zonas ricas en depósitos de sales de sodio y potasio. Además de estas sales disueltas el agua puede tener material de suspensión producto de la acción erosiva sobre el terreno por donde se desplaza.

A continuación se presenta una tabla en la que se describe la dureza tanto temporal como permanente y la alcalinidad de varias fuentes de abastecimiento de agua de la región noreste del país, y en esta forma hacer notar las diferentes características en cuanto a composición de estas aguas.

El agua para poder ser utilizada en el medio doméstico e industrial, requiere un tratamiento físico y químico para obtener la calidad deseada en cuanto a ciertas características, como: Acidez, alcalinidad, dureza, potabilidad etc. Dependiendo del uso que se le dé al agua y de

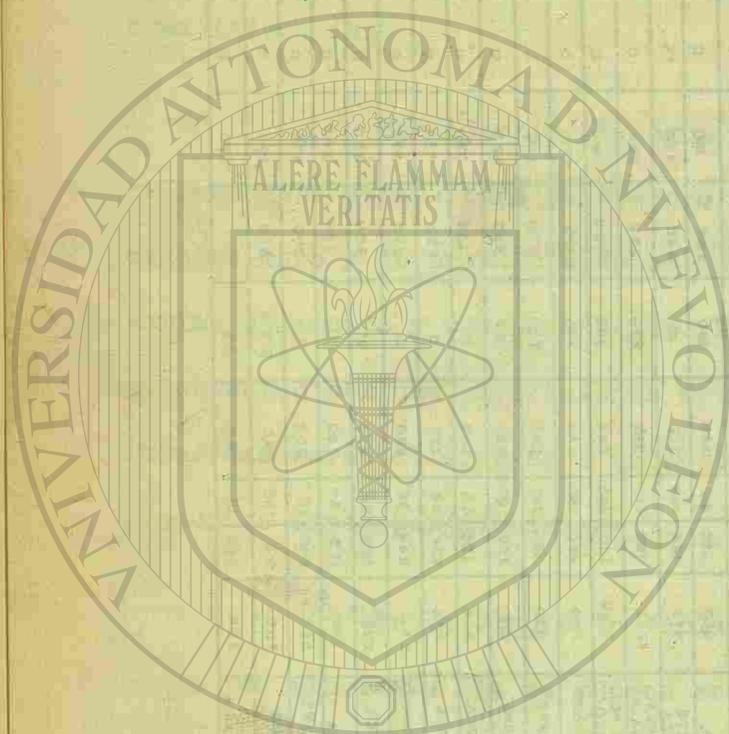
los requerimientos de calidad, así será el tipo de tratamiento a la que se somete. Es por eso que una purificación de agua de uso doméstico, sea inapropiada para un agua industrial.

Por ejemplo: El agua que se usará en una caldera debe estar libre de sustancias formadoras de incrustaciones y de productos de corrosión puesto que dañarían al equipo y sus accesorios. Este tipo de agua será obtenido por una purificación artificial, donde las impurezas serán eliminadas o serán transformadas en otros productos menos perjudiciales.

En la siguiente tabla No. 1 se da una lista de las impurezas que se pueden encontrar en una agua y cuya presencia es perjudicial para el equipo.

ANÁLISIS DE VARIAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE LA REGIÓN NORESTE DEL PAÍS MOSTRANDO LAS DIFERENTES CARACTERÍSTICAS.

LUGAR	FUENTE	DUREZA EXPRESADA EN ppm como CaCO ₃			ALCALINIDAD EXPRESADA EN ppm como CaCO ₃		
		TOTAL	Ca	Mg	TOTAL	HCO ₃	CO ₃
GRAL. ZUAZUA N.L.	AGUA DE POZO	820	460	360	440	440	0
SALTILLO COAH.	POZO PROFUNDO	1000	600	400	440	440	0
Ocampo COAH.	MOLINO DEL REY	2080	1280	800	360	360	0
LINARES N.L.	PLANTA POTABILIZADORA	324	320	4	166	166	0
EJIDO DERRAMADERO GALEANA N.L.	GRIFO	480	280	200	330	330	0
GALEANA N.L.	LAGUNA DE LABRADORES	2200	2000	200	400	400	0
MATAMOROS TAMPS.	RED DE DISTRIBUCION.	360	220	40	180	180	0
SABINAS HIDALGO N.L.	FOZO ABIERTO RANCHO GARZA	312	144	168	312	440	15
CUATRO CIENEGAS. COAH.	CANAL GENERAL DE LOS NOGALES	1232	760	472	1282	282	0
MONTERREY N.L.	AGUA CRUDA DE POZO CASA GUARDADO	888	640	248	590	590	0
ESCOBEDO. N.L.	POZO PROFUNDO	740	460	280	470	470	0
RAMOS ARIZPE COAH.	OJO CALIENTE	570	360	210	250	250	0
SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L.	POZO ARTESIANO	510	330	180	320	320	0
VILLA DE SANTIAGO N.L.	PRESA LA BOCA	248	208	40	248	330	0
VILLA DE SANTIAGO N.L.	PRESA LA BOCA	132	104	28	132	152	0
VILLA DE SANTIAGO N.L.	ARROYO LA CHUECA	280	244	36	280	372	0
VILLA DE SANTIAGO N.L.	PRESA LA BOCA	272	180	92	272	350	0
LA HUASTECA N.L.	TOMA DOMICILIARIA	260	175	85	260	280	0
SAN FRANCISCO VILLA DE SANTIAGO N.L.	TANQUE GUADALUPE	255	240	15	255	260	0
COLONIA FIERRO MONTERREY N.L.	POZO PROFUNDO	705	510	195	390	390	0
MINA N.L.	GRIFO CD. UNIVERSITARIA	325	240	85	290	290	0



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Objetivo.-

El presente trabajo pretende enfocar la atención en el estudio de las incrustaciones producidas por el agua en tuberías y equipo. Por lo anotado en la tabla No. 1 se puede confirmar que de 17 agentes contaminantes del agua, aproximadamente 11 generan incrustaciones, a saber:

Sólidos en Suspensión

Sílice

Sales de Calcio

Sales de Magnesio

Grasas y Aceites

Aguas Negras

Por INCRUSTACION, se entiende como el fenómeno de acumulación de sólidos o en algunas ocasiones el - de fases no fluidas, en tal forma que evita la buena operación del equipo y puede deteriorarlo.

Las fases sólidas pueden contener lo siguiente:

Productos de Reacciones de Corrosión.

Partículas Producto de la Abrasión del flúido sobre el medio.

Fases Sólidas Generadas en el Seno del flúido, ya sea por cambios físicos (Cambios de solubilidad) o por reacciones químicas.

En el caso específico del agua la formación de incrustaciones es ocasionada por la presencia de sustancias que tienen una curva de solubilidad invertida, es decir aquella cuya solubilidad disminuye con los incrementos de temperatura. La incrustación no está relacionada necesariamente con los materiales de baja solubilidad. La sustancia más común que forma incrustación es el sulfato de calcio. Cuando el carbonato de calcio se disuelve en agua en la cual la cantidad de CO_2 es constante, el carbonato de calcio tiene una curva de solubilidad normal. Sin embargo cuando el agua que contiene bicarbonato de calcio es hervida, se inicia un desprendimiento de anhídrido carbónico y el carbonato de calcio es precipitado en tal forma, hasta que se deposita la incrustación.

Cuando partículas sólidas se encuentran en suspensión en el líquido y se está formando una incrustación, tales sólidos son generalmente depositados conjuntamente.

La presencia de incrustaciones en tuberías y equipos disminuye el área de flujo de fluidos, y por ser mal conductora de calor constituye una resistencia térmica en equipos donde se efectúa una transferencia de calor, disminuyendo la eficiencia de la operación y causando en muchas ocasiones roturas de tubos y placas como lo muestra la figura - No. 1



Fig. #1 Tubos de caldera y de motores Diesel incrustados. Debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica, la formación de depósitos en recipientes calentados directamente o en máquinas de combustión interna, presenta el peligro de sobrecalentamiento y la falla eventual del metal.

Sólidos en Suspensión.-

Con este nombre se designa al material insoluble que puede estar suspendido en el agua y cuya naturaleza es heterogénea, Estas impurezas pueden ser de origen inorgánico como las arcillas, carbonato de calcio, sílice, hidróxido férrico, azufre, etc. pueden ser de naturaleza orgánica, como la materia vegetal finamente dividida, como aceites grasas etc.

Todo este material produce una disminución de la claridad del agua que se denomina TURBIDEZ. Estas partículas sólidas en suspensión pueden variar en el tamaño desde las formas coloidales a las muy gruesas. Las partículas grandes solo podrán mantenerse en suspensión en flujos demasiado turbulentos. Todo material que por su peso tienda a precipitarse se le denomina SEDIMENTO.

Las aguas que contienen cantidades apreciables de sólidos en suspensión no son utilizables como alimentación en calderas, puesto que originan depósitos de lodos dentro del equipo y pueden favorecer a que el agua produzca espuma e incruste, prácticamente todas las aguas

superficiales contienen algo de materia en suspensión, lo cual requiere su eliminación para que pueda ser utilizada en la industria. Aún las aguas que se utilizan en medios de enfriamiento requieren la eliminación de los sólidos en suspensión por medios físicos como: asentamiento, filtración etc. y por medios químicos: coagulación.

Sílice (SiO₂).

En todos los suministros de agua naturales, la sílice se encuentra presente en cantidades variables, dependiendo de la procedencia del agua; pero aproximadamente varía entre fracciones de p.p.m. hasta más o menos 100 p.p.m.

Esta sílice se encuentra solubilizada, la no solubilizada es decir la que puede tener en suspensión, es producto del arrastre mecánico y erosión del agua sobre el terreno en que se desplaza.

La sílice es una impureza perjudicial en las calderas de alta presión, en donde presenta tendencia a depositarse. Si hay calcio presente el depósito puede ser de silicato de calcio; si hay alúmina (Al₂O₃), el de-

Sólidos en Suspensión.-

Con este nombre se designa al material insoluble que puede estar suspendido en el agua y cuya naturaleza es heterogénea, Estas impurezas pueden ser de origen inorgánico como las arcillas, carbonato de calcio, sílice, hidróxido férrico, azufre, etc. pueden ser de naturaleza orgánica, como la materia vegetal finamente dividida, como aceites grasas etc.

Todo este material produce una disminución de la claridad del agua que se denomina TURBIDEZ. Estas partículas sólidas en suspensión pueden variar en el tamaño desde las formas coloidales a las muy gruesas. Las partículas grandes solo podrán mantenerse en suspensión en flujos demasiado turbulentos. Todo material que por su peso tienda a precipitarse se le denomina SEDIMENTO.

Las aguas que contienen cantidades apreciables de sólidos en suspensión no son utilizables como alimentación en calderas, puesto que originan depósitos de lodos dentro del equipo y pueden favorecer a que el agua produzca espuma e incruste, prácticamente todas las aguas

superficiales contienen algo de materia en suspensión, lo cual requiere su eliminación para que pueda ser utilizada en la industria. Aún las aguas que se utilizan en medios de enfriamiento requieren la eliminación de los sólidos en suspensión por medios físicos como: asentamiento, filtración etc. y por medios químicos: coagulación.

Sílice (SiO₂).

En todos los suministros de agua naturales, la sílice se encuentra presente en cantidades variables, dependiendo de la procedencia del agua; pero aproximadamente varía entre fracciones de p.p.m. hasta más o menos 100 p.p.m.

Esta sílice se encuentra solubilizada, la no solubilizada es decir la que puede tener en suspensión, es producto del arrastre mecánico y erosión del agua sobre el terreno en que se desplaza.

La sílice es una impureza perjudicial en las calderas de alta presión, en donde presenta tendencia a depositarse. Si hay calcio presente el depósito puede ser de silicato de calcio; si hay alúmina (Al₂O₃), el de-

pósito es un aluminosilicato tal como la analcita; y en --
otras condiciones los depósitos pueden consistir casi com-
pletamente de sílice.

Las incrustaciones producidas son adheren--
tes y muy duras, y de aspecto vidriado y difíciles de remo-
ver. Sus conductividades térmicas son usualmente bajas y -
producen fallas en los tubos aún cuando haya una pequeña -
costra. La sílice es a veces arrastrada por el vapor, for-
mando depósitos en el recalentador y en las hojas de la --
turbina.

Se supone que el SiO_2 es soluble hasta ---
cierto punto en vapor de alta presión.

En equipo generador de vapor a baja presión,
los depósitos de sílice pueden usualmente evitarse mante-
niendo un pequeño exceso de fosfato y una razón de alcali-
nidad a sílice de cuando menos 1:1 en las purgas de la cal-
dera.

En aguas de proceso, la sílice parece no te-
ner un efecto negativo en los productos. Por tratamiento -

apropiado el contenido de sílice en el agua puede ser redu-
cido a límites no perjudiciales.

Si el agua por tratar, es agua superficial
que requiera coagulación, el uso de sulfato férrico como
coagulante ayudará a reducir el contenido del SiO_2 . La cal-
dolomítica o magnesia activada usadas en el proceso de cal-
soda en caliente, es muy efectiva para este efecto.

Los silicatos generados entre la sílice y
otras impurezas del agua, son parecidos a las zeolitas y
tienen propiedades muy peculiares.

De acuerdo a C.Doelter, la analcita, NaAl
 $(\text{SiO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, se formará cuando los reactivos de sodio, -
aluminio y sílica se encuentren en un sistema cerrado --
entre temperatura de 180 a 430°C.

Arriba de la temperatura límite superior -
de 430°C se dice que la analcita se transforma en un com-
puesto anhidro (nefelina) cuya fórmula es $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot$ --
 2SiO_2 . Abajo de la temperatura de 180°C se convierte en
natrolita cuya fórmula es $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$.

La analcita no solo es una sal compleja generada en el seno del agua, sino que se encuentra en depósitos minerales de regiones volcánicas. Frecuentemente se localiza en fisuras y cavidades de la lava, en forma de cristales pequeños. Se describe su origen en la presencia de soluciones acuosas finales que se forman en la última etapa de la actividad volcánica, después que las soluciones de magma han alcanzado una temperatura y presión moderada.

A. de Schulten preparó analcita artificial, por mezcla de soluciones de silicato de sodio en una proporción tal, que en el producto obtenido, las cantidades de alúmina y sílice fueron las mismas que en la analcita natural.

La prueba se realizó, mezclando los reactivos con lechada de cal y calentando la muestra en un tubo de cobre sellado a 180°C.

Después de 18 horas se obtuvieron cristales de analcita con la siguiente composición (Tabla II)

TABLA II

Componente	Analcita Artificial %	Analcita Natural %
Sílice (SiO_2)	55.4	54.4
Alúmina (Al_2O_3)	22.1	23.3
Soda (Na_2O_3)	14.3	14.1
Agua (H_2O)	8.2	8.2
Total	100.0	100.0

La presencia de lechada de cal es como un medio de cristalización.

La analcita cristaliza ya sea en forma cúbica o con caras trapezoidales dependiendo de las condiciones de la cristalización.

Salas de Calcio.-

Cloruro de Calcio (CaCl_2).

Esta sal se localiza en salmueras naturales, depósitos salinos etc. Forma parte de diferentes sales como la:

Taquidrita $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

Hidrofilita CaCl_2

Monohidrato de Cloruro de Calcio $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Bihidrato de Cloruro de Calcio $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Exahidrato de Cloruro de Calcio $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Todas estas sales son delicuescentes y altamente solubles en agua.

TABLA III

SOLUBILIDADES DE CLORURO DE CALCIO

EN AGUA.

Temperatura	Solubilidad (p.p.m. de CaCO_3)
0°C	336,000
100°C	554,000

En los sistemas generadores de vapor la presencia de cloruro de calcio es altamente corrosiva.

Carbonato de Calcio. - (CaCO_3)

Es el principal constituyente de la piedra caliza, siendo bastante insoluble en agua, pues a una temperatura de 100°C es solamente soluble 13 partes por millón.

Cuando se presenta en el agua, es en estado de suspensión. Cuando el carbonato de calcio se genera en el agua es como producto de la descomposición térmica de una sal soluble de bicarbonato de calcio.

El equipo donde se calienta el agua o se genera vapor, la reacción que se produce es la siguiente:

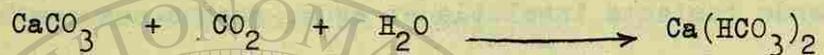


A elevadas temperaturas y presiones, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye. En la proximidad de 14.2 atmósferas (200°C) la solubilidad del CaCO_3 es un poco menor de 5 p.p.m.

Bicarbonato de Calcio. - ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)

El bicarbonato de calcio existe en solución y se forma por la acción del agua que contiene CO_2 sobre la

piedra caliza, marmol, calcita, dolomita y otros minerales que contiene carbonato de calcio, de acuerdo a la siguiente reacción:



En agua a 0°C y saturada con bioxido de carbono a presión atmosférica, la solubilidad del bicarbonato de calcio es de 1620 p.p.m. esta es la máxima solubilidad y muchas aguas naturales no contienen suficiente bicarbonato de calcio como para aproximarse a esta cantidad.

Cuando la temperatura aumenta, la solubilidad disminuye debido a que se incrementa la velocidad de reacción en sentido contrario a la expresada anteriormente.

En las calderas la reversibilidad de la reacción es completa, y el contenido total de bicarbonato de calcio se descompone en dióxido de carbono, agua y carbonato de calcio, esta sal tiene una solubilidad muy baja pues a 0°C es de 15 p.p.m. y a 100°C de 13 p.p.m.

Sulfato de Calcio. - (CaSO_4) .

Esta sal se presenta en diferentes minerales con varios nombres y composición:

Plaster de Paris	CaSO_4
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Blanco de Paris	$\text{CaSO}_4 \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$

El sulfato de calcio es la única sal que forma incrustaciones, de todas aquellas sales que producen dureza permanente, ya que el sulfato, cloruros y nitratos de calcio y magnesio tienen solubilidades que exceden las 150,000 p.p.m. a 0°C y de 356,000 p.p.m. a 100°C expresadas como p.p.m. CaCO_3 .

El yeso tiene una curva de solubilidad que presenta un incremento hasta cerca de los 40°C, después de esta, y el contenido total de bicarbonato de calcio se descompone cual desciende, hasta que a 100°C es un poco menor que la solubilidad a 0°C.

TABLA IV

Solubilidad de Sulfato de Calcio en Agua de 0° a 220°C.-

Temperatura (°C)	Solubilidad en p.p.m. de CaCO ₃
0	1,293
40	1,551
100	1,246
170 (100 psig.)	103
200 (210 psig.)	56
220 (322 psig.)	40

Debido a la baja solubilidad del CaSO₄ a temperatura prevalectentes en las calderas, y al tipo de incrustación dura y adherente, no se puede tolerar ninguna cantidad de sulfato de calcio en agua para ser usadas en calderas.

Salas de Magnesio.-

Cloruro de Magnesio.- (MgCl₂)

El cloruro de magnesio se localiza en el agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos etc., Se presenta en la naturaleza bajo la forma de di-

ferentes minerales como son:

Cloromagnesita	MgCl ₂
Biscofita	MgCl ₂ · 6H ₂ O
Carnalita	MgCl ₂ · KCl · 6H ₂ O
Taquidrita	CaCl ₂ · 2MgCl ₂ · 12H ₂ O

El cloruro de magnesio es delicuescente y bastante soluble en agua, a una temperatura de 0°C es soluble en 362,000 p.p.m. y a 100°C es de 443,000 p.p.m.

Su presencia en el agua de caldera es muy perjudicial por su acción corrosiva debido a que a la temperatura de operación, produce una reacción química con el agua generando ácido clorhídrico e hidróxido de magnesio:



El depósito que se genera es de hidróxido de magnesio el cual debido a su baja solubilidad en el agua se precipita y se adhiere a las paredes del equipo.

A una temperatura de 100°C la solubilidad en agua de hidróxido de magnesio expresada en p.p.m. de carbonato de calcio es de 8.

TABLA IV

Solubilidad de Sulfato de Calcio en Agua de 0° a 220°C.-

Temperatura (°C)	Solubilidad en p.p.m. de CaCO ₃
0	1,293
40	1,551
100	1,246
170 (100 psig.)	103
200 (210 psig.)	56
220 (322 psig.)	40

Debido a la baja solubilidad del CaSO₄ a temperatura prevalectentes en las calderas, y al tipo de incrustación dura y adherente, no se puede tolerar ninguna cantidad de sulfato de calcio en agua para ser usadas en calderas.

Salas de Magnesio.-

Cloruro de Magnesio.- (MgCl₂)

El cloruro de magnesio se localiza en el agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos etc., Se presenta en la naturaleza bajo la forma de di-

ferentes minerales como son:

Cloromagnesita	MgCl ₂
Biscofita	MgCl ₂ · 6H ₂ O
Carnalita	MgCl ₂ · KCl · 6H ₂ O
Taquidrita	CaCl ₂ · 2MgCl ₂ · 12H ₂ O

El cloruro de magnesio es delicuescente y bastante soluble en agua, a una temperatura de 0°C es soluble en 362,000 p.p.m. y a 100°C es de 443,000 p.p.m.

Su presencia en el agua de caldera es muy perjudicial por su acción corrosiva debido a que a la temperatura de operación, produce una reacción química con el agua generando ácido clorhídrico e hidróxido de magnesio:



El depósito que se genera es de hidróxido de magnesio el cual debido a su baja solubilidad en el agua se precipita y se adhiere a las paredes del equipo.

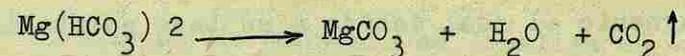
A una temperatura de 100°C la solubilidad en agua de hidróxido de magnesio expresada en p.p.m. de carbonato de calcio es de 8.

Bicarbonato de Magnesio.- $Mg(HCO_3)_2$

Esta sal solo existe en solución y se forma en la acción del agua que contiene dióxido de carbono libre sobre la magnesita, dolomita, piedra caliza dolomítica y otros tipos de minerales que contengan carbonato de magnesio de acuerdo a las siguientes reacciones:



La solubilidad del bicarbonato de magnesio en agua saturada de CO_2 a $0^\circ C$ es de 37,100 p.p.m. La cantidad de bicarbonato de magnesio en las aguas naturales es usualmente baja menor de 75 p.p.m. Por la acción de las elevadas temperaturas y presiones de operación en las calderas la anterior reacción química se hace reversible y desplaza el equilibrio hacia los reactivos, es decir el bicarbonato de magnesio en solución se descompone en carbonato de magnesio, agua y desprendimientos de bioxido de carbono.



El carbonato de magnesio producido en la anterior reacción es soluble en agua pura, siendo de 101 .--

p.p.m. a $32^\circ C$ y 75 p.p.m. a $100^\circ C$. Pero bajo las condiciones térmicas elevadas, el carbonato reacciona con el agua desprendiendo bioxido de carbono y precipitando hidróxido de magnesio cuya solubilidad en agua es demasiado baja, de 17 p.p.m. a $0^\circ C$ y de 8 p.p.m. a $100^\circ C$.

El hidróxido de magnesio en forma de depósito; puede perder parte de su contenido de agua al adherirse a los tubos y aparecer parcialmente como óxido de magnesio.

A temperaturas y presiones muy elevadas la solubilidad del hidróxido de magnesio disminuye, pues a una temperatura de $200^\circ C$ y 14.2 atmosferas, la solubilidad llega a ser un poco mayor de una parte por millón expresada como carbonato de calcio.

MECANISMO DE FORMACION DE INCRUSTACIONES.--

El mecanismo de formación de incrustaciones es complejo y durante muchos años ha sido objeto de controversias. Por lo que aquí se describirán las formas posibles como se generan las incrustaciones.

Si un agua conteniendo bicarbonato de calcio, es calentada, dióxido de carbono es desprendido y puesto que la elevada solubilidad del $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ es debido a la presencia de este gas, el carbonato de calcio es precipitado rápidamente, tan pronto se vaya disminuyendo la concentración del CO_2 en el agua. Como resultado de éste fenómeno se producirá una incrustación de carbonato de calcio.

El sulfato de calcio, debido a su insolubilidad a temperaturas elevadas, es precipitado rápidamente, pudiendo ser convertido en otro compuesto por tratamiento químico o removido del agua tan pronto se va precipitando, mediante purgas. Si lo anterior no se realiza, producirá, sobre las superficies del equipo, tubería etc., una incrustación dura y adherente.

La explicación más clara de la deposición de sólidos en calderas por ejemplo fue realizada por Dewrance y posteriormente por Partridge. Este último cita en uno de sus trabajos lo siguiente: La deposición y crecimiento de los cristales sobre las superfi-

cies de calentamiento de calderas, es ocasionado principalmente por el hecho de que ciertas sustancias ligeramente solubles vienen a ser menos solubles con temperaturas más elevadas.

La depositación inicial de cristales es el resultado de la cristalización en la superficie calentada, por una solución la cual es sobresaturada con respecto al soluto que forma la incrustación. Puesto que las sustancias formadoras de incrustaciones disminuyen su solubilidad con los aumentos de temperatura, éstas se precipitarán formando costras o depósitos en las superficies de las tuberías etc.

La película de agua en contacto con la superficie de calentamiento tiende a estar sobresaturada, aún cuando el cuerpo de la solución esta en el estado de saturación. La sobresaturación en la película del líquido en la superficie de calentamiento puede ser quitada por cristalización espontánea, ocasionada posiblemente por irregularidades en la superficie, aún cuando ninguna vaporización se produzca. Cuando hay burbujas que se desprenden en la superficie de calentamiento, sin embargo, el exceso de soluto, es depositado como cristales pequeñísimos en anillos direc-

tamente en las interfases sólido-líquido- vapor formadas en la superficie metálica, el agua de la caldera, y las burbujas formándose en la superficie.

El crecimiento de la incrustación después de la depositación inicial de núcleos de cristales puede efectuarse en dos formas.

Los cristales existentes pueden desarrollarse por contacto con la película líquida sobresaturada, efectuándose una difusión de materia del soluto soluble hacia el soluto insoluble de la incrustación.

Si éstos cristales son removidos del contacto con la solución, con el uso de una película de sustancia coloidal presente en el agua de la caldera, una posterior depositación de nuevos cristales, sobre el depósito anterior toma lugar como resultado de la evolución de burbujas. En el primer caso, la incrustación resultante consiste principalmente de cristales relativamente grandes orientados más o menos perpendicularmente sobre la superficie de calentamiento, en la segunda etapa, la incrustación consistirá de cristales relativamente pequeños con orientación al azar.

El crecimiento de éstas incrustaciones es acelerado por el efecto de la fricción superficial en la pared interna de los tubos, puesto que las velocidades a lo largo de la pared del tubo son más pequeñas que en el centro del tubo.

Puesto que la formación de incrustaciones es ocasionada por la depositación de minerales a temperaturas y presiones elevadas, es un fenómeno análogo a la formación geológica, lo cual se confirma mediante la identificación petrográfica.

ESTUDIO ANALITICO TEORICO DE LA FORMACION
DE SUCIEDAD E INCRUSTACION EN SUPERFICIES
TERMICAS.-

El objetivo de éste análisis es el de establecer relaciones físicas y matemáticas entre una caída de presión aprovechable y la acumulación de suciedad e incrustación con el tiempo.

En la literatura, el único postulado matemático incluyendo incrustación superficial fúé presentado por -

tamente en las interfases sólido-líquido- vapor formadas en la superficie metálica, el agua de la caldera, y las burbujas formándose en la superficie.

El crecimiento de la incrustación después de la depositación inicial de núcleos de cristales puede efectuarse en dos formas.

Los cristales existentes pueden desarrollarse por contacto con la película líquida sobresaturada, efectuándose una difusión de materia del soluto soluble hacia el soluto insoluble de la incrustación.

Si éstos cristales son removidos del contacto con la solución, con el uso de una película de sustancia coloidal presente en el agua de la caldera, una posterior depositación de nuevos cristales, sobre el depósito anterior toma lugar como resultado de la evolución de burbujas. En el primer caso, la incrustación resultante consiste principalmente de cristales relativamente grandes orientados más o menos perpendicularmente sobre la superficie de calentamiento, en la segunda etapa, la incrustación consistirá de cristales relativamente pequeños con orientación al azar.

El crecimiento de éstas incrustaciones es acelerado por el efecto de la fricción superficial en la pared interna de los tubos, puesto que las velocidades a lo largo de la pared del tubo son más pequeñas que en el centro del tubo.

Puesto que la formación de incrustaciones es ocasionada por la depositación de minerales a temperaturas y presiones elevadas, es un fenómeno análogo a la formación geológica, lo cual se confirma mediante la identificación petrográfica.

ESTUDIO ANALITICO TEORICO DE LA FORMACION
DE SUCIEDAD E INCRUSTACION EN SUPERFICIES
TERMICAS.-

El objetivo de éste análisis es el de establecer relaciones físicas y matemáticas entre una caída de presión aprovechable y la acumulación de suciedad e incrustación con el tiempo.

En la literatura, el único postulado matemático incluyendo incrustación superficial fúé presentado por -

McCabe & Robinson. Ellos encontraron una ecuación que describe la variación del coeficiente fílmico total de la incrustación en transferencia térmica con el tiempo, el cual varía inversamente con la raíz cuadrada del tiempo.

Este estudio está relacionado con la forma más simple de la depositación la cual ocurre dentro de un tubo de diámetro uniforme.

La disminución de la velocidad de depositación con el incremento de las velocidades lineales del fluido, tiene la influencia del esfuerzo al corte, como agente para remover la suciedad e incrustación en la interfase fluido-incrustación. Cambiadores de calor incrustados pueden ser limpiados a menudo, por incremento temporal de la velocidad del fluido circulante.

Considerando la acumulación como el resultado del proceso simultáneo y continuo de la depositación de incrustación en ángulo recto al flujo y la remoción de la incrustación por el corte del fluido en dirección del flujo del fluido, por lo tanto deben existir un potencial para la acumulación y otra para la remoción o arrastre.

La acumulación neta puede ser expresada como un cociente entre un término de depositación en el numerador y un término de remoción en el denominador.

También puede ser expresado usando la depositación como una serie de términos y la remoción en igual forma, así que la acumulación neta es obtenida por resta.

El uso de términos de diferencia es más ventajoso puesto que las variables no pierden su identidad como entidades de dinámica de fluido.

Katz, Knudsen, Baelkjian y Grover determinaron la variación de la resistencia de la incrustación con el tiempo, llegando al siguiente tipo de ecuación:

$$R_{\theta} = R^* (1 - e^{-B\theta}) \quad (1)$$

R^* es el valor de R_{θ} en la asíntota.

Un fluido fluyendo ejerce un esfuerzo al corte τ en la pared, el cual puede ser relacionado con el factor de fricción.

Será considerado que el factor de fricción constante e independiente de la cantidad presente de incrustación.

El esfuerzo al corte en la pared, sucia o pia es fácilmente calculado mediante la ecuación.

$$\tau = \frac{2fv^3}{4g} \rho \quad (2)$$

Si la película de incrustación es delgada y τ permanecen inalterados durante el período en el cual incrustación se acumula. El potencial de depositación de de de la naturaleza de la fuerza directriz.

De la anterior ecuación Katz logró determinar el término de depositación el cual imparte una inflexión asintótica al crecimiento de la película de incrustación.

Esto sugiere una ecuación para la fuerza directriz de la siguiente forma:

$$\text{Fuerza Directriz} = c e^{-B\theta}$$

Donde c y B son constantes. La resistencia de la incrustación es:

$$R = \frac{4cg(1-e^{-B\theta})}{2fv^2 \rho B} \quad (4)$$

Será considerado que la velocidad de transporte de fluido y de depositación de incrustación son constantes con el tiempo. La velocidad de depositación constante puede ser expresada cuantitativamente en forma sencilla:

$$\text{Velocidad de depositación} = K_1 c' W \quad (5)$$

Donde K_1 es una constante de proporcionalidad, y W es el gasto en masa constante de flujo de fluido y c' es su contenido de suciedad y de incrustación.

Para permitir una expresión para la velocidad de remoción y arrastre será considerado que:

- 1) La remoción de incrustación es debido a la acción de corte de flujo en la superficie de incrustación.
- 2) En lugar de ser arrastrada la incrustación partícula por partícula como lo es en la depositación, la incrustación es

cortada en montones o trozos.

3) Hay una probabilidad que los planos débiles de la costra de incrustación pueden localizarse en cualquier punto del espesor de la película.

Se puede expresar la velocidad de remoción en una forma similar a la ecuación:

$$\text{Velocidad de remoción} = K_2 \tau x_\theta \quad (6)$$

Donde K_2 es también una constante de proporcionalidad y x_θ es el espesor de la costra.

El cambio en el espesor de la película con el tiempo es luego:

$$\frac{dx}{d\theta} = K_1 c' W - K_2 \tau x_\theta \quad (7)$$

Si el espesor de la película aumenta afecta apreciablemente la velocidad lineal del fluido y luego el esfuerzo al corte; esta variación puede ser incluida, haciendo uso de la ecuación de Blasius.

El esfuerzo al corte puede ser escrito:

$$\tau = \frac{2^{(3-2a)}}{\pi^{(2-a)}} \cdot \frac{K_f W^{(2-a)}}{g \rho} \cdot \frac{M^a}{(D-2x_\theta)^{(4-a)}} \quad (8)$$

Combinando las ecuaciones 7 y 8 y reorganizando para integración:

$$\text{Consideramos: } M = K_1 c' W; N = \frac{2^{(3-2a)}}{\pi^{(2-a)}} \cdot \frac{K_f K_2}{g \rho} \frac{M^a W^{(2-a)}}{\rho}$$

$$\theta = \int_0^{x_\theta} \frac{dx}{M - N \frac{x_\theta}{(D-2x_\theta)^{(4-a)}}} \quad (9)$$

El integrando converge para:

$$\left[\frac{N}{M} \frac{x_\theta}{(D-2x_\theta)^{(4-a)}} \right] < 1$$

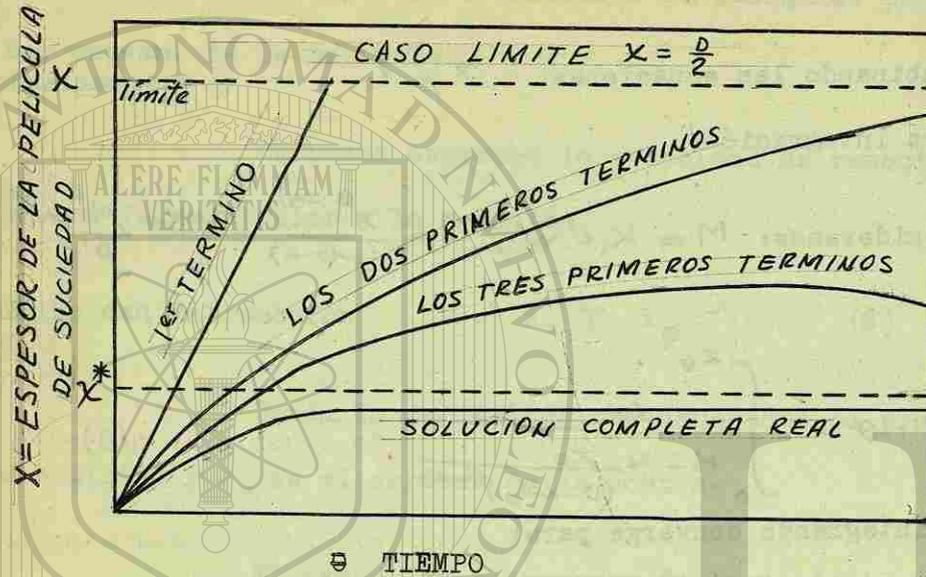
O la velocidad de depositación excede la ve-

locidad de remoción en todas las veces.

Reescribiendo la ecuación 9 se obtiene:

$$\theta = \frac{1}{M} \int_0^{x_\theta} \left\{ 1 + \frac{N}{M} \frac{x_\theta}{(D-2x_\theta)^{(4-a)}} + \left[\frac{N}{M} \frac{x_\theta}{(D-2x_\theta)^{(4-a)}} \right]^2 + \dots \right\} dx_\theta \quad (10)$$

La solución de la integración de los diferentes términos de la anterior ecuación son mostrados en la siguiente figura:



Habiendo obtenido la relación entre gas-to en masa, el espesor de la película de la costra y el tiempo, se procederá a obtener una relación entre el espesor de la película y la caída de presión.

Utilizando las ecuaciones 2, 7 y 8 es demostrado que:

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{4L}{D-2x_0} \left\{ \frac{2^{(4-2a)} (4-a) K_f}{\pi^{(2-a)} g \rho} \frac{M^a W^{(2-a)}}{(D-2x_0)^{(5-a)}} \right\} \left\{ k_1 c' W - \frac{2^{(3-2a)} K_f K_2 M^a W^{(2-a)} x_0}{\pi^{(2-a)} g \rho (D-2x_0)^{(4-a)}} \right\} \quad (11)$$

Este caso es integrable por computadoras. Sin embargo es de gran interés la solución particular relacionada al espesor de la incrustación en cualquier depositación - asintótica y a la caída de presión necesaria para obtenerla. De la ecuación 11 es aparente que una asíntota diferente pueda existir para cada caída de presión aprovechable. El objetivo de éste análisis es la de determinar cuanta energía es requerida para reducir el espesor asintótico de la incrustación en un punto donde viene a hacer una resistencia permanentemente tolerable para la transmisión de calor.

Puesto que se considera que la incrustación no tiene efecto de empaque en el análisis, el valor de la resistencia transitoria R_θ es directamente relacionada al espesor de la incrustación, por el valor constante de la conductividad térmica de la incrustación.

Un asterisco se usará para indicar las características de las variables en la asíntota.

Considerando ahora los requerimientos de energía para reducir la altura de x_θ así que el aparato pueda operar continuamente sucio. El espesor asintótico de la peli

cula de incrustación x_θ en la ecuación 12:

$$\frac{x_\theta^*}{(D - 2x_\theta^*)^{4-a}} = \frac{M}{N} \quad (12)$$

El valor de la ecuación de la caída de presión en la asíntota es dado por las ecuaciones 13 y 14

$$\Delta P_\theta^* = \frac{4L\tau^*}{(D - 2x_\theta^*)} \quad (13)$$

$$\tau_\theta^* = \frac{N}{K_2 (D - 2x_\theta^*)^{4-a}} \quad (14)$$

Combinando las ecuaciones 12, 13, 14 y reemplazando M por sus componentes:

$$(x_\theta^*) = \frac{32\pi^{2-a} g \rho L^{4-a} K_1^{(5-a)} c^{(5-a)} W^3}{K_f \mu^a K_2^{(5-a)} (\Delta P_\theta^*)^{4-a}} \quad (15)$$

Puesto que "a" es generalmente menor que 0.25, la expresión puede ser simplificada tomando un valor de "a" = 0, luego la ecuación 15 viene a ser:

$$x_\theta^* = \frac{2K_1 c'}{K_2} \left(\frac{\pi^2 g \rho L^4 W^3}{K_f \rho (\Delta P_\theta^*)^4} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (16)$$

Luego se puede estimar la influencia de las variables, tomando la razón de la asíntota para el mismo fluido bajo dos condiciones diferente de operación. La razón será:

$$\frac{(x_\theta^*)_2}{(x_\theta^*)_1} = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^{0.8} \left(\frac{(\Delta P_\theta^*)_1}{(\Delta P_\theta^*)_2} \right)^{0.8} \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{0.6} \quad (17)$$

Problema Ilustrativo.-

Los productos ligeros de una torre de destilación, en forma de vapor se condensan en un condensador de superficie pasando de una temperatura de 130°F a 100°F, usando un agua de enfriamiento operando de 85° a 100°F.

Una gran parte del condensado vuelve a la columna como reflujo.

Si una temperatura baja se produce en el clima esto afectará la temperatura del agua del condensador la cual entrará a 55°F en lugar de 85°F Considerando la misma aproximación en el condensado este pasará de 100°F a 70°F.

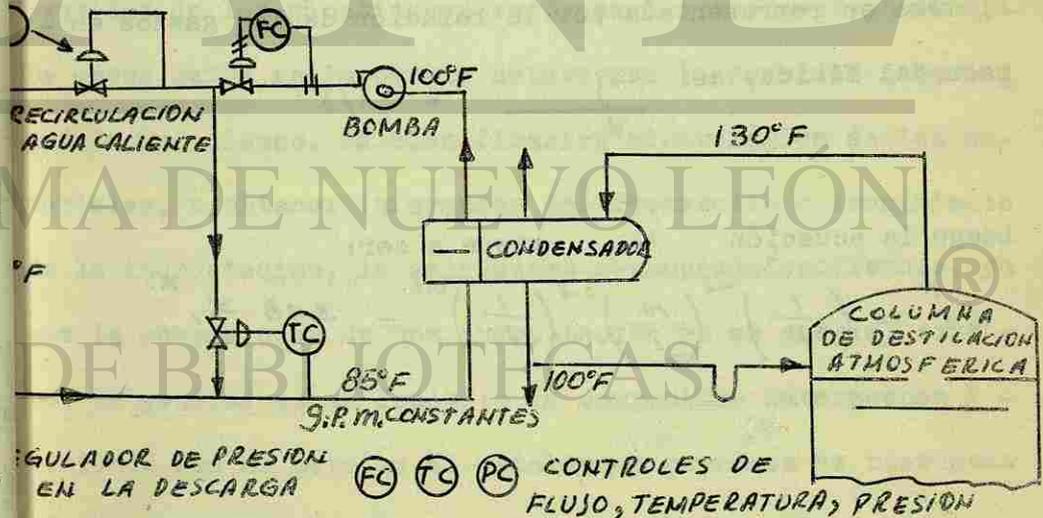
La demanda sobre la carga térmica de la caldera (reboiler) aumenta mientras se efectúa la separación del destilado, debido a que el condensado subenfriado nulifica el equilibrio vapor-líquido en alguno de los platos de la columna.

Para llevar la temperatura del condensador nuevamente a 100°F, el agua es disminuída en su flujo, para suministrar un intervalo de 55°F a 100°F Previamente con 15°F de intervalo, el agua fluyó a una velocidad lineal de 3 piés por segundo. Con un intervalo de 45°F en tiempo de frío la velocidad lineal se redujo a un pié por segundo. Después de un breve período de operación bajo estas condiciones, el condensado volvió a una

temperatura arriba de los 100°F. Un incremento gradual en el flujo del agua parece no tener una influencia en las condiciones térmicas terminales del condensador.

Si el condensador estuviera trabajando a tres piés por segundo de velocidad de flujo del agua con su respectivo nivel asintótico de incrustación, no crearía problemas de limpieza.

¿Qué efecto cuantitativo se produjo sobre el espesor asintótico de la incrustación con la reducción del flujo del agua?.



Solución.-

La longitud de la trayectoria de flujo del agua en el condensador permanece la misma, si se usa el índice 1 para la condición inicial y 2 para la final tenemos que $L_2 = L_1$.

Puesto que el flujo del agua en el condensador ha sido reducido a una tercera parte, y la caída de presión en la asintota ha disminuído a un valor aproximadamente de un décimo, luego la relación de caída de presión asintótica será:

$$\frac{\Delta P_1^*}{\Delta P_2^*} = 10$$

La cantidad de incrustación adicionada al sistema es representada por la relación de los gastos en masa del fluido, así

$$\frac{W_1}{W_2} = 1/3$$

Luego la ecuación 17 viene a ser:

$$x_2^* = \left(\frac{1}{1}\right)^{0.8} \left(\frac{10}{1}\right)^{0.8} \left(\frac{1}{3}\right)^{0.6} = 3.28 x_1^*$$

Ya que se ha encontrado esta relación de es-

pesores asintóticos de la costra bajo condiciones iniciales y finales, se puede concluir que por una disminución de la velocidad del flujo de fluido del agua se incrementa notablemente la acumulación de incrustaciones en equipo industrial. Haciendo con ello que la resistencia térmica controladora en el flujo de calor a través de superficies resida grandemente en las incrustaciones.

IMPORTANCIA DEL ANALISIS DE LAS INCRUSTACIONES

La determinación de la composición de las incrustaciones mediante análisis químico ^{titativo} cuantitativo, es muy importante puesto que sirve para identificar el tipo y la cantidad de los constituyentes presentes en los depósitos. De estos datos es imposible determinar la densidad o porosidad de los mismos, la clasificación mineralógica de los materiales, u obtener información del desarrollo o crecimiento de la incrustación, la estructura o propiedades físicas, ya que la composición de una incrustación no es simple, sino por lo general es un depósito de composición heterógena y complejo que no permite el establecer patrones de incrustaciones específicas. Como ejemplo de ello se cita la composición de un depósito complejo obtenido de una caldera.

COMPOSICION DE UN DEPOSITO COMPLEJO

SUSTANCIA	POR CIENTO EN PESO
Ba ₃ (PO ₄) ₂	23
CaSO ₄	13
Al ₂ O ₃	12
Ca ₃ (PO ₄) ₂	9
SiO ₂	9
Fe ₃ O ₄	8
Mg ₃ (PO ₄) ₂	4
ZnO	4
Na ₂ O ^a	2
MgO ^a	2
Cu	2
Materia Orgánica	9

a = posiblemente existiendo como compuestos complejos

El tipo de análisis anterior da una idea de la presencia de sales que contaminan a el agua de una fuente externa o de productos de corrosión y abrasión, -

no propiamente depositados por el agua.

Para poder realizar una identificación apropiada de las incrustaciones son necesarios los siguientes - análisis:

Análisis del Agua de Alimentación en el equipo.

Estudios Cristalográficos de los compuestos - formados.

Con la información obtenida es posible indicar la forma de controlar la formación de incrustación.

Las incrustaciones de silicatos constituyen - un verdadero problema, y su control y eliminación frecuentemente difícil. Poca información técnica se tiene respecto al comportamiento de las sales de silicio en agua en condiciones de temperatura y presión elevadas.

Se supone que cuando el SiO₂ se deposita como incrustación, es en forma de silicato de calcio o de magnesio, lo cual es aún dudoso.

Cuando no es posible identificar una incrusta

ción por un solo método, hay necesidad de emplear otros.

Los métodos mas usuales en la identificación de incrustaciones son:

ANALISIS PETROGRAFICO

ANALISIS POR DIFRACCION DE RAYOS X

Por medio del análisis petrográfico se realiza un estudio sistemático de las piedras.

La identificación de las incrustaciones por este procedimiento consiste en someter el mineral a la observación por medio del microscopio petrográfico o por el método de inmersión.

En el análisis petrográfico, el mineral en forma de hojas delgadas es observado con el microscopio determinando el tipo de estructura cristalina que lo identifica. Solamente se tiene datos de estructuras cristalinas de los sulfatos, carbonatos e hidróxidos de calcio y magnesio, y pocos datos de estructuras cristalinas de incrustaciones complejas que se presentan en las calderas.

El método analítico de inmersión consiste en el polvo mineral en un medio líquido de índice de refracción conocido y determinar la constante óptica del material. Larsen preparó unas tablas, en las cuales para cada material existía una determinada constante óptica que la identifica.

La identificación de incrustación por rayos X, ha sido empleada por muchos años. El tipo de aparato que se utiliza consiste de una fuente altamente estabilizada de rayos X de baja energía, cuenta además con un dispositivo receptor de muestras para el análisis, y de un detector de rayos X para medir y registrar la radiación difractada. La muestra se utiliza generalmente en forma de polvo.

Este polvo es comprimido en una pequeña charola porta muestras y colocada en el instrumento de análisis.

Quando la muestra de incrustación se coloca correctamente en el haz de rayos X, esta difracta los rayos en determinados ángulos los cuales son característicos para cada material.

Cada material tiene un patrón de difracción de rayos X, lo cual permite identificarlo, al mismo tiempo no solamente es posible hacer el análisis cualitativo del material sino también el cuantitativo. Existen tres formas de efectuar comparaciones entre los patrones de difracción de rayos X de una sustancia de referencia y la desconocida:

Por medio de la fotografía.

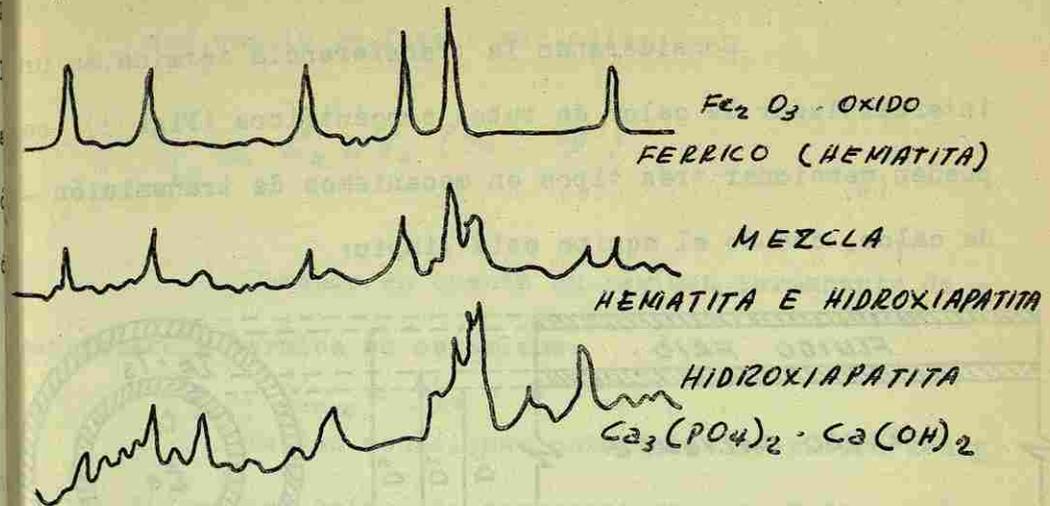
Exploración mecánica del patrón.

Fluorescencia de rayos X.

En el procedimiento de fotografía, a los rayos X difractados por la muestra se hacen incidir en una película, obteniéndose con ello el patrón de difracción de la sustancia analizada. Luego lo único por hacer es el de comparar patrones de difracción entre sustancias conocidas y las desconocidas.

En el método de exploración mecánica de patrones, el equipo contiene un detector y un registrador que dibuja la variación de la intensidad energética de los rayos difractados en diferentes ángulos del campo investigado, así se muestra en la figura 2.

65 55 45 35 25
ANGULO DE EXPLORACION EN GRADOS



REGISTRO TIPICO DE CURVAS PRODUCIDAS POR EXPLORACION POR METODO DE RAYOS X

En este caso la identificación se realiza por comparación de las curvas características de sustancias conocidas con la desconocida.

La técnica de fluorescencia de rayos X solamente sirva para identificar aquellos elementos con números atómicos del 22 al 92.

La explicación detallada de estas técnicas de identificación no se realizó en este tema por quedar fuera del objetivo del trabajo.

Considerando la transferencia térmica en un intercambiador de calor de tubos concéntricos (Fig. 3), se pueden mencionar tres tipos en mecanismos de transmisión de calor, cuando el equipo está limpio:

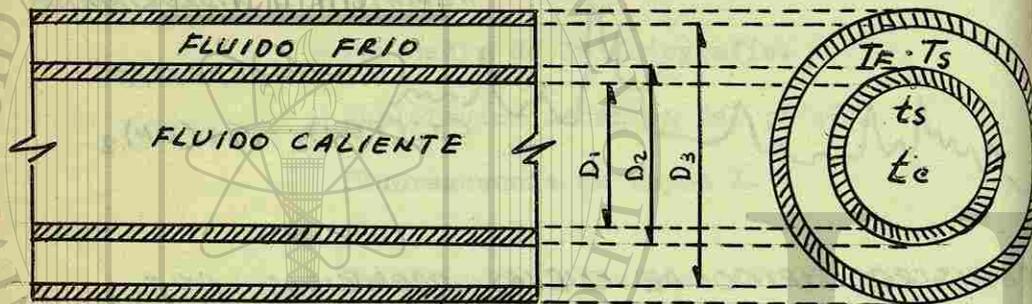


Figura No. 3 Sección Longitudinal de un Cambiador de Calor de Tubos Concéntricos.

- 1.- Convección para fluidos viajando dentro de tubos con cambio de fase o sin ella: Ecuación de Newton.

$$q_i = h_i A_i (t_c - t_s) \quad (A)$$

- 2.- Conducción a través del material de la pared del tubo.

$$q_{COND} = \frac{k_m d A_m \log (t_s - T_s)}{X} \quad (B)$$

- 3.- Convección para fluidos viajando fuera de tubos con cambio de fase o sin ella.

$$q_2 = h_2 d A_2 (T_s - T_f) \quad (C)$$

Tomando en cuenta un régimen permanente de transferencia térmica se establece:

$$q_1 = q_{COND} = q_2 = q$$

De las ecuaciones anteriores se pueden despejar las diferentes caídas de temperatura que operan en la transferencia térmica.

De la ecuación A:

$$t_c - t_s = q \left(\frac{1}{h_i d A_i} \right)$$

De la ecuación B:

$$t_s - T_s = q \left(\frac{X}{k_m d A_m \log} \right)$$

De la ecuación C:

$$T_s - T_f = q \left(\frac{1}{h_2 d A_2} \right) \quad (R)$$

Si se suman las deltas T de las ecuaciones A, B, C, se tendrá la siguiente ecuación:

$$t_c - T_f = q \left[\frac{1}{h_i d A_i} + \frac{X}{k_m d A_m \log} + \frac{1}{h_2 d A_2} \right] \quad (D)$$

De la anterior ecuación se despeja la velocidad de transferencia térmica en el equipo:

$$q = \frac{t_c - t_f}{\frac{1}{h_1 d A_1} + \frac{x}{k_m d A_m \log} + \frac{1}{h_2 d A_2}}$$

La anterior ecuación corresponde a un modo de flujo, es decir cumple con la condición de que todo flujo de energía es igual al cociente entre un potencial guiado y una resistencia. Se deduce que:

$$\begin{aligned} \text{Flujo Calorífico} &= q \\ \text{Potencial Térmico} &= t_c - t_f = \Delta T \end{aligned}$$

$$\text{Resistencia Térmica total} = \frac{1}{h_1 d A_1} + \frac{x}{k_m d A_m \log} + \frac{1}{h_2 d A_2}$$

Considerando que:

Resistencia total = Suma de las resistencias

parciales. Se deduce de la anterior ecuación, tres tipos de resistencia térmica:

$$\begin{aligned} (R_1) &= \frac{1}{h_1 d A_1} = \\ R_{\text{COND}} &= \frac{x}{k_m d A_m \log} = \text{Resistencia térmica a la conducción.} \end{aligned}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_2 d A_2} = \text{Resistencia térmica a la convección para fluidos viajando fuera de tubos.}$$

abiendo que U es una conductancia térmica global, esta será igual a la inversa de la suma de las resistencias térmicas:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_{\text{cond}} + R_2} \quad (F)$$

Por lo tanto, en un equipo de transferencia térmica limpio cuando menos hay tres resistencias. Pero cuando los fluidos en operación han logrado ensuciar e incrustar las superficies del equipo, se generan nuevas resistencias térmicas ocasionadas por las costras de incrustación deposi-

tadas tanto en las superficies internas y externas de los tubos. Se deduce que la resistencia térmica global, en el equipo su-

Luego el valor de U se verá disminuido y por lo tanto la velocidad de transferencia térmica también.

El nuevo valor de U será:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_{i1} + R_{cond.} + R_{i2} + R_2} \quad (G)$$

Los valores de las resistencias térmicas para describir el fenómeno de ensuciamiento de los tubos de evaporador, partiendo de la consideración de que el espesor de la incrustación era proporcional al calor total trans-

$$R_{i1} = \frac{1}{f_1 da_1}$$

$$R_{i2} = \frac{1}{f_2 da_2}$$

$$q = \frac{A \Delta T}{\frac{1}{U}} \quad (H)$$

Se deduce que la resistencia térmica global, en el equipo su-

$$\frac{1}{U} = R_1 + R_{i1} + R_{cond.} + R_{i2} + R_2 \quad (I)$$

McCabe 12, presentó uno de los primeros estudios para relacionar el coeficiente global de transmisión de calor, con el tiempo, la ecuación de McCabe fué desarrollada para describir el fenómeno de ensuciamiento de los tubos de evaporador, partiendo de la consideración de que el espesor de la incrustación era proporcional al calor total transferido.

La ecuación de McCabe es:

$$\frac{1}{U} = b + a \theta \quad (J)$$

$\left. \begin{matrix} a \\ b \end{matrix} \right\} = \text{constantes.}$

Conjuntamente con McAdams, Sieder sugiere el uso de un coeficiente de ensuciamiento ó incrustación el cual es escogido suficientemente grande, tomando en cuenta la probable resistencia térmica de la incrustación que se generará durante la vida útil del equipo. No se tendió poner este coeficiente de incrustación en función del tiempo.

Kern 10, ha aproximado el problema considerando que el espesor de la incrustación aumenta a un valor finito asintoticamente y en una forma exponencial y, la ecuación resultante es:

$$\left(\frac{1}{U}\right)_{FINAL} = \left(\frac{1}{U}\right)_{INICIAL} + R^* (1 - e^{-B\theta}) \quad (K)$$

El mecanismo propuesto por Kern es que la velocidad de depositación de la incrustación es razonablemente constante.

Al mismo tiempo que el espesor de la incrustación aumenta, parte de ella va siendo removida o arrastrada por la acción del corte del flujo de fluido sobre la película estacionaria en contacto con la pared del tubo.

Eventualmente la velocidad de remoción de la incrustación iguala la velocidad de depositación, así que la velocidad neta de formación de incrustación (es decir, el espesor de la incrustación ha aumentado a su valor constante). El valor asintótico del espesor de la incrustación sería una función inversa del nivel de turbulencia en el flujo de fluidos, puesto que la turbulencia es uno de los factores más importantes en determinar la velocidad de remoción de la incrustación.

Es por lo tanto, correcto, asegurar que el espesor de la incrustación será menor a mayores velocidades de flujo de fluido.

Luego si la conductividad térmica de la incrustación permanece aproximadamente constante, la resistencia global térmica final:

$$\left(\frac{1}{U}\right)_{FINAL} = \left(\frac{1}{U}\right)_{INICIAL} + m\theta \quad (L)$$

Si la anterior ecuación es aplicable, el coeficiente "m" describe la velocidad de aumento de la

resistencia térmica la cual es directamente proporcional a la velocidad de crecimiento de la incrustación.

Hay que aclarar, que la anterior ecuación da una idea aproximada y concisa de la relación de resistencia térmica global con el tiempo, es necesario comentar la existencia de otros factores que influyen como son la temperatura, pH, composición del fluido etc.

Para describir completamente la velocidad de cambio del coeficiente global de transferencia de calor, se requiere formular una ecuación que incluya todas las variables que afectan la incrustación y la corrosión, y no solamente la variable tiempo.

Se concluye que la presencia de incrustaciones en equipo de transferencia térmica ocasiona una disminución de la eficiencia de transmisión de calor y de la capacidad de flujo de fluidos.

Para lograr mantener un flujo de calor constante en equipo incrustado, es necesario incrementar el potencial térmico, pudiendo ser éste el origen de los sobrecalentamientos ocasionados en determinados puntos del equipo produciendo fracturas del material.

N O M E N C L A T U R A

- A = Area de Transferencia de Calor (piés²)
- $d A_{mlog}$ = Diferencial del área media logarítmica (piés²)
- $d A_1$ = Diferencial del Area de Transferencia Térmica - de la Superficie Interna del Tubo Interior - (piés²).
- $d A_2$ = Diferencial del Area de Transferencia Térmica de la Superficie Externa de Tubo Interior - (piés²).
- a = Un Exponente
- B = Una Constante
- c = Una Constante
- c' = A Concentración de Suciedad en Consistencia con K_1
-
- D_1 = Diámetro Interno del Tubo Interior (pulgadas)
- D_2 = Diámetro Externo del Tubo Interior (pulgadas)
- D_3 = Diámetro Interior del Tubo Exterior (pulgadas)
- f = Factor de Fricción (Adimensional)

- f_1 = Coeficiente de Ensuciamiento e Incrustación para fluidos Viajando dentro de Tubos (BTU/hora-pié²)
 f_2 = Coeficiente de Ensuciamiento de Incrustación para fluidos Viajando fuera de Tubos (BTU/hora-pié²)
 g = Constante Gravitacional (piés/horas²)
 h_1 = Coeficiente fílmico a la convección forzada para fluidos viajando dentro de tubos (BTU/hora-pié²)
 h_2 = Coeficiente fílmico a la convección forzada para fluidos viajando fuera de tubos (BTU/hora-pié²)
 k_m = Conductividad térmica del material (BTU/hora-pié)
 K_1, K_2 = Constantes
 K_f = Constante de Blasius
 L = Longitud del Tubo (piés)

dL = Diferencial de Longitud

M, N = Términos de Sustitución

q = Velocidad de Flujo de Calor (BTU/hora)

q_1 = Velocidad de Transferencia Térmica por Convección para fluidos viajando dentro de tubos (BTU/hora)

q_{cond} = Velocidad de Transferencia Térmica por conducción a través de una pared (BTU/hora).

q_2 = Velocidad de Transferencia Térmica a la Convección para fluidos viajando fuera de tubos - (BTU/hora).

ΔP = Caída de Presión (Libras/pié²)

$\Delta P_1^* \Delta P_2^*$ = Valores Comparativos de las Caídas de Presión (Libras/piés²).

R = Resistencia de la Suciedad transitoria -
 $\frac{(\text{Hora-pié}^2 \text{-}^\circ\text{F})}{\text{BTU}}$

t_c = Temperatura promedio del fluido caliente (°F)

t_s = Temperatura Promedio de la superficie interna del tubo interior (°F)

T_s = Temperatura promedio de la superficie externa del tubo interior (°F)

T_f = Temperatura promedio del fluido frío (°F)

ΔT = Diferencia de Temperatura (°F)

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor - (BTU/hr-pié²F).

V = Velocidad (piés/hora)
W = Gasto en Masa Constante (Libras/hora)
 x_1^*, x_2^* = Valores Comparativos del espesor de la película de Suciedad e incrustación.

X = Espesor de la pared del tubo (pulgadas)

θ = Tiempo

μ = Viscosidad (Libras/pié-hora)

ρ = Densidad (Libras/pié³)

τ = Esfuerzo al Corte (Libras/pié²)

Subíndices.-

0 = Tiempo 0

θ = Tiempo Finito

Exponente.-

* Característica de la Asíntota.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Badger Walter R. and Banchoero Julius T.
"Introduction to Chemical Engineering"
P. 117-127. McGraw-Hill Book Company, Kogakusha (1965).
- 2.- Brown George G. y Asociados "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química". Editorial Marín, S. A. p.- 437-481 (1963).
- 3.- Clarke, F.E. and Hopkins, Robert D.
"Significance of Boiler Deposit Analysis", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46 No. 5, P. 979-982, (1954).
- 4.- Dewrance, John, "Corrosión of Boilers", Power Journal, Mar. 29, (1921) p. 525.
- 5.- de Schulten, A. "Sur la Reproduction de l'analcime, Bull, Soc. Franc. Mineral 5:7 (1882).
- 6.- Doelter, C. IV Minerogenese und Stabilitatsfelder der Minerale die Analcimbildung, Mineralog. U. Petrog, Mitt, 25: 111 (1906)

V = Velocidad (piés/hora)
W = Gasto en Masa Constante (Libras/hora)
 x_1^*, x_2^* = Valores Comparativos del espesor de la película de Suciedad e incrustación.

X = Espesor de la pared del tubo (pulgadas)

θ = Tiempo

μ = Viscosidad (Libras/pié-hora)

ρ = Densidad (Libras/pié³)

τ = Esfuerzo al Corte (Libras/pié²)

Subíndices.-

0 = Tiempo 0

θ = Tiempo Finito

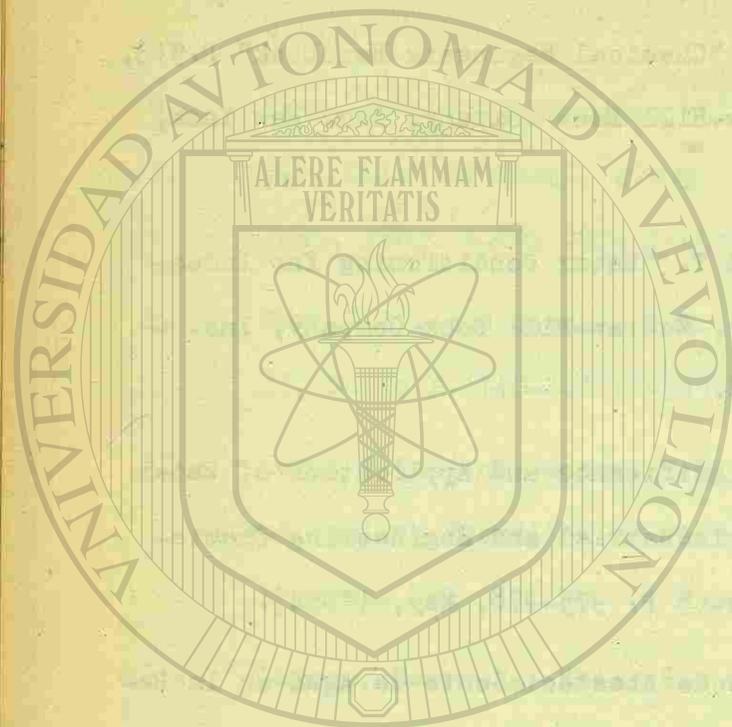
Exponente.-

* Característica de la Asíntota.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Badger Walter R. and Banchoero Julius T.
"Introduction to Chemical Engineering"
P. 117-127. McGraw-Hill Book Company, Kogakusha (1965).
- 2.- Brown George G. y Asociados "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química". Editorial Marín, S. A. p.- 437-481 (1963).
- 3.- Clarke, F.E. and Hopkins, Robert D.
"Significance of Boiler Deposit Analysis", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46 No. 5, P. 979-982, (1954).
- 4.- Dewrance, John, "Corrosión of Boilers", Power Journal, Mar. 29, (1921) p. 525.
- 5.- de Schulten, A. "Sur la Reproduction de l'analcime, Bull, Soc. Franc. Mineral 5:7 (1882).
- 6.- Doelter, C. IV Minerogenese und Stabilitatsfelder der Minerale die Analcimbildung, Mineralog. U. Petrog, Mitt, 25: 111 (1906)

- 7.- Hall, R.E. and others. "A Physico-Chemical Study of Scale Formation and Boiler Water Conditioning", Bull. 24, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, U.S.A. (1927).
- 8.- Katz, D.L., J.G. Knudsen, G. Baelkjian and S.S. Grover, Univ. of Mich., U.S.A. Engineering Research, Inst. Proj. M-592 July (1953).
- 9.- Kern D.Q., and Seaton, R.E., Petroleum Refiner, Vol. 37, No. 6 P. 140-141 (1958).
- 10.- Kern, D.Q., and Seaton, R.E. "A Theoretical Analysis of Fouling Formation in Thermal Surface", Chem. Eng. Progress Vol. 55, No. 71 June (1959).
- 11.- Larsen, Esper S., "Microscopic Determination of Non-Opaque Minerals", U.S. Geol. Survey Bull, 679, (1924).
- 12.- McCabe, W.L. and Robinson C.S., Industrial and Engineering Chemistry, No. 16, P. 478 (1924).
- 13.- Nordel Eskel, "Tratamiento de Agua para la Industria y otros Usos", P. 63-106, Compañía Editorial Continental, S. A. México, D. F. (1965).
- 14.- Partridge, E.P. "Formation and Properties of Boiler Scale, Univ. of Mich. U.S.A. Eng. Research, Bull, - No. 15 June (1930).
- 15.- Perry, John H., "Chemical Engineers Handbook" P.513, Third Ed. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, (1950).
- 16.- Powell, Sheppard T. "Water Conditioning for Industry", P. 412-426, McGraw-Hill Book Company, Inc. - New York, (1954).
- 17.- Ulmer, R.C., "Significance and Application of Water Analysis Data", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46, No. 5 P. 975-978, May, (1954).
- 18.- Datos de Fuentes de Abastecimiento de Agua en la Región Noreste del País. Escuela de Salud Pública. Facultad de Ingeniería Civil, U.N.L. (1965).
- 19.- Sieder, E. N. Oil and Gas Journal, 31, 104 (1934).



UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESCUELA DE GRADUADOS

CURSO INTENSIVO SOBRE:
CORROSION E INCRUSTACION EN TUBERIAS

TEMA

REMOCION DE SALES MINERALES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

ING. TEODORO RODRIGUEZ ACOSTA

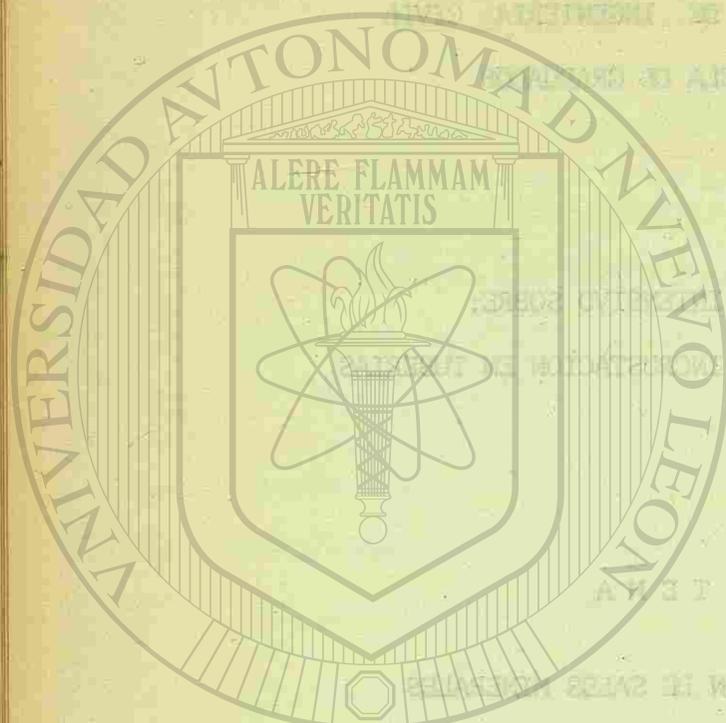


COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ABRIL DE 1967

MONTERREY, MEXICO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

C O N T E N I D O

TRATAMIENTO DE AGUA CON EL CAL EN FRIO

- Finalidad
- Equipo
- Descripción del proceso
- Reacciones químicas
- Coagulantes

TRATAMIENTO DE AGUA CON CAL SODA EN CALIENTE

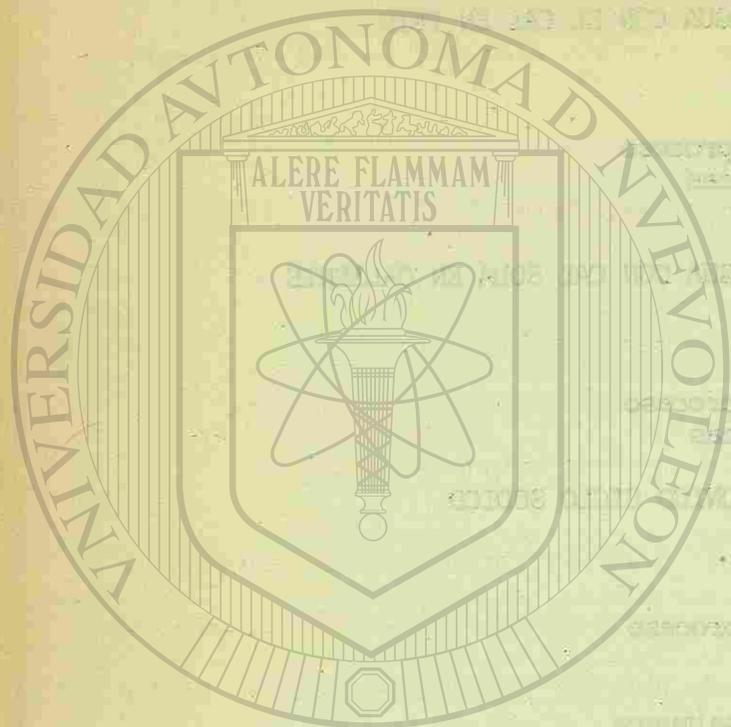
- Finalidad
- Equipo
- Descripción del proceso
- Reacciones químicas

INTERCAMBIO CATIONICO CICLO SODICO

- Finalidad
- Equipo
- Descripción del proceso
- Regeneración
- Retrolavado
- Introducción de salmuera
- Enjuagado lento
- Enjuagado rápido
- Servicio
- Reacciones químicas

INTERCAMBIO CATIONICO CICLO DE HIDROGENO

- Finalidad
- Equipo
- Descripción del proceso
- Regeneración
- Reacciones químicas



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TRATAMIENTO DE AGUA CON CAL EN FRIO

Para determinar la clase de tratamiento que se debe dar a una agua es preciso disponer de los siguientes datos:

- a) Análisis físico-químico completo.
- b) Análisis bacteriológico.
- c) Origen del agua (pozo, lago, río, etc.)
- d) Fines a que se va a destinar el agua tratada.
- e) Análisis económico de los tratamientos posibles.

El análisis físico-químico es fundamental -- puesto que partiendo de él se deberán elegir los tratamien-- tos más adecuados y económicos que proporcionen la calidad -- requerida del agua.

El análisis bacteriológico también es de mu-- cha importancia sobre todo cuando el agua va a utilizarse pa-- ra fines domésticos.

El origen del agua sirve como guía para pre-- ver los problemas que puedan afectar al tratamiento, entre -- los que se pueden citar: las arenas, lodos, materia orgánica,

gases corrosivos, contaminaciones bacteriológicas ó con aguas salobres, etc.

Los fines para que se va a destinar el agua imponen desde el principio una cierta calidad que deberá satisfacer el tratamiento y casi siempre a la larga resulta ventajoso obtener la máxima calidad, aunque el costo del tratamiento no sea el más económico ya que los problemas que evita compensa con creces dicho costo.

El análisis económico es el que a final de cuentas determina la clase de tratamiento que debe elegirse pero este análisis lo debe hacer una compañía especializada en tratamientos de agua, ya que es necesario tomar en cuenta los costos indirectos cuya evaluación requiere de amplia experiencia y especialización en la materia.

Los tratamientos que se pueden dar a una agua son muy variados y dependen fundamentalmente de los puntos anotados, pero en esta plática nos limitaremos exclusivamente al tratamiento con cal-soda en frío.

FINALIDAD.

La finalidad del tratamiento de agua con cal-soda en frío es la disminuir las sales incrustantes de calcio y de magnesio, reducir los sólidos totales disueltos, bajar la alcalinidad total y eliminar el bióxido de carbono disuelto.

Todo lo anterior tiene por objeto proteger a los equipos, líneas y sistemas contra la incrustación, los depósitos y la corrosión.

EQUIPO:

El equipo necesario para efectuar el tratamiento con cal-soda en frío consta generalmente de lo siguiente:

- a) Medidor de agua cruda con microswitch de señales.
- b) Contadores de tiempo (Timers).
- c) Tolvas de cal y soda ash.
- d) Dosificadores de cal y soda ash.
- e) Suavizador ó precipitador.
- f) Bombas de transferencia.
- g) Filtros de grava.
- h) Tanques de almacenamiento de agua tratada.

DESCRIPCION DEL PROCESO:

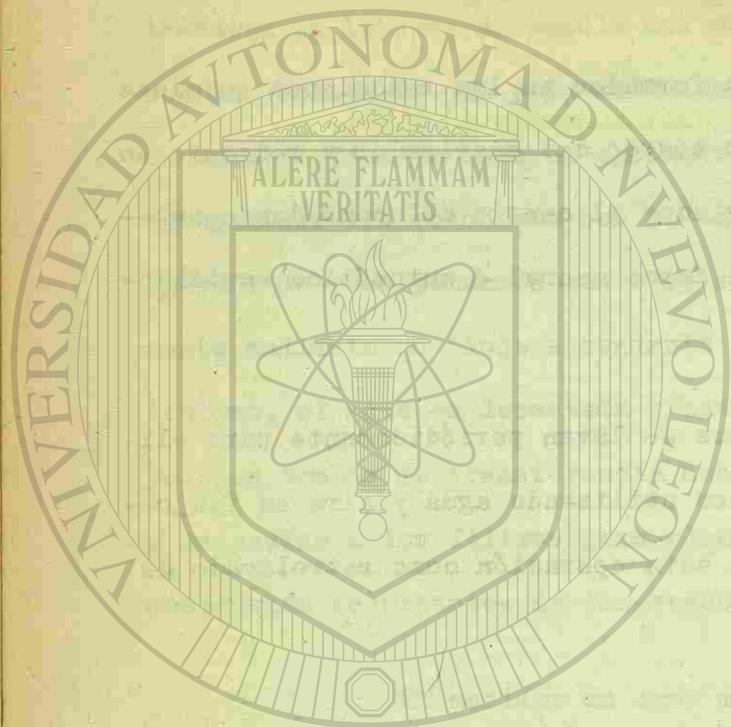
El agua cruda después de pasar por el medidor se descarga en la zona de mezcla del suavizador donde reacciona con la lechada de cal y la solución de soda ash (carbonato de sodio). En esta zona un agitador efectúa la mezcla para homogenizar los reactivos con el agua, pasando la mezcla a la zona de precipitación donde se separan los lodos y finalmente mediante un flujo ascendente donde hay reducción de velocidad, el agua es decantada y enviada a los filtros de arena. Las bombas de transferencia succionan el agua decantada y la envían a los filtros para eliminarle las partículas en suspensión resultantes de las reacciones químicas producidas.

El medidor de agua manda señales a los tiempos de cada vez que pasa determinado número de litros de agua cruda, los cuales cierran sus contactos durante el tiempo que previamente se fije en las carátulas, haciendo funcionar los equipos dosificadores durante este tiempo. De este modo la dosificación de la cal y la soda ash son proporcionales al flujo de agua cruda y los ajustes de tiempo se efectúan solamente cuando cambia la composición química del agua cruda.

La cal se dosifica en forma de lechada y la soda ash en solución acuosa mediante las bombas dosificadoras de operación continua.

Los lodos formados en las reacciones químicas se depositan en el fondo cónico del suavizador y mediante un sistema mecánico son enviados al centro del cono donde se purgan periódicamente en forma manual ó automática enviándose al drenaje.

Los filtros se lavan periódicamente para eliminar los lodos acumulados utilizando agua y aire en flujo ascendente, designándose esta operación como retrolavado de filtros.

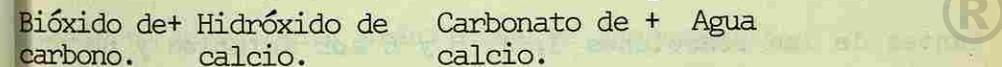
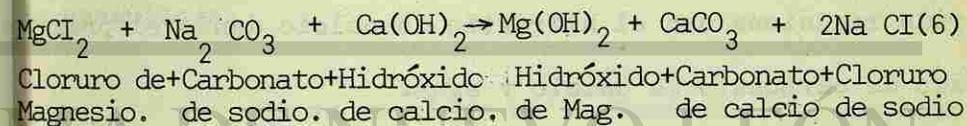
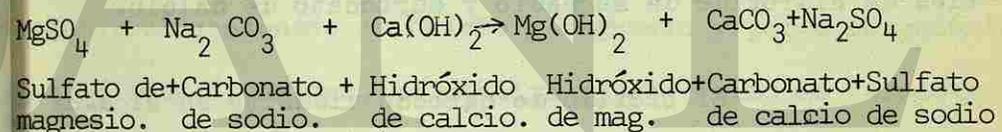
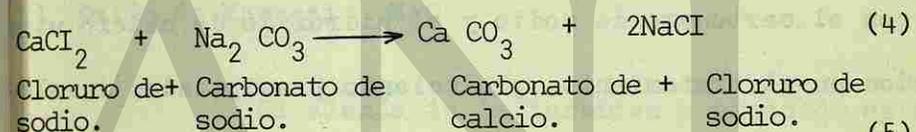
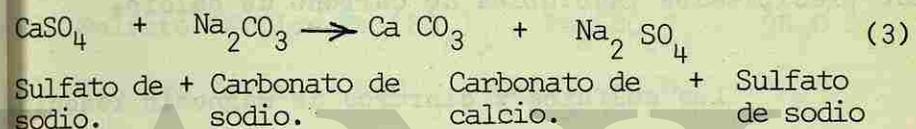
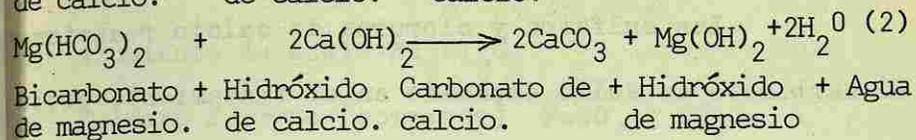
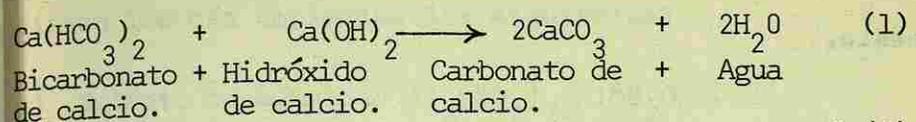


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REACCIONES QUÍMICAS:

Las reacciones químicas que se producen en este tratamiento son las siguientes:



Como se puede apreciar, los bicarbonatos de calcio y de magnesio que contiene el agua cruda, reaccionan con el hidróxido de calcio usado en el tratamiento, dando precipitados insolubles de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio.

Los sulfatos y cloruros de calcio reaccionan con el carbonato de sodio empleado en el tratamiento produciendo precipitados insolubles de carbonato de calcio.

Los sulfatos y cloruros de magnesio reaccionan con el carbonato de sodio y el hidróxido de calcio utilizados en el tratamiento, produciendo precipitados insolubles de hidróxido de magnesio y carbonato de calcio.

El bióxido de carbono disuelto en el agua cruda reacciona con el hidróxido de calcio dando el precipitado de carbonato de calcio y agua.

Los sulfatos y los cloruros de sodio resultantes de las reacciones 3, 4, 5 y 6 son solubles y no producen incrustaciones.

COAGULANTES:

Cuando se desea únicamente reducir la turbidez y el color del agua cruda se utilizan los coagulantes, siendo los más empleados los siguientes:

- a) Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
- b) Aluminato de sodio $Na_2Al_2O_4$
- c) Sulfato ferroso (copperas) $FeSO_4 \cdot 7H_2O$
- d) Sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$, $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$
- e) Cloruro férrico $FeCl_3 \cdot 6H_2O$
- f) Óxido de Magnesio MgO

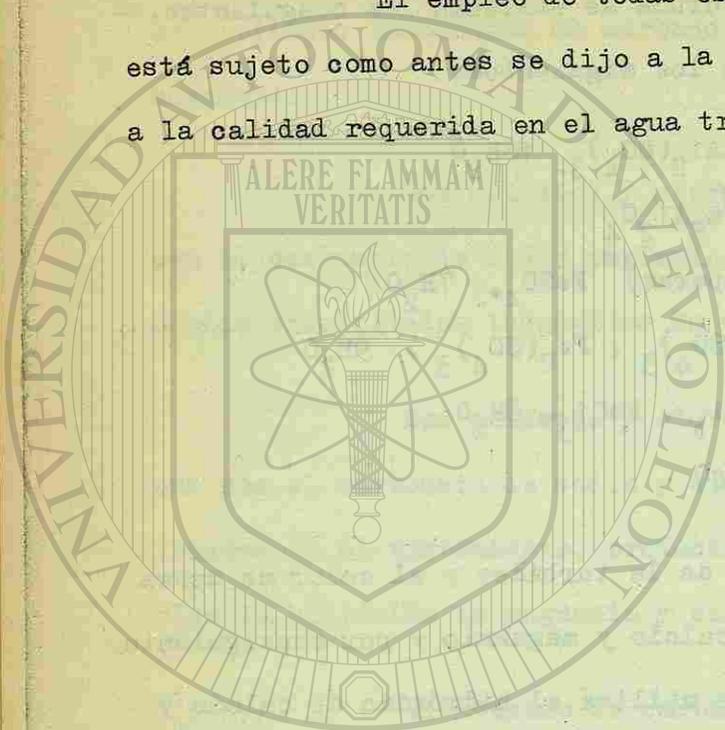
Si además de la turbidez y el color se desea reducir el contenido de calcio y magnesio y por consiguiente los sólidos disueltos, se utiliza el hidróxido de calcio y un coagulante.

Si se requiere un tratamiento más completo entonces se utiliza hidróxido de calcio y carbonato de sodio, siendo el coagulante prácticamente innecesario.

Si se desea además reducir el contenido de sílice se utiliza entonces el óxido de magnesio activado con

el nombre comercial de remosil ó magnesil.

El empleo de todas estas sustancias químicas está sujeto como antes se dijo a la calidad del agua cruda a la calidad requerida en el agua tratada.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL

TRATAMIENTO DE AGUA CON CAL SODA EN CALIENTE:

El tratamiento del agua cruda con cal-soda en caliente se aplica en los siguientes casos:

- a) Cuando se desea tratar grandes cantidades de agua y se dispone de un espacio reducido.
- b) Cuando se dispone de vapor de baja presión.
- c) Cuando se desea reducir la sílice como en las plantas termoeléctricas de vapor.
- d) Cuando se requiere eliminar gases no condensables.

FINALIDAD:

La finalidad del tratamiento de una agua cruda con cal-soda en caliente es la de disminuir el contenido de calcio, magnesio y sílice, reducir los sólidos totales y la alcalinidad total, eliminar el bióxido de carbono disuelto y reducir el contenido de oxígeno disuelto.

Con esto se obtiene una protección para los sistemas que estarán en contacto con el agua, pero generalmente se usa este procedimiento como un pre-tratamiento que debe ser afinado mediante suavizadores, evaporadores, etc.

ya que la calidad obtenida no es suficiente para muchos procesos y operaciones unitarias.

EQUIPO:

El equipo necesario para efectuar este tipo de tratamiento es el siguiente:

- a) Medidor de agua cruda con microswitch de señales.
- b) Contadores de tiempo (Timers).
- c) Tanques de cal y soda ash con agitación mecánica.
- d) Bombas dosificadoras de cal y soda ash.
- e) Tanque de reacciones.
- f) Bombas de transferencia.
- g) Filtros de antracita.

DESCRIPCION DEL PROCESO:

El agua cruda después de pasar por el medidor llega al condensador de ventila (Vent Condenser) en donde se hace un calentamiento inicial y después es rociada mediante espumas en el seno del vapor de calentamiento con lo que se evita un aumento brusco de temperatura y los gases no condensables principalmente oxígeno y bióxido de carbono se desprecipitan,

pasan por el condensador de ventila y escapan a la atmósfera. Estos gases que son muy corrosivos se eliminan en su mayor parte, sufriendo el agua mediante este procedimiento una desaereación que deja un oxígeno residual de aproximadamente 0.3 c.c./Lt.

El vapor de agua se condensa en el condensador de ventila por efecto del agua fría que entra y retorna al seno del líquido donde se efectúa la mezcla del agua desaerada y caliente con la lechada de cal, el carbonato de sodio y el coagulante que en este caso es óxido de magnesio cuya acción además de favorecer la formación de flóculos o precipitados elimina la sílice. El óxido de magnesio se dosifica junto con el carbonato de sodio pero puede hacerse también por separado.

Cada vez que pasa determinado número de litros de agua cruda por el medidor de acuerdo con el diseño del equipo, el microswitch manda una señal a los contadores de tiempo, los cuales cierran sus contactos durante el tiempo que se haya fijado en sus carátulas y arrancan los dosificadores de sustancias químicas, de modo que la dosificación resulta automática.

Los lodos formados en el tanque de reacciones se eliminan periódicamente en forma manual o automática. Si se desea aumentar la eficiencia del equipo, parte de los lodos se pueden recircular a la zona de mezcla, obteniéndose de este modo una mayor calidad del agua tratada y un ahorro en sustancias químicas. El nivel de lodos se conoce mediante válvulas muestreadoras colocadas a diferentes alturas en el tanque.

Existen varios tipos de equipos para tratamiento de agua con cal en caliente, pero los más efectivos son los que aprovechan el colchón de lodos formado para filtrar el agua tratada a través de él en un flujo ascendente con disminución de velocidad.

El agua al salir del tanque de reacciones se envía mediante bombas de transferencia a los filtros de arena para eliminar las partículas finas procedentes de las reacciones de precipitación. Los filtros deben ser de arena ya que el agua caliente disuelve la sílice si se usa como medio filtrante.

La temperatura del agua en el tanque de reacciones

debe estar entre 70 y 80°C y la presión debe ser de 3-4 lb/pulg.² aproximadamente. Esto se consigue mediante una válvula reguladora de presión del vapor de calentamiento -- ubicada a la entrada del tanque de reacciones.

La calidad del agua obtenida debe estar de acuerdo con los siguientes valores:

Alcalinidad a la fenolftaleína	15 - 30 ppm. como CaCO ₃
Alcalinidad al anaranjado de metilo	40 - 55 ppm. como CaCO ₃
Dureza total	20 - 55 ppm. como CaCO ₃
Potencial hidrógeno pH	8.5 - 9.5

REACCIONES QUÍMICAS:

Las reacciones químicas que se efectúan son las mismas que en el proceso de cal-soda en frío, sólo que en este caso las reacciones son casi instantáneas, de modo que los equipos se diseñan para que la permanencia del agua en el tanque de reacciones sea de una hora o menos.

La eliminación de la sílice se efectúa por adsorción mediante el hidróxido de magnesio formado en las reacciones o el obtenido al hidrolizarse el óxido de magne-

sio añadido al tratamiento. En este tratamiento el único regulante que se utiliza si es necesario, es el óxido de magnesio, ya que la temperatura es un factor que favorece la precipitación.

En algunos casos cuando la dureza del agua está constituida casi exclusivamente por bicarbonatos siendo muy pequeña de dureza no carbonato, se puede prescindir de la soda ash; dosificando un exceso de cal, con lo cual se abate el costo del tratamiento.

INTERCAMBIO CATIONICO CICLO SODICO:

Para ciertos procesos en los que se requiere la disminución de la dureza del agua, se utilizan resinas sintéticas regenerables con cloruro de sodio o sal común, denominadas zeolitas.

En rigor el nombre de zeolitas corresponde a ciertos minerales que se encuentran en la naturaleza, pero el nombre se ha generalizado y actualmente se aplica también a los intercambiadores iónicos sintéticos.

Atendiendo a su origen las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas y orgánicas ó inorgánicas. Entre las inorgánicas podemos mencionar a las glauconitas y a los geles silicosos sintéticos. Entre las zeolitas orgánicas se cuentan las derivadas de productos naturales como carbón mineral, lignina, turba y algunos minerales orgánicos naturales complejos, todos los cuales se tratan con el ácido sulfúrico, para obtener zeolitas.

Las zeolitas orgánicas sintéticas más comunes son las de fenolformaldehido sulfonado, las poliestirénicas

sio añadido al tratamiento. En este tratamiento el único regulante que se utiliza si es necesario, es el óxido de magnesio, ya que la temperatura es un factor que favorece la precipitación.

En algunos casos cuando la dureza del agua está constituida casi exclusivamente por bicarbonatos siendo muy pequeña de dureza no carbonato, se puede prescindir de la soda ash; dosificando un exceso de cal, con lo cual se abate el costo del tratamiento.

INTERCAMBIO CATIONICO CICLO SODICO:

Para ciertos procesos en los que se requiere la disminución de la dureza del agua, se utilizan resinas sintéticas regenerables con cloruro de sodio o sal común, denominadas zeolitas.

En rigor el nombre de zeolitas corresponde a ciertos minerales que se encuentran en la naturaleza, pero el nombre se ha generalizado y actualmente se aplica también a los intercambiadores iónicos sintéticos.

Atendiendo a su origen las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas y orgánicas ó inorgánicas. Entre las inorgánicas podemos mencionar a las glauconitas y a los geles silicosos sintéticos. Entre las zeolitas orgánicas se cuentan las derivadas de productos naturales como carbón mineral, lignina, turba y algunos minerales orgánicos naturales complejos, todos los cuales se tratan con el ácido sulfúrico, para obtener zeolitas.

Las zeolitas orgánicas sintéticas más comunes son las de fenolformaldehido sulfonado, las poliestirénicas

sulfonadas y las acrílicas.

En general las resinas sintéticas son más resistentes al desgaste, cambios de temperatura, acción química, etc. que las resinas naturales aunque su capacidad de intercambio es casi siempre menor.

FINALIDAD:

La finalidad del tratamiento de una agua con zeolitas catiónicas en el ciclo sódico es la de intercambiar los iones que producen dureza, principalmente calcio y magnesio por sodio, disminuyendo de este modo la dureza del agua pero sin reducir el contenido de sólidos disueltos. Con este se obtiene una protección contra incrustaciones de los equipos en ciertos procesos, pero generalmente se requiere otro tratamiento de afinación como evaporación o tratamiento interno si se trata de calderas y tratamiento con cromatos en los circuitos cerrados si se trata de máquinas diesel.

EQUIPO:

El equipo necesario para efectuar el intercambio catiónico, más conocido como suavización por zeolitas

consiste de lo siguiente:

- a) Medidor de agua cruda.
- b) Suavizador de resina catiónica en ciclo sódico.
- c) Tanque de disolución de sal.
- d) Tanque de salmuera saturada.
- e) Bomba de operación.
- f) Válvulas, líneas y accesorios.
- g) Tanque de almacenamiento de agua suavizada.

DESCRIPCION DEL PROCESO:

El agua cruda después de pasar por el medidor entra al suavizador por la parte superior y atraviesa el lecho de resina en donde el ion sodio de la resina, desplaza a los cationes que tengan dos ó más valencias, tales como calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), Hierro (Fe^{+++}), Aluminio (Al^{+++}), etc., sufriendo además una filtración que elimina partículas en suspensión. Cuando la resina ha cedido la mayor parte de sus iones sodio y los que le quedan no son suficientes para dar una calidad uniforme del agua suavizada, se dice que la resina está agotada. Esto se comprueba haciendo una prueba con solución de jabón para agua suavizada o bien un análisis

de dureza por el método del versenato de sodio (que da resultados más exactos) al agua efluente del suavizador. Si la dureza total es superior a 2-10 ppm. se da por agotada la resina y se procede a su regeneración.

REGENERACION:

El proceso de regeneración de la resina se efectúa mediante varios pasos cuya finalidad se describe a continuación:

RETROLAVADO:

Como su nombre lo indica, el retrolavado consiste en la introducción de agua en sentido opuesto al de operación o sea por la parte inferior del suavizador a un flujo establecido por el fabricante del equipo y relacionado con la clase de resina y el área transversal interior del suavizador. El retrolavado tiene las siguientes finalidades:

- a) Eliminar las partículas retenidas en la superficie de la resina durante el tiempo de operación del suavizador.
- b) Aflojar o despelmazar la resina, la cual sufre una cierta compactación cuando el suavizador está en operación

originada por la presión del agua cruda sobre la superficie del lecho de resina.

- c) Eliminar las canalizaciones que disminuyen la eficiencia del suavizador e impiden la correcta regeneración de la resina.

INTRODUCCION DE SALMUERA:

La introducción de salmuera se hace por la parte superior del suavizador y tiene por objeto devolver a la resina su capacidad de intercambiar cationes por iones sodio. La salmuera es una solución saturada de cloruro de sodio o sal común cuya fórmula química es NaCl .

Para que la regeneración sea efectiva es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- a) Que el retrolavado se haya efectuado durante el tiempo especificado (10-15 min.).
- b) Que el flujo de retrolavado haya sido el especificado en el instructivo.
- c) Que la solución de salmuera sea saturada.
- d) Que la concentración de la solución al entrar al suavizador sea la que marca el instructivo.

e) Que el tiempo de introducción de salmuera sea el corre-

ENJUAGADO LENTO:

Al terminar la introducción de salmuera se debe efectuar un enjuagado lento al flujo recomendado por el instructivo de operación y cuya finalidad es la siguiente:

- a) Lavar la línea de salmuera ya que dicha salmuera es corrosiva.
- b) Comenzar el desplazamiento de los iones, calcio, magnesio, etc. y el exceso de salmuera al drenaje.
- c) Proporcionar el tiempo necesario para que las reacciones sean completas.

La duración del enjuagado lento debe ser la indicada en el instructivo para obtener los mejores resultados.

ENJUAGADO RAPIDO:

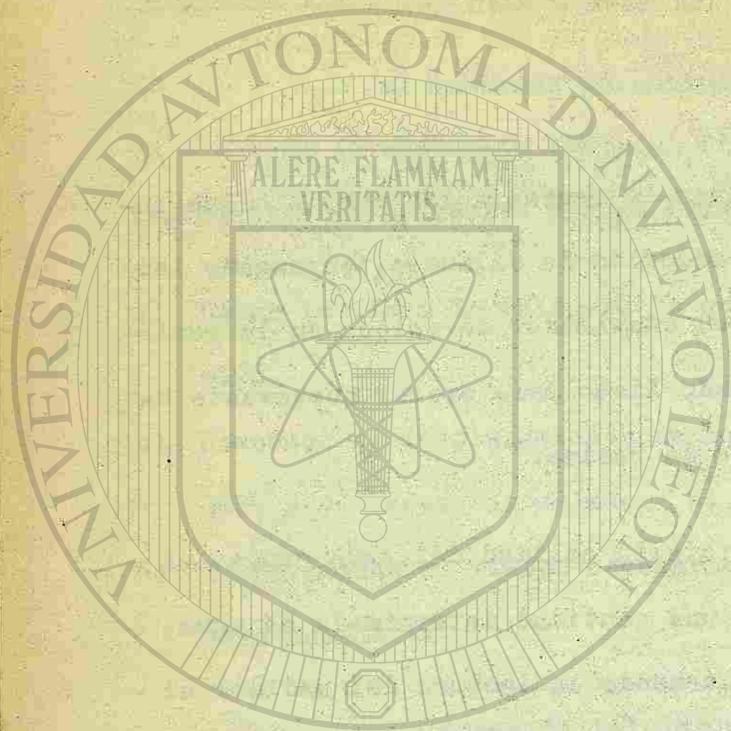
Como su nombre lo indica, el enjuagado rápido hace a un flujo mayor que el enjuagado lento y es casi siempre igual al flujo de operación del suavizador. Su objeto es eliminar los cationes restantes de calcio, magnesio, etc. Así-

la salmuera remanente que no fué desplazada en el enjuagado lento. El enjuagado lento se suspende cuando la dureza del agua al salir de la unidad baja a 2-10 ppm.

SERVICIO:

Al terminar la regeneración completo que incluye retrolavado, introducción de salmuera, enjuagado lento y enjuagado rápido, el suavizador se coloca en la posición de servicio, quedando listo para operar nuevamente hasta que se agote otra vez la resina.

Para una cierta calidad del agua cruda, el suavizador podrá tratar una cantidad determinada de agua, la cual puede conocerse tomando la lectura del medidor al comenzar a operar el equipo, efectuando análisis de dureza cada 1,000 ó 2,000 litros hasta que el contenido de calcio sea superior a 2-10 ppm. y haciendo la diferencia de lecturas del medidor. También puede calcularse conociendo el contenido de calcio y magnesio del agua cruda y la capacidad de la resina.

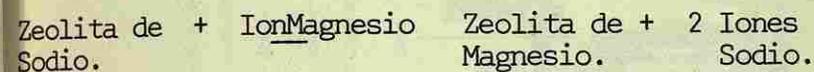
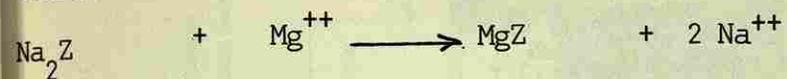


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

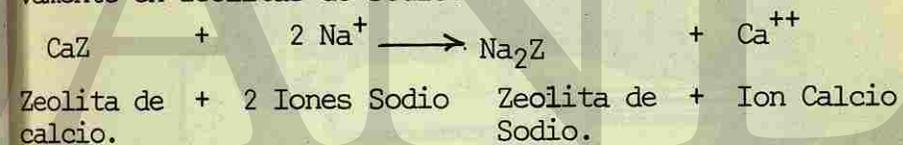
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

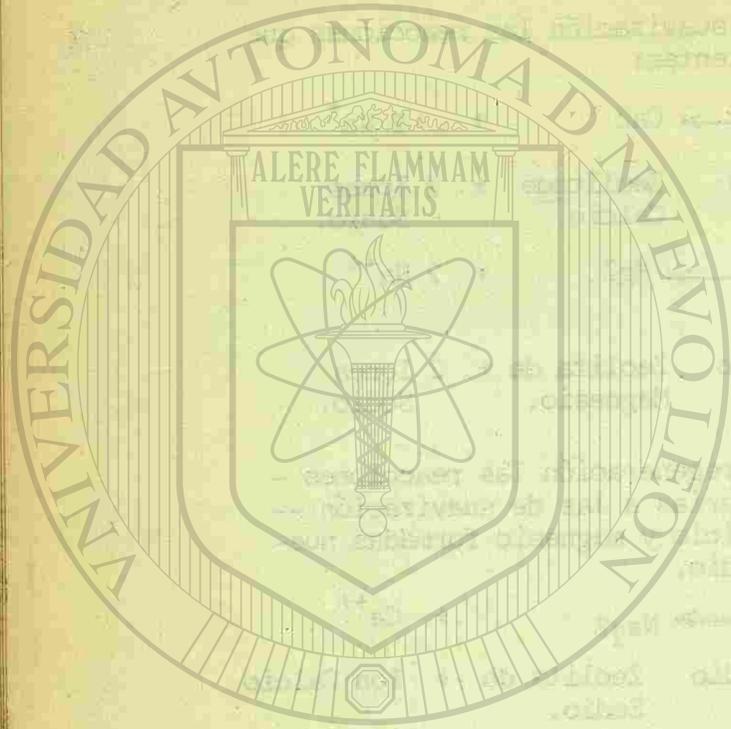
REACCIONES QUÍMICAS:

Durante el proceso de suavización las reacciones que se producen son las siguientes:



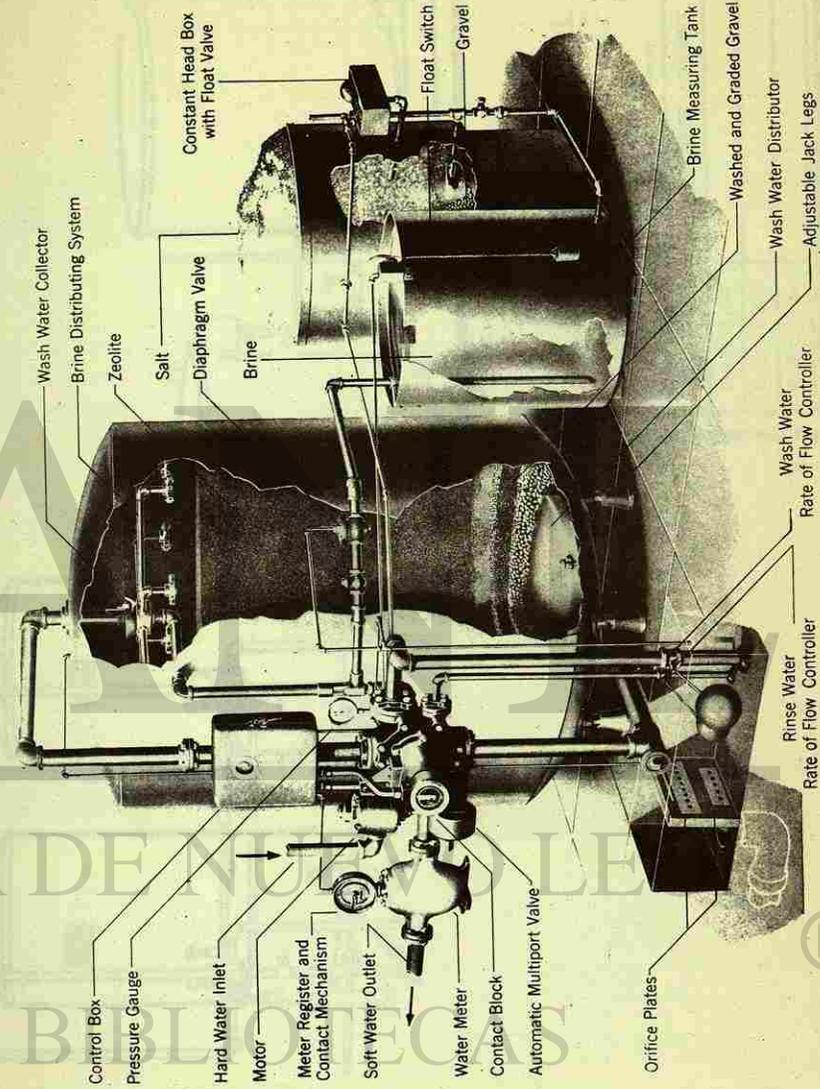
Durante el proceso de regeneración las reacciones -- que se efectúan son contrarias a las de suavización -- ya que las zeolitas de calcio y magnesio formadas nuevamente en zeolitas de sodio.



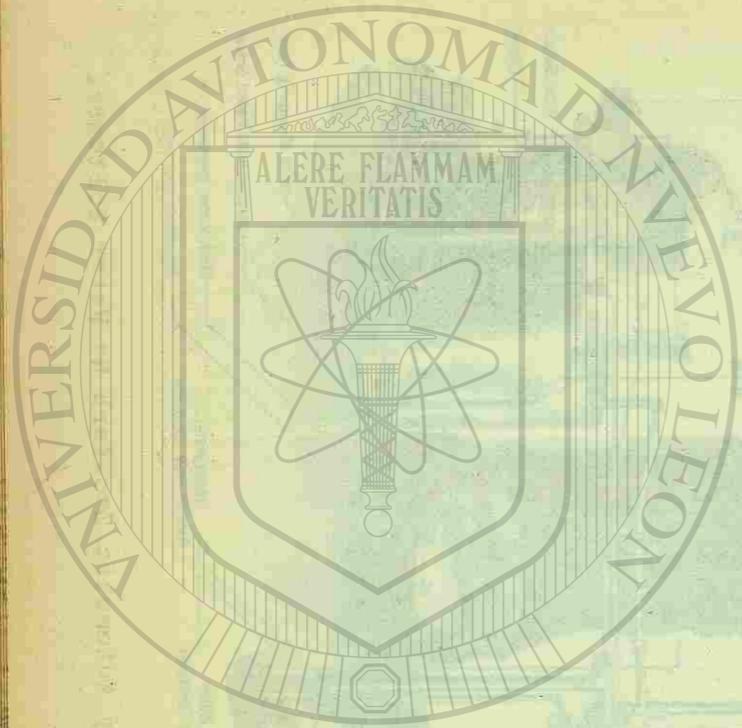


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BLOQUEOS

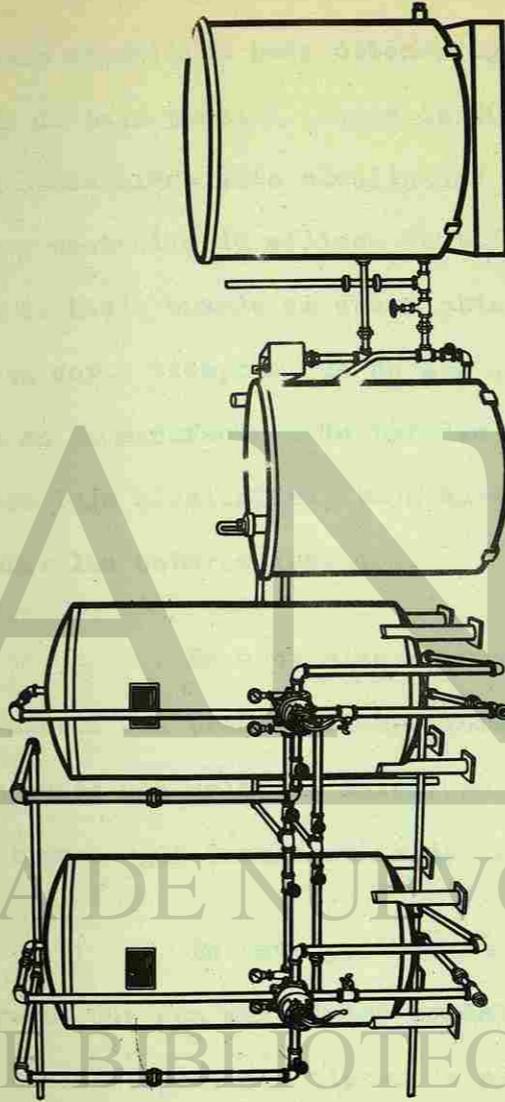


Permutit Fully Automatic Zeo-Karb Na Water Softener.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

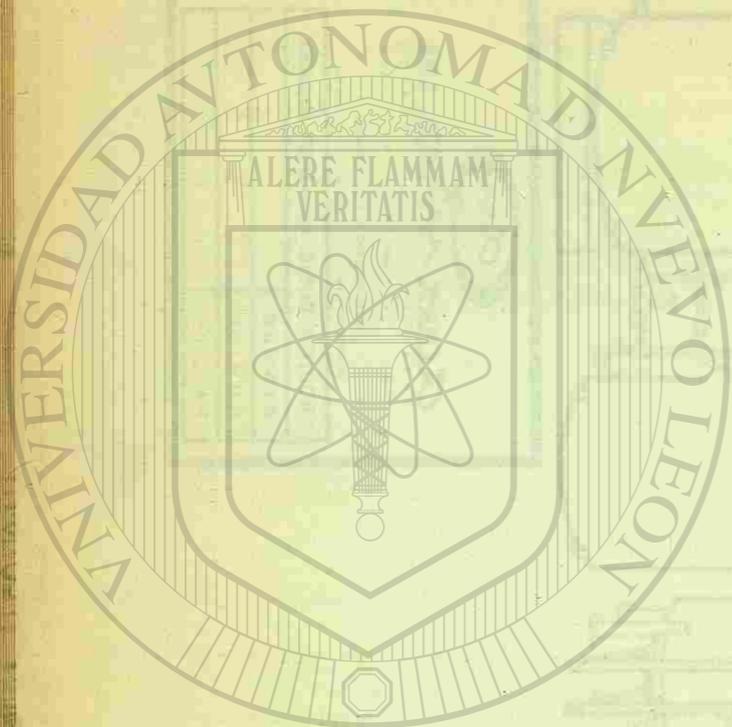
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Agua Mex. S.R.L.
FABRICANTES DE EQUIPO
PARA TRATAMIENTO DE AGUA

MONTERREY, N.L., MEXICO
R.F.C. 048 000000 000 000 TELEFONO 441527 APOC 581

EQUIPO DOBLE SUAVIZADOR AQUAMEX	
DIBUJO	
REVISO	
FECHA	



DIRECCIÓN GENERAL

INTERCAMBIO CATIONICO CICLO DE HIDROGENO:

El intercambio catiónico en el ciclo de hidrógeno se utiliza para obtener agua de alimentación de calderas de baja presión (menos de 400 lb/pulg.²), cuando el agua cruda tiene alta alcalinidad de bicarbonatos y baja dureza y contenido de sílice. También se aplica en la obtención de hielo cuando se desea obtener un producto cristalino, en corto tiempo y que no sea quebradizo. Tiene aplicación en la manufactura de bebidas gaseosas en donde se requiere baja alcalinidad, baja dureza y un pH adecuado para obtener los sabores deseados.

En centrales termoeléctricas con calderas que operan con presiones superiores a 400 lb/pulg.² se utiliza junto con unidades aniónicas y de lechos mezclados para obtener agua desmineralizada de alta calidad.

En este proceso se utilizan zeolitas de hidrógeno, que son materiales orgánicos no silicosos, naturales o sintéticos, que tienen la propiedad de intercambiar iones hidrógeno, por los cationes calcio, magnesio, sodio, etc. cuando se regeneran con ácido sulfúrico o clorhídrico.

También pueden regenerarse con cloruro de sodio y operar el ciclo sódico con ciertas ventajas sobre las zeolitas silíceas.

En los estados de Dakota Norte y Sur en la Unión Americana se encuentran varios lignitos que son zeolitas de hidrógeno naturales. El coque, el carbón sulfonado, las resinas sintéticas fenólicas y poliestirénicas sulfonadas son zeolitas de hidrógeno artificiales.

FINALIDAD:

La finalidad de este tratamiento es similar a la de la suavización con zeolitas de sodio ya que se eliminan los iones calcio y magnesio, etc., pero como además se elimina el sodio y el pH del efluente baja notablemente.

La finalidad de este tratamiento no es idéntica a la de la suavización ya que además de proteger por incrustaciones y depósitos elimina la alcalinidad que no es deseable para ciertos procesos.

EQUIPO:

El equipo necesario para llevar a cabo el

tercambio catiónico en el ciclo de hidrógeno es el siguiente:

- a) Medidor de agua cruda.
- b) Unidad catiónica para ciclo de hidrógeno.
- c) Tanque de almacenamiento de ácido.
- d) Tanque de dilución o bombas de inyección de ácido.
- e) Bombas de operación.
- f) Válvulas, líneas y accesorios.
- g) Desgasificador (Si se desea eliminar el bióxido de carbono).

DESCRIPCION DEL PROCESO:

El agua cruda impulsada por la bomba de operación pasa por el medidor y entra en la unidad catiónica — por la parte superior y al atravesar el lecho de la resina sufre el intercambio de sus cationes por iones hidrógeno — transformándose todas las sales que el agua lleva disueltas en sus ácidos respectivos, por lo que el efluente tiene las características de un ácido diluido. Cuando se desea eliminar también el bióxido de carbono entonces el agua al salir de la unidad catiónica se envía a la parte superior de un

desgasificador que consiste en una torre generalmente de madera, empacada con anillos de porcelana porosa (anillos de chig) por cuya parte inferior se sopla aire mediante un motor eléctrico. El agua se rocía mediante espreas en la parte superior del desgasificador y los anillos proporcionan mayor superficie de contacto con el aire que va en contracorriente para eliminar de este modo el gas carbónico, quedando el agua saturada de oxígeno. El CO_2 residual es de 10-20 ppm. aproximadamente.

Cuando la zeolita ha cedido la mayor parte de sus iones hidrógeno, la calidad del agua tratada empieza a disminuir y se dice que la resina está agotada. Para comprobar si efectivamente ya se agotó la resina, se efectúan análisis de acidez mineral libre. Si la acidez mineral libre es un 10% menor que la acidez mineral libre con que la unidad entró en servicio, se dá por agotada la unidad y se procede a su regeneración. Se puede analizar la dureza total del agua tratada para determinar si la resina ya está agotada, pero es más efectivo el análisis de la acidez mineral libre.

REGENERACION:

La regeneración de la resina se efectúa del siguiente modo:

Retrolavado.- El retrolavado se efectúa durante 10 ó 15 minutos hasta que el agua sale clara y al flujo especificado por el fabricante, para aflojar la resina, evitar compactaciones y eliminar partículas extrañas.

Introducción de regenerante.- Si el regenerante es ácido sulfúrico se debe introducir a una concentración inferior al 2% (1.75% generalmente), para evitar la precipitación del sulfato de calcio en la resina.

Si la unidad catiónica es grande el % de ácido se puede subir gradualmente a 2, 4, 6, 8 y 10%, después de haber desplazado cuando menos $\frac{1}{2}$ volumen de agua en la unidad con el objeto de disminuir el tiempo de inyección. Si el regenerante es ácido clorhídrico, se puede inyectar directamente al 10%, el cloruro de calcio formado por ser más soluble que el sulfato de calcio no se precipita en la resina.

El daño causado por la precipitación del sulfato de calcio no es permanente y se puede restaurar la capacidad original de la resina mediante una doble regeneración o bien con 3 ó 4 regeneraciones normales.

Enjuagado lento.— El enjuagado lento consiste únicamente en la suspensión de la introducción de ácido, dejando la entrada de agua de dilución a la unidad durante el tiempo necesario para desplazar un volumen de agua de la unidad. Esto se debe hacer una vez para enjuagar la línea de inyección de ácido y el tiempo requerido se especifica en el instructivo de operación de la planta.

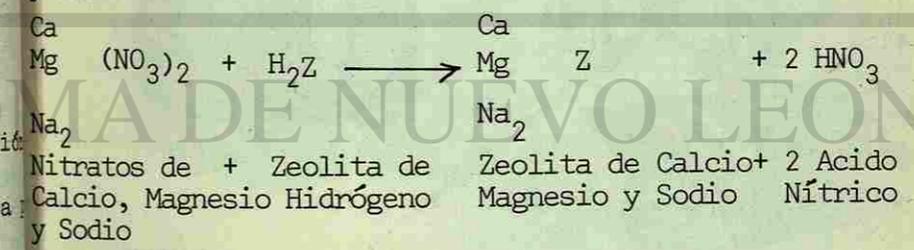
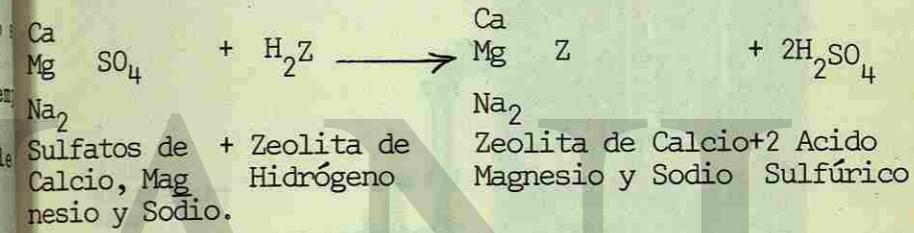
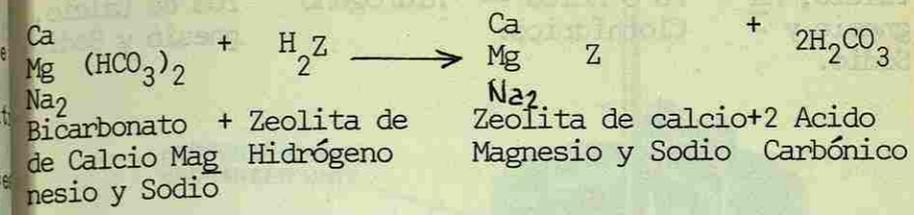
Enjuagado rápido.— El enjuagado rápido se efectúa al flujo especificado y durante el tiempo requerido hasta que la dureza sea de 0 - 2 ppm. y la acidez mineral libre no varíe en los dos análisis efectuados con intervalo de 5 minutos.

Servicio.— Al terminar todos los pasos de la regeneración se pone la unidad en posición de servicio quedando lista para entrar nuevamente en operación. Para obtener una buena calidad del agua tratada en estas unidades, el flujo de operación no debe ser superior al especificado en el instructivo

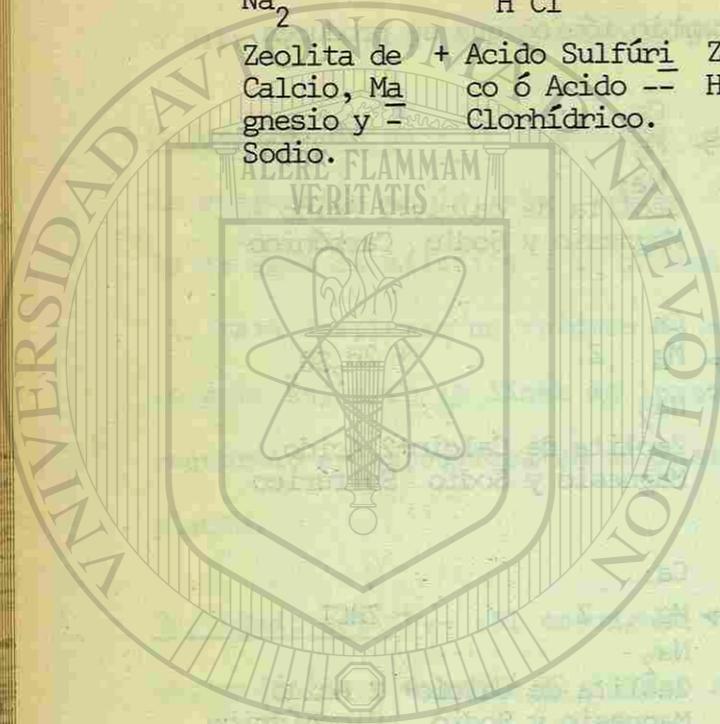
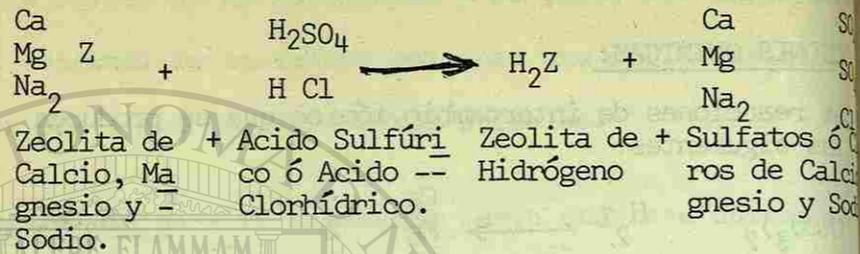
pues si el agua pasa a velocidades mayores no hay tiempo suficiente para que se efectúen las reacciones de intercambio.

REACCIONES QUIMICAS:

Las reacciones de intercambio iónico que se producen son las siguientes:

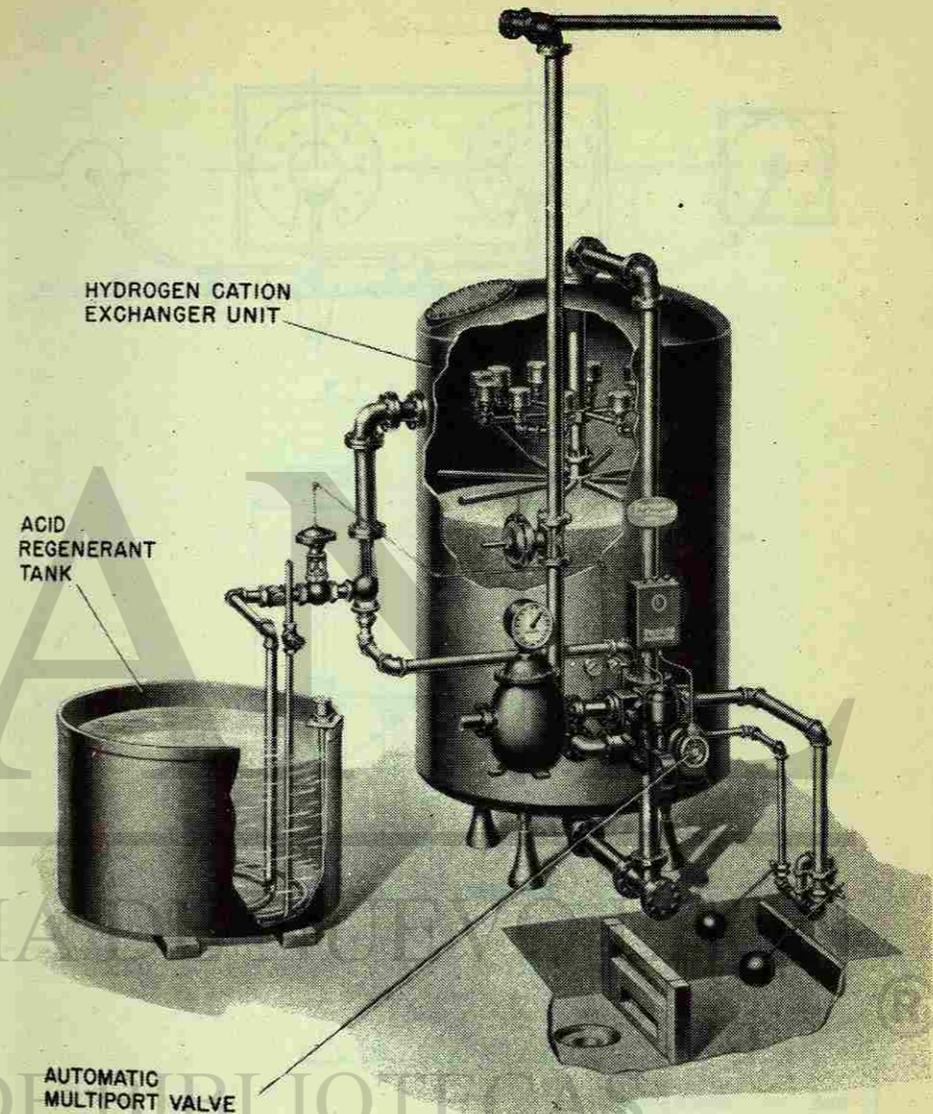


En el proceso de regeneración la reacción que se efectúa es la siguiente:

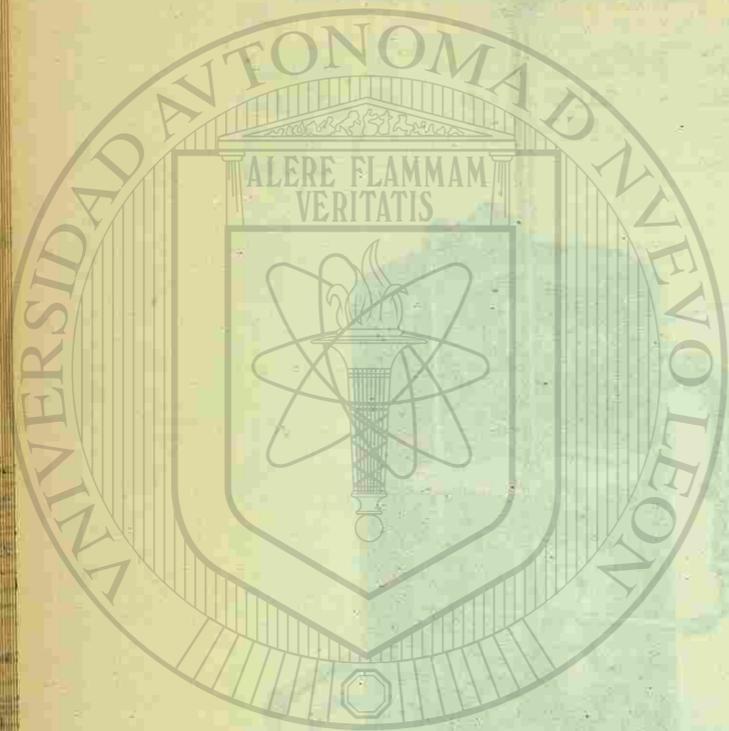


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

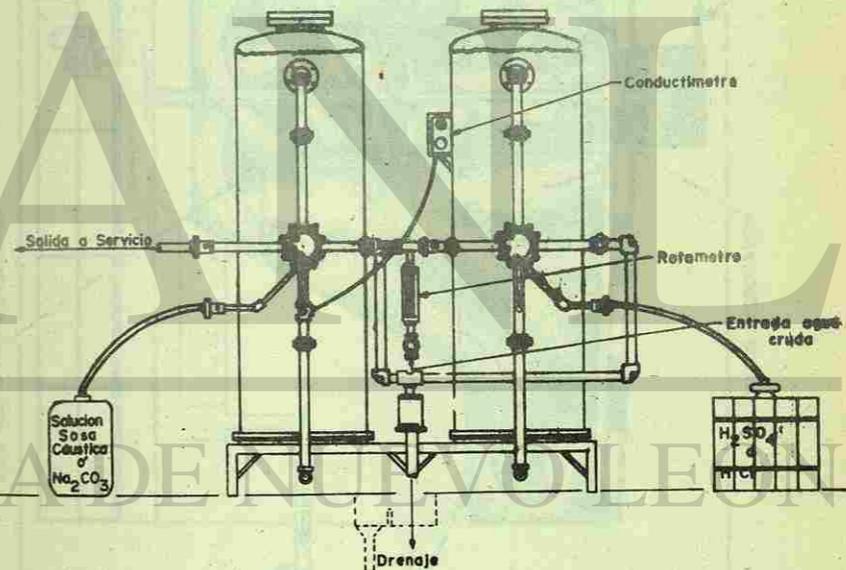
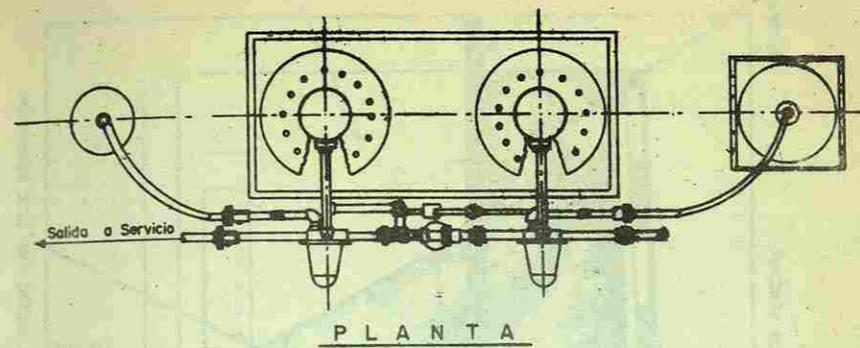


Technical drawing of an automatic hydrogen cation exchanger unit and acid regenerant tank showing interior construction.

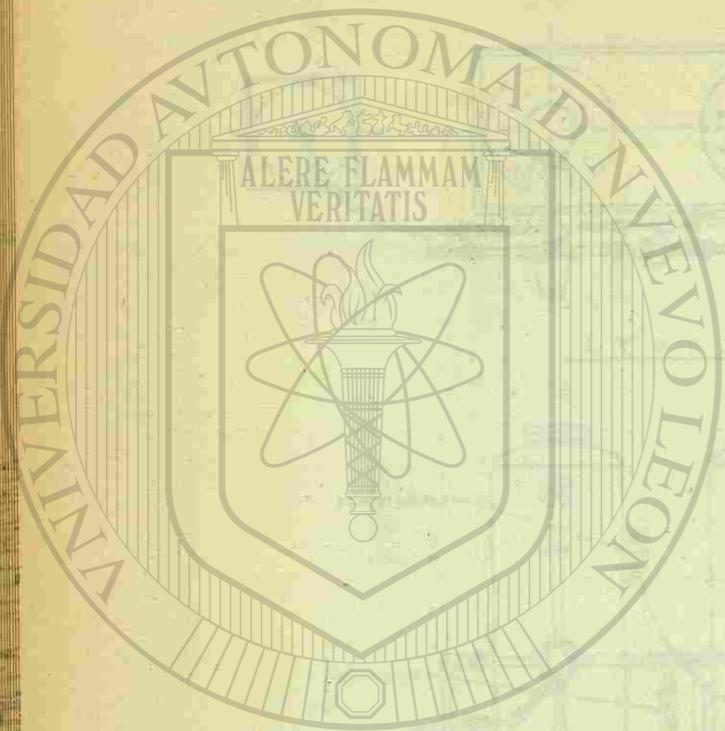


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA

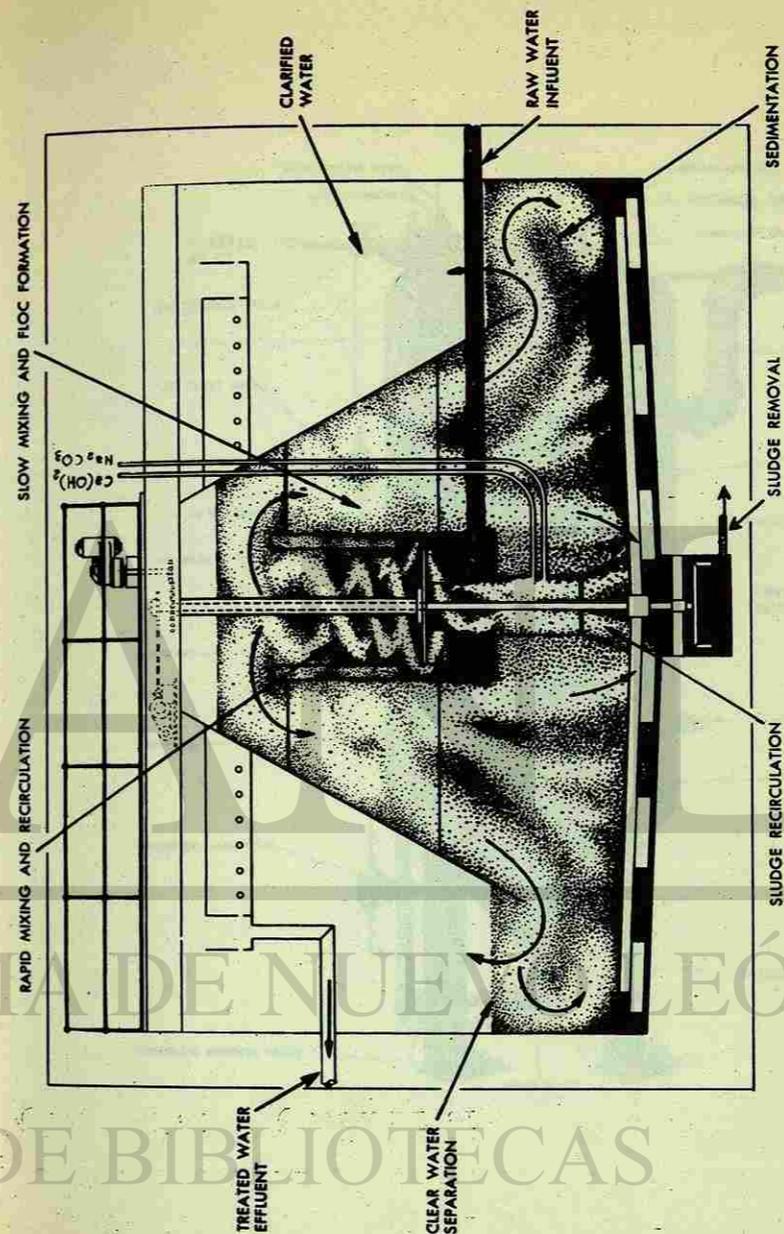


AQUA MEX S.A.	
DESMINERALIZADOR DE DOS COLUMNAS MODELO	
DIBUJO: L.MTZ.H.	OBSER.
APROBO: Ing. E.A.G.G.	
ESCALA: —	
FECHA: 5/6/66	



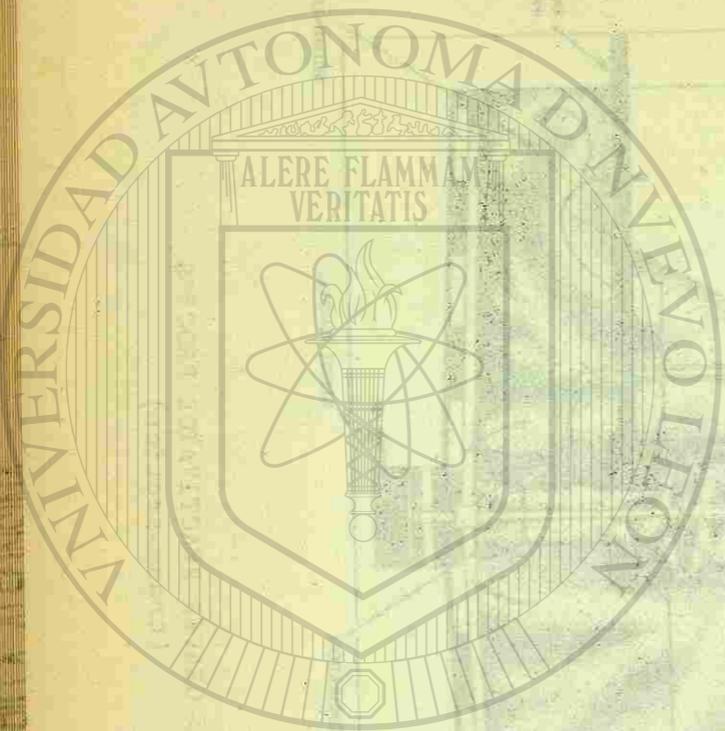
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



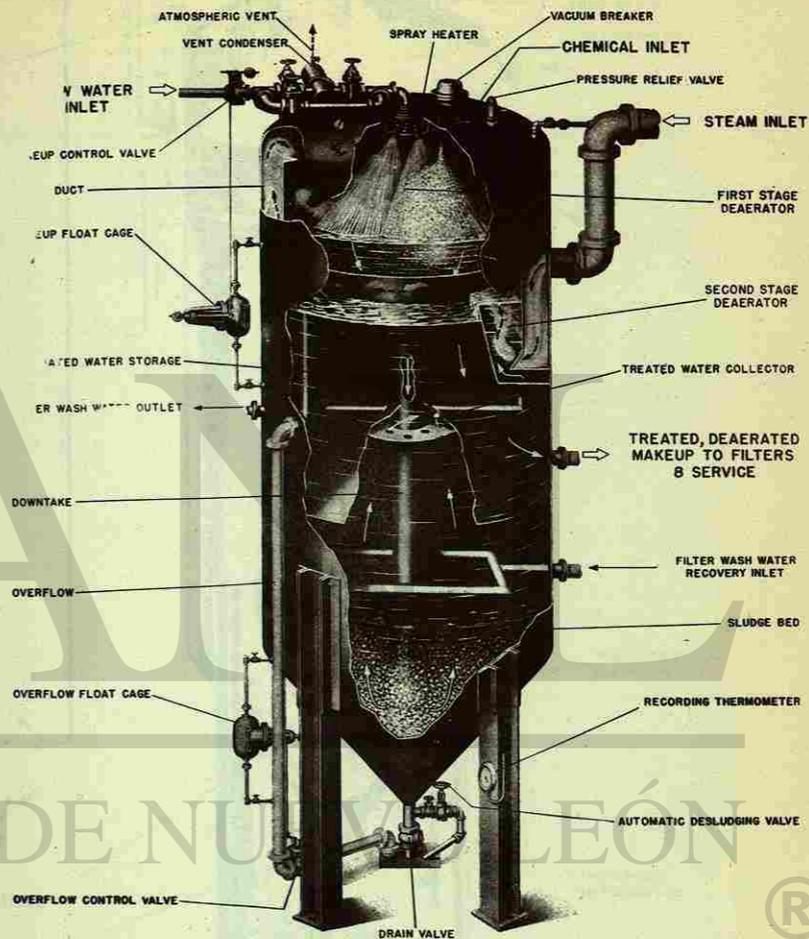
THE GRAVER REACTIVATOR PROCESS
(cross-section)



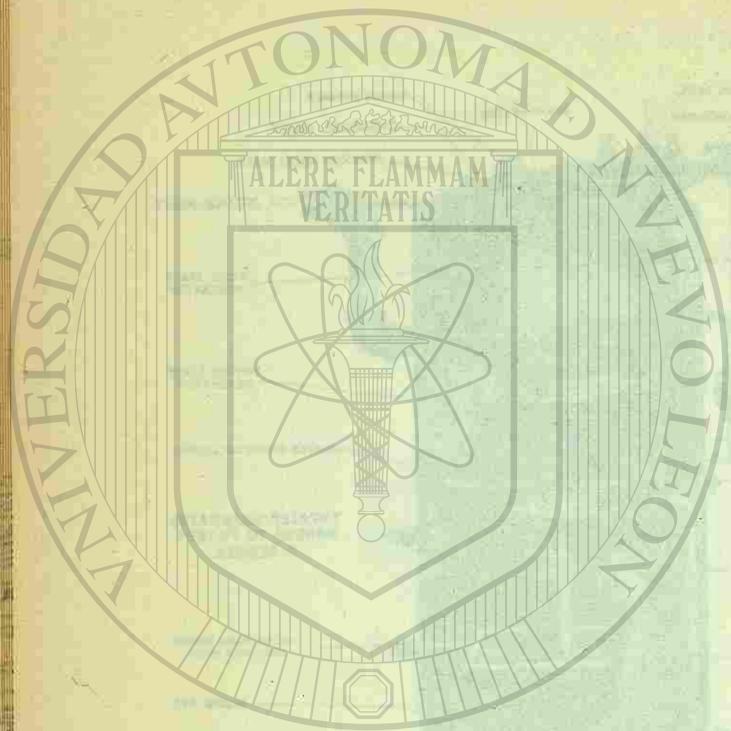


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

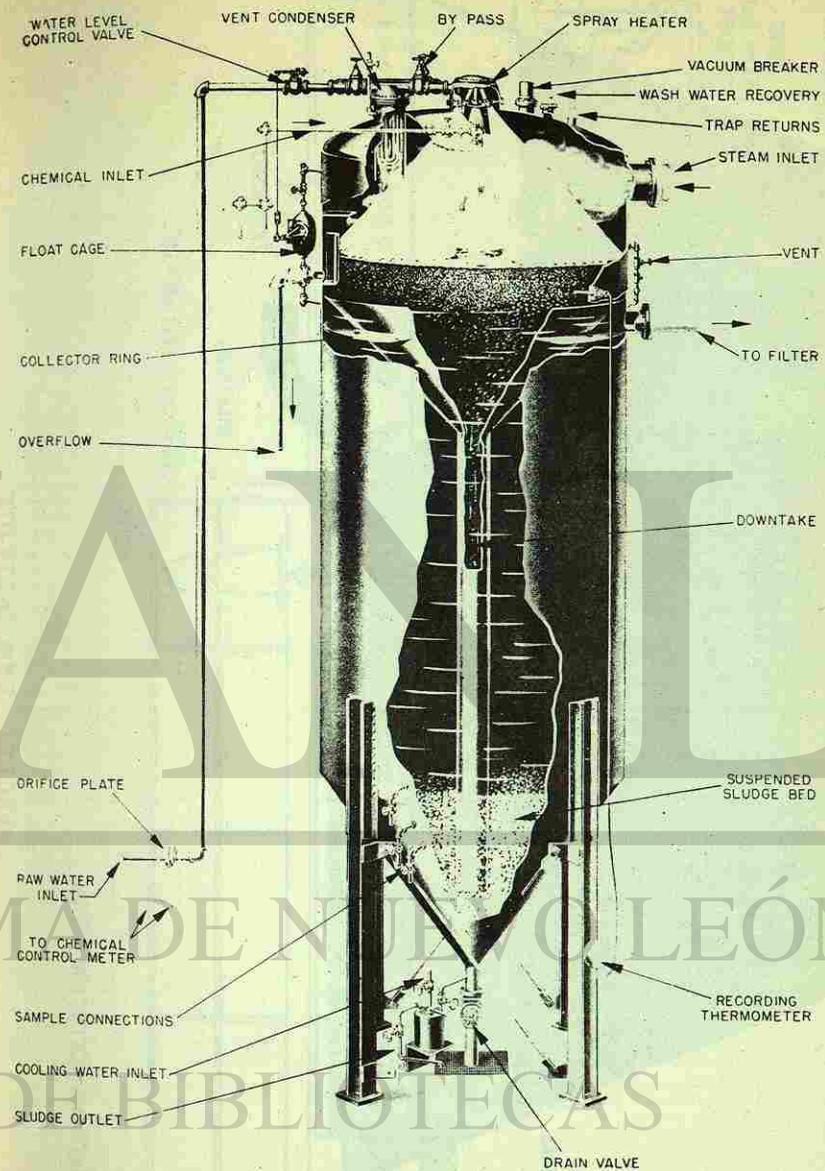


Sectional view showing design of Graver Type SD Solids-Contact Hot-Process Softener.

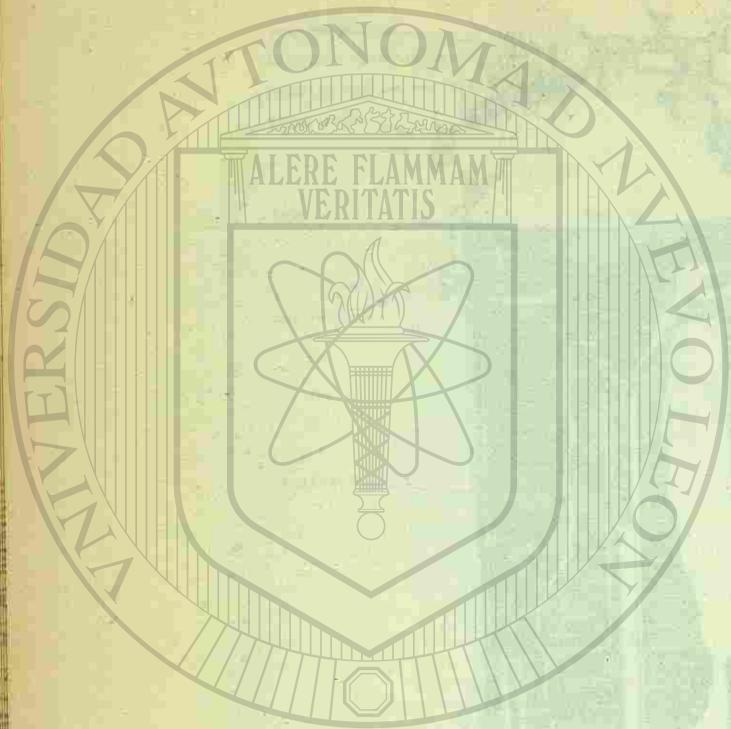


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

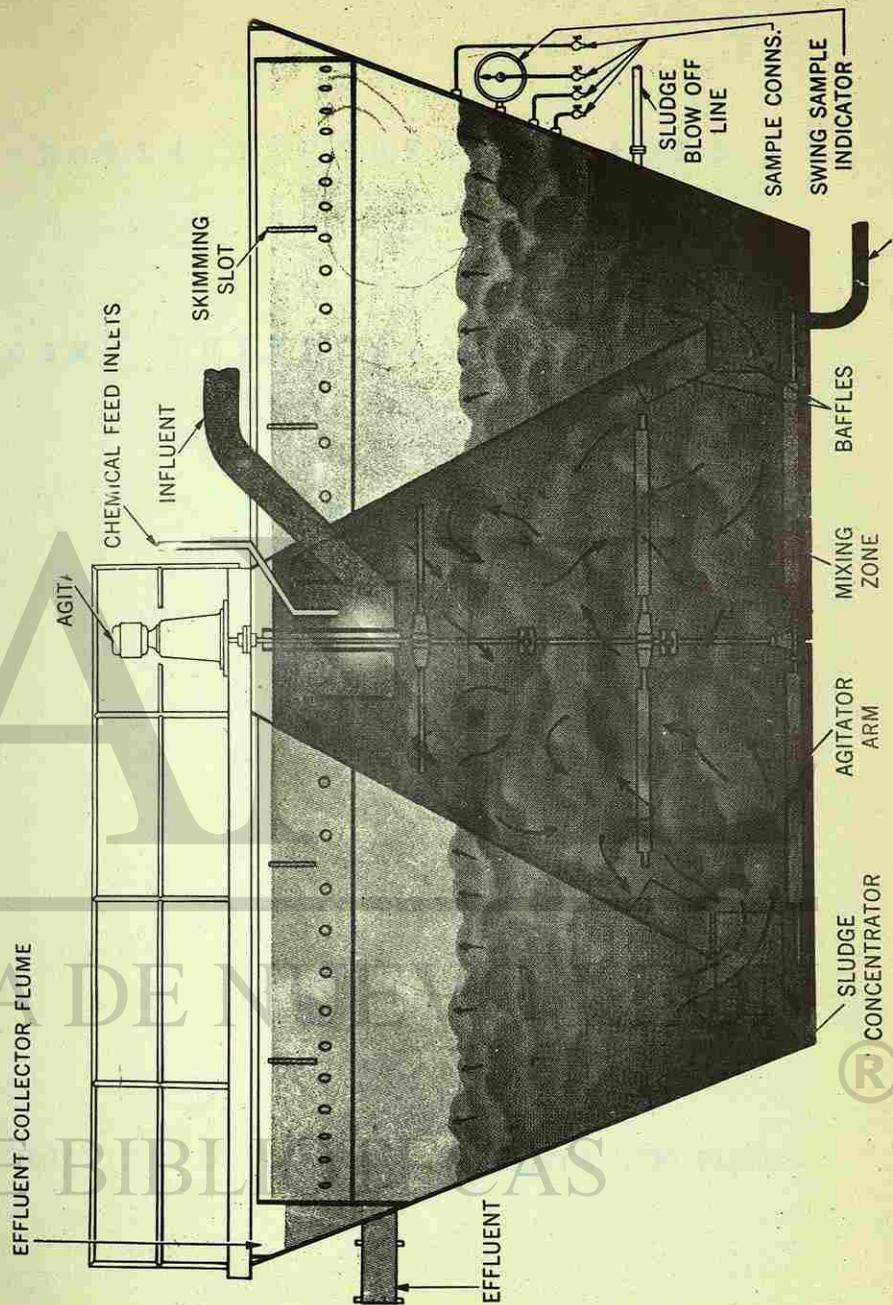


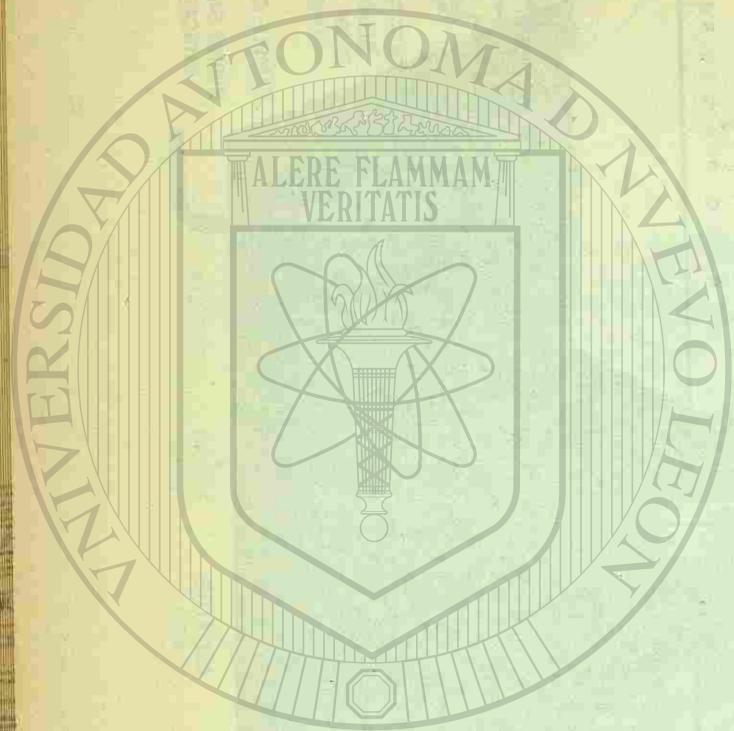
Permutit Type B Hot Process Softener.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE N
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLI

PERMUTIT PRECIPITATOR





TEORIA Y GENERALIDADES

SOBRE INTERCAMBIO IÓNICO

UANL

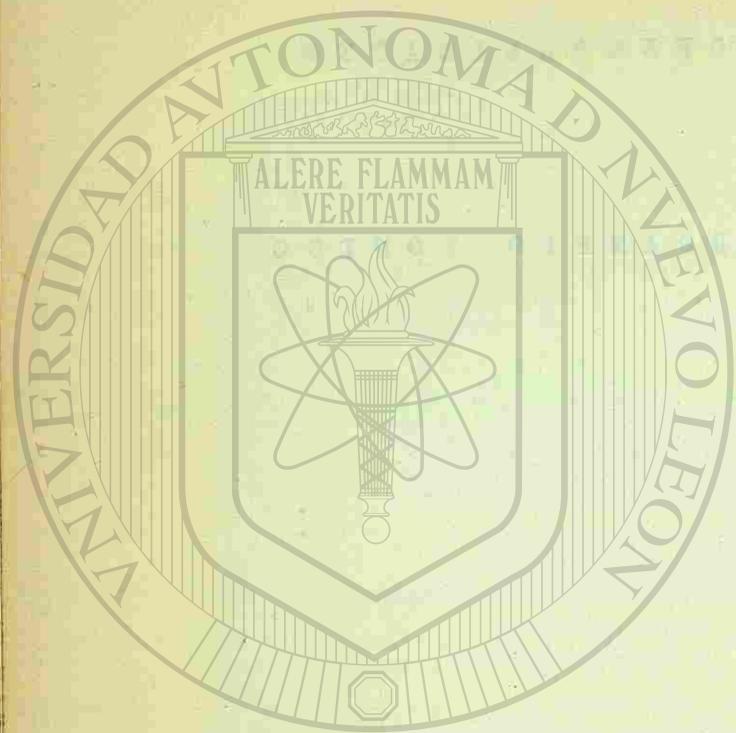
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MARZO 1967

POR EL ING. CARLOS LUGO FLORES.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CONTENIDO.

INTERCAMBIO IONICO

I.- INTRODUCCION

II.- DATOS HISTORICOS

III.- MECANISMO DE INTERCAMBIO IONICO

A.- Intercambiadores de iones inorgánicos.

IV.- NATURALEZA DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES.

B.- Intercambiadores de iones inorgánicos sintéticos.

C.- Resinas orgánicas sintéticas.

Resinas catiónicas

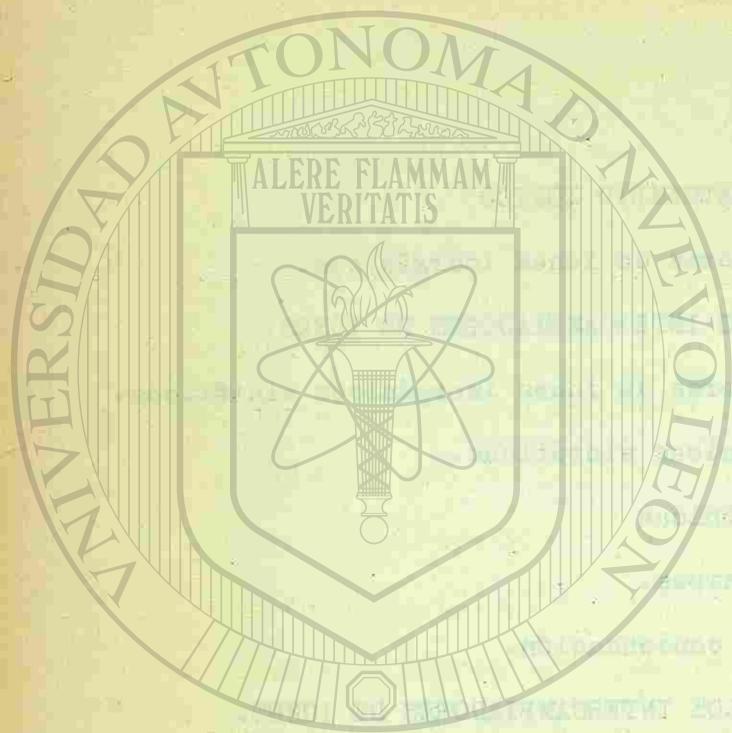
Resinas aniónicas.

Polímeros de condensación.

V.- SELECTIVIDAD DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES.

VI.- APLICACION A TRATAMIENTO DE AGUA Y TERMINOLOGIA

USADA.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INTERCAMBIO IÓNICO

I. INTRODUCCION

Con el actual desarrollo industrial de --
nuestra época ha nacido la necesidad de abastecerse de --
agua con características de máxima pureza, para su uso --
en operaciones que la requieren. Por tal motivo se han --
desarrollado métodos de coagulación y filtración para --
eliminar materiales en suspensión; procesos químicos pa--
ra eliminar compuestos que se encuentran en solución y --
que no es posible eliminarlos por procesos tan simples --
como los antes mencionados. Dentro de los procesos para
la eliminación de impurezas solubles se han practicado --
métodos como suavización cal en frío, procesos de suavi--
zación en caliente (para eliminar los compuestos incrus--
tantes incluyendo la sílice), destilación, y por último
Intercambio Iónico.

El Intercambio Iónico será objeto de ---
nuestra atención en los siguientes momentos, ya que es
uno de los mayores avances tecnológicos que se han lo--
grado en el campo de tratamiento de agua.

El campo de tratamiento de aguas por Intercambio Iónico, es muy extenso y no se pretende profundizar, sino simplemente establecer algunos conceptos que creemos sean de bastante utilidad. Si se desea profundizar en el campo de Intercambio Iónico, al final se da una lista bibliográfica para aquellas personas que deseen ampliar su conocimiento en esta materia.

II. DATOS HISTÓRICOS

Aunque el fenómeno de Intercambio Iónico fué notado, vagamente se ha dado noticia de él en la historia del hombre, ya que no se tenía conocimiento de las leyes químicas que rigen este fenómeno. El crédito del uso práctico de los materiales de Intercambio Iónico es dado a H. S. Thompson quien observó y reportó que al pasar un líquido que contenía amoníaco a través de tierras vegetales, las sales de amoníaco se absorbían en dichas tierras vegetales, y que cuando dichas tierras fueron sucesivamente tratadas con cal, el amoníaco fué recobrado. Los estudios originales de Thompson fueron continuados por Thomas Way durante los años de 1850 y 1854 y Way reportó sus investigaciones a ^{La} Royal Agricultural Society de Londres

Estas investigaciones fueron seguidas, pero no fué sino hasta 1905 cuando en Alemania el Químico - Robert Gangs, sintetizó minerales de Intercambio Iónico, fundiendo arcilla, arena y carbonato de sodio. Gangs llamó a estos compuestos Permutadores del latín "Permuto", - el cual significa intercambio. El nombre de "Zeolita" ha sido más comumente usado para describir materiales usados en la suavización de agua, los cuales son materiales naturales procesados o materiales sintéticos. El nombre de Zeolita fué inventado de las palabras griegas "Zein" y "Litos" que traducidas literalmente significan "piedra hirviente".

El Geólogo Sueco Cronstedt usó este término para describir ciertos silicatos, los cuales se deshidrataban al ser calentados.

Pero la más espectacular evolución en el Intercambio Iónico empezó en 1935, cuando los Señores Químicos Ingleses Adams Y Holmes notaron que las resinas usadas en la manufactura de discos fonográficos acusaban propiedades de Intercambio Iónico. Estas resinas fueron mejo

radas y desarrolladas en Alemania y después de la segunda guerra mundial en Inglaterra y de los Estados Unidos.

Pero el Intercambio Iónico ha avanzado y en 1950 se crearon las membranas de Intercambio Iónico, éstos materiales son un tema que necesita tratarse separadamente y por consiguiente, sólo se mencionan para establecer su presencia en el campo de Intercambio Iónico.

III. MECANISMO DE INTERCAMBIO IONICO

Se ha mencionado la frase Intercambio Iónico, pero no se ha establecido nada que defina éste y otros términos anteriormente expresados.

Primeramente se necesita, tener el precedente de qué son los Iones y qué se entiende por Intercambio Iónico.

Para contestar la primera fase de nuestra pregunta, es necesario tomar en cuenta que el Intercambio Iónico tiene un fundamento fisicoquímico.

Para poder definir los Iones, hay que recordar que la materia en sus formas más simples, se ha

determinado que está formada por diversas agrupaciones de partículas tales como protones, electrones, etc. para formar átomos y éstos a su vez moléculas de acuerdo a los arreglos atómicos para dar compuestos químicos de características muy diversas. En estas agrupaciones atómicas, se distinguen químicamente, uniones electrovalentes, uniones covalentes y uniones coordinadas. La unión electrovalente es el enlace químico que será objeto de nuestra atención en el curso de este tema. Los compuestos electrovalentes son partículas unidas electrostáticamente, y dichas partículas están constituidas desde agrupaciones de átomos por uniones diferentes a la electrovalente, hasta la forma simple del átomo. Los compuestos electrovalentes se les ha dado el nombre de electrolitos, porque al disolverse en el agua, lo hacen en partículas cargadas eléctricamente, éste fenómeno es conocido como disociación electrolítica, y las partículas han recibido el nombre de Iones (palabra de origen griego que significa caminante), porque cuando una solución acuosa se somete a una tensión eléctrica las partículas se dirigen hacia los electrodos (de signo contrario) de la fuente de tensión. De aquí se infiere que las expresadas partículas están cargadas

eléctricamente y como las moléculas salinas tienen la propiedad de ser por lo menos en apariencia, eléctricamente neutras, hay que admitir que están compuestas por cantidades equivalentes de partículas cargadas positivamente llamadas Cationes porque se dirigen al electrodo negativo (catodo), al ser sometida una solución a una tensión eléctrica, y partículas cargadas negativamente llamadas Aniones, porque éstas se dirigen al electrodo positivo llamado ánodo al estar dicha solución en la condición antes mencionada. Así podemos ver, que en una solución de cloruro de sodio (NaCl) no son moléculas de NaCl las que "nadan" de modo desordenado, sino iones sodio (Na^+) con carga positiva e iones cloruro (Cl^-) de carga negativa.

A continuación se ilustra con algunos ejemplos lo anteriormente dicho.

<u>COMPUESTO QUIMICO</u>	<u>FORMULA</u>	<u>DISOCIADO EN</u>
Cloruro de Sodio	NaCl	$\text{Na}^+ \text{Cl}^-$
Cloruro de Calcio	CaCl_2	$\text{Ca}^{++} 2\text{Cl}^-$
Sulfato de Sodio	Na_2SO_4	$2\text{Na}^+ \text{SO}_4^-$
Sulfato de Magnesio	MgSO_4	$\text{Mg}^{++} \text{SO}_4^-$

<u>COMPUESTO QUIMICO</u>	<u>FORMULA</u>	<u>DISOCIADO EN</u>
Hidróxido de Sodio	NaOH	$\text{Na}^+ \text{OH}^-$
Carbonato de Calcio	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Ca}^{++} 2 \text{HCO}_3^-$

Básicamente el mecanismo de Intercambio Iónico es el proceso mediante el cual, iones que entran en contacto con determinadas sustancias sólidas (cambiadores de iones) son absorbidos por éstas cediendo a la vez otros iones.

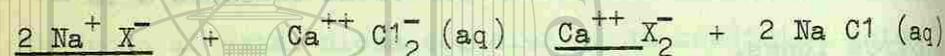
Este intercambio de iones sólo puede realizarse entre iones que tengan la misma naturaleza eléctrica, es decir, iones positivos sólo se intercambian con iones positivos.

Las sustancias insolubles portadoras de la propiedad de intercambio iónico, son conocidas como intercambiadores de iones. Los intercambiadores de iones, que cambian iones positivos es decir, cationes, son llamadas **INTERCAMBIADORES DE CATIONES** y las que cambian iones negativos o aniones son denominados **INTERCAMBIADORES DE ANIONES**.

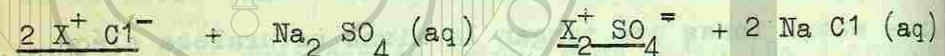
El intercambio iónico se efectúa en una cantidad equivalente estequiométricamente por iones del mismo signo.

Ilustrando lo anteriormente mencionado, nos referimos a las siguientes reacciones.

Un intercambiador de cationes:



Un intercambiador de aniones:



La X la unidad estructural ó molecular del intercambiador de iones. La fase sólida es la que se encuentra subrayada, y (aq) significa que el electrolito se encuentra en solución.

Las fases insolubles son compuestos de origen inorgánico, como son los silicoaluminatos (llamados Zeolitas) y los compuestos de origen orgánico obtenidos sintéticamente.

Dichos intercambiadores de iones tienen incorporados en sus estructuras moleculares, grupos iónicos de diversas naturalezas, los cuales dotan a dichos compuestos de una actividad intercambiadora. Estos grupos iónicos son los que dotan a las resinas de la capacidad de intercambiar cationes o intercambiar aniones al entrar en contacto con soluciones.

IV. NATURALEZA DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES

Los materiales insolubles que se utilizan para el intercambio iónico, como anteriormente se mencionó, son compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos.

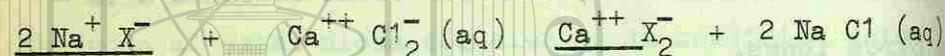
Estos compuestos existentes en el intercambio iónico se muestra en seguida.



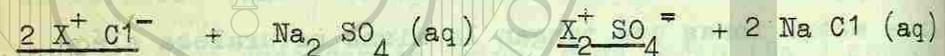
El intercambio iónico se efectúa en una cantidad equivalente estequiométricamente por iones del mismo signo.

Ilustrando lo anteriormente mencionado, nos referimos a las siguientes reacciones.

Un intercambiador de cationes:



Un intercambiador de aniones:



La X la unidad estructural ó molecular del intercambiador de iones. La fase sólida es la que se encuentra subrayada, y (aq) significa que el electrolito se encuentra en solución.

Las fases insolubles son compuestos de origen inorgánico, como son los silicoaluminatos (llamados Zeolitas) y los compuestos de origen orgánico obtenidos sintéticamente.

Dichos intercambiadores de iones tienen incorporados en sus estructuras moleculares, grupos iónicos de diversas naturalezas, los cuales dotan a dichos compuestos de una actividad intercambiadora. Estos grupos iónicos son los que dotan a las resinas de la capacidad de intercambiar cationes o intercambiar aniones al entrar en contacto con soluciones.

IV. NATURALEZA DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES

Los materiales insolubles que se utilizan para el intercambio iónico, como anteriormente se mencionó, son compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos.

Estos compuestos existentes en el intercambio iónico se muestra en seguida.



A) INTERCAMBIADORES DE IONES INORGANICOS

Los compuestos de origen inorgánico usados en los procesos de intercambio iónico, son materiales cristalinos de silicoaluminato de sodio hidratado. Los intercambiadores de iones naturales se obtienen de depósitos marinos, y se conocen como Arena verde o Gluconita. Estos compuestos sólo son capaces de intercambiar cationes.

El material obtenido de los depósitos naturales, se procesan para refinarlos y acondicionarlos para su uso en equipos de tratamiento de agua.

Las zeolitas naturales pueden describirse en términos de óxidos, por ejemplo:



A continuación se dan una serie de silicoaluminatos conocidos:

<u>NOMBRE</u>	<u>FORMULA</u>
Analcita	$\text{Na} [\text{Si}_2 \text{Al} \text{O}_2]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Characita	$(\text{Ca}, \text{Na}) [\text{Si}_3 \text{Al} \text{O}_6]_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

NOMBRE

FORMULA

Harmotomita	$(\text{K}, \text{Bo}) [\text{Si}_5 \text{Al}_2 \text{O}_{14}] \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$
Heulandita	$\text{Ca} [\text{Si}_3 \text{Al} \text{O}_8] \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$
Natrolita	$\text{Na}_2 [\text{Si}_3 \text{Al}_2 \text{O}_{10}] \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Estos materiales tienen una estructura cristalina tridimensional, con canales y cavidades en el cuerpo molecular del silicoaluminato. Los intercambiadores de iones se encuentran en estos intersticios y pueden desplazarse a través del cristal.

Otros silicoaluminatos tienen un arreglo de capas a través de las cuales se desplazan los iones, de este tipo se muestran los siguientes compuestos:

Montomorilonita	$\text{Al}_2 [\text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2] \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Beidelita	$\text{Al}_2 [(\text{OH})_2 \text{Al} \text{Si}_{13} \text{O}_9 \text{OH}] 4\text{H}_2\text{O}$

Los anteriores materiales actúan como intercambiadores de iones, permaneciendo la estructura cristalina insoluble ante solventes polares como el agua.

B) INTERCAMBIADORES DE IONES INORGANICOS SINTETICOS

Con el fin de mejorar las características de intercambio iónico, se han sintetizado los silicoaluminatos por diversos métodos.

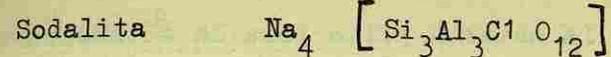
Por el método de fusión se obtuvo el primer compuesto sintético, mezclando y fundiendo feldespar, caolín, arena y carbonato de sodio; pero ya es obsoleto este método.

El método húmedo o tipo Gel, consiste en la formación de un gel de silicoaluminado de sodio. Este gel es prensado y después se seca cuidadosamente.

La capacidad de esta Zeolita se mejoró al doble de la que se obtenía por el método de fusión.

La desventaja principal de estos materiales es que sólo operan dentro de rangos muy estrechos de pH.

También algunos silicoaluminatos pueden actuar como intercambiadores de aniones, como ejemplos tenemos:



Pero los que se han usado prácticamente son:



Una desventaja de los materiales inorgánicos es que son relativamente suaves y no muy resistentes a la abrasión por lo cual han sido desplazados por otros materiales.

C) RESINAS ORGANICAS SINTETICAS

Cuando se requirieron materiales de mayor capacidad de intercambio iónico, se desarrollaron resinas orgánicas que mejorarán las características de operación de los materiales inorgánicos.

Las resinas orgánicas originalmente fueron hulla sulfonada, ésta es la resina orgánica más simple -- que se ha fabricado. Esta resina mejoró las características de operación que se buscaban pero no podían actuar como intercambiadores de aniones, sólo intercambiaban cationes.

La materia prima para la obtención de las resinas Carbonaceas es la hulla, y para convertirlos a intercambiadores de cationes, tipo hidrógeno, se sulfona con ácido sulfúrico fumante, con lo cual se fijan a la estructura del carbón grupos sulfúricos que actúan como grupos iónicos y para introducir un grupo iónico más, dichos carbones se oxidan produciendo grupos carboxílicos ácidos (-COOH).

Estos compuestos aumentaron casi al doble la capacidad de intercambio respecto a los compuestos inorgánicos. Una de las desventajas que se le encuentra a estas resinas, es que son muy vulnerables a la oxidación, en la misma forma que el carbón activado.

Pero lo más sorprendente en el intercambio iónico son las resinas que se obtienen por vía sintética, partiendo de hidrocarburos aromáticos, los cuales han dado un gran impulso al intercambio iónico.

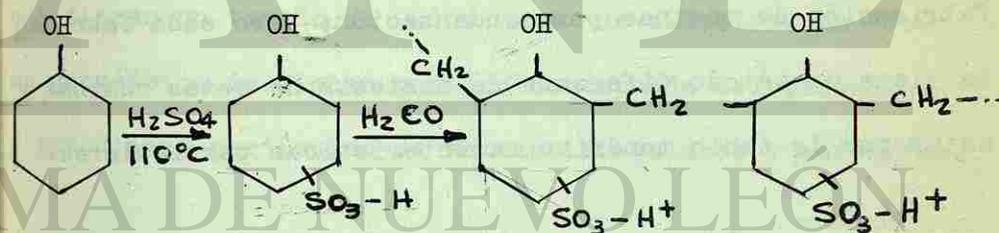
En la síntesis de las resinas de intercambio iónico se han logrado producir resinas tanto aniónicas como catiónicas.

RESINAS CATIONICAS

Estas resinas se sintetizan por dos métodos, los cuales dan productos con características similares, pero con diferentes capacidades de intercambio iónico, así como características de operación.

Estos dos métodos se distinguen como polimerización por condensación y polimerización por adición.

En el grupo de polimeros por condensación tenemos las resinas fenolformaldehido sulfonadas. Un método básico para la obtención de estas resinas se muestra en la siguiente reacción:



Los grupos sulfúricos son los que son llamados grupos iónicos y son los portadores de los iones intercambiables, en este caso particular, es un intercambiador de cationes puesto que el hidrógeno es un ión posi

tivo o catión, y el cual puede cambiarse por otro ión positivo.

Los grupos iónicos están unidos a una macromolécula que actúa como fase hidrofóbica, lo cual dota al material de una característica necesaria para el intercambio iónico de tratamiento de agua.

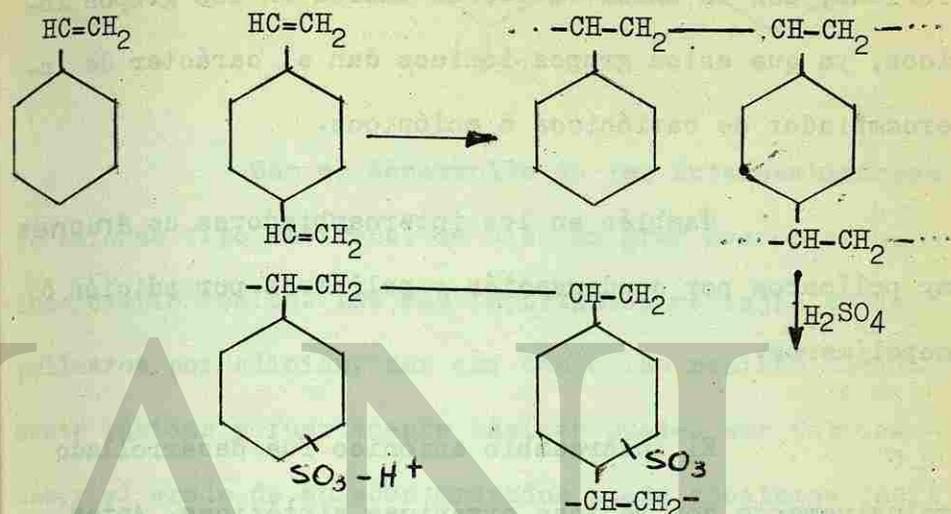
Esta macromolécula además se hace reaccionar con otros compuestos orgánicos para así obtener enlaces cruzados en las macromoléculas en una estructura tridimensional, obteniéndose una partícula sólida insoluble y fácil de manejar.

La anterior es una reacción típica para la fabricación de resinas por condensación; pero cada fabricante tiene un método diferente de síntesis de estas resinas y estas por lo tanto tendrían características particulares.

Las resinas por copolimerización son poliestirenos, las cuales son sintetizadas partiendo del vinilbenzeno y del divinil benceno. Para obtener características particulares de intercambio iónico y apariencia física de la resina, las relaciones de vinilbenceno y divinil benceno, variarán de-

pendiendo del fabricante.

A continuación se da la reacción básica de síntesis de este grupo de resinas.



Estas resinas se fabrican en partículas que tienen un tamaño de 0.1 a 1 mm. de diámetro. La forma geométrica de dichas partículas depende del producto, y son dichas partículas de formas irregulares y esféricas.

En la fabricación de estas resinas se busca tengan alta porosidad para lo cual se han elaborado varias técnicas para obtener dicha porosidad.

RESINAS ANIONICAS

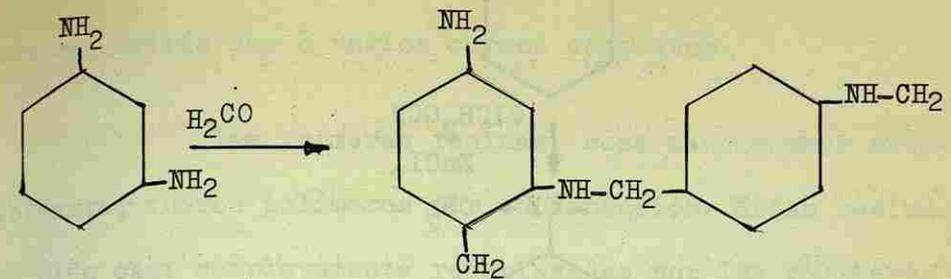
Las resinas Aniónicas Orgánicas tienen estructuras moleculares similares a las de las Resinas Catiónicas, con la única variación básica en los grupos iónicos, ya que estos grupos iónicos dan el carácter de intercambiador de cationicos ó aniónicos.

También en los intercambiadores de aniones hay polímeros por condensación y polímeros por adición ó copolímeros.

El intercambio aniónico fué desarrollado exclusivamente con resinas orgánicas sintéticas. Antes de estas resinas no se desarrolló ningún intercambiador de aniones con propiedades satisfactorias.

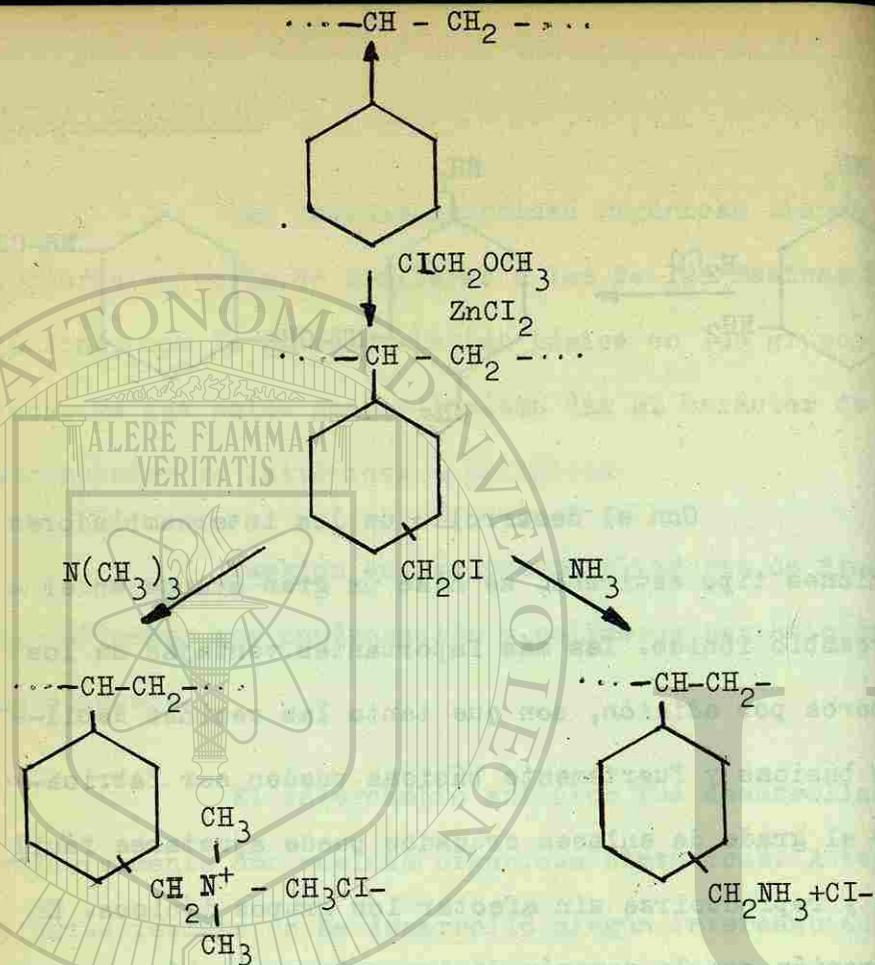
POLIMEROS POR CONDENSACION.

Para ilustrar los polímeros por condensación se da la siguiente reacción, en la cual se parte de la M-Fenilendiamina con la condensación con formaldehído.



Con el desarrollo de los intercambiadores de aniones tipo estireno, se hizo un gran avance en el intercambio iónico. Las más importantes ventajas de los polímeros por adición, son que tanto las resinas debilmente básicas y fuertemente básicas pueden ser fabricadas, y el grado de enlaces cruzados puede ajustarse fácilmente y reproducirse sin afectar los grupos iónicos. En comparación con la mayoría de los primeros polímeros por condensación son polifuncionales, y los enlaces cruzados y los grupos iónicos son interdependientes.

Una reacción básica para la obtención de resinas aniónicas es la que a continuación se muestra. [®]



Como puede apreciarse en ambos casos el grupo amigeno es el que dota a la matriz de sus propiedades de intercambio aniónico.

En esta reacción sólo se muestra la introducción de los grupos iónicos sin mencionar lo referente a los enlaces cruzados, ya que sólo queremos presentar la resina y los grupos iónicos y nó lo referen-

te a la química completa de la resina de intercambio porque ésto requeriría uno ó varios cursos completos.

Las primeras resinas, como mencionamos anteriormente, fueron polímeros por condensación. Estas resinas han sido casi completamente reemplazadas por los polímeros por adición, tanto las resinas intercambiadoras de cationes como las intercambiadoras de aniones.

Sin embargo, aún los mejores polímeros por adición de los intercambiadores de aniones que han sido preparados, no pueden competir con los intercambiadores de cationes, en lo que respecta a la estabilidad química y técnica, así como la vida útil de la resina.

Lo anterior se debe a que los grupos iónicos son menos estables, y también no es de extrañarse que la preparación de estos intercambiadores de aniones presente sus dificultades.

Sumarizando lo anterior, las resinas de intercambio catiónico e intercambio aniónico, consisten de una estructura molecular de hidrocarburos entrelazados tridimensionalmente, los cuales contienen los grupos ácidos ó básicos. La matriz puede ser formada por condensación ó por adición.

Los productos por adición han desplazado a los productos por condensación.

Los productos de condensación se dividen:

Débilmente ácido (Carboxílico)

Intermedio ácido (Fosfónicos)

Fuertemente ácido (Sulfónico)

En las resinas de intercambio aniónico también se dividen en:

Débilmente básicos (alkilaminas)

Fuertemente básicos (base cuaternario amonio)

Estas resinas se encuentran en forma geométrica, de acuerdo a su composición química, pero se adopta principalmente a la forma esférica.

V.- SELECTIVIDAD DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES

Los intercambiadores de iones, tanto como los inorgánicos como los orgánicos, son compuestos que tienen la característica de intercambio iónico sobre ciertos

iones, es decir que el intercambio iónico no se efectúa a el azar como pudiera suponerse.

En el intercambio iónico interviene tanto la naturaleza misma del intercambiador de iones, así como las soluciones que se van a poner en contacto con el intercambiador.

Los factores que afectan la selectividad de intercambio iónico, pueden sumarse a través de un razonamiento cualitativo como sigue:

- a) A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias el grado de intercambio iónico se incrementa con el incremento de la valencia de los iones.



- b) A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias y valencia constante, el grado de intercambio iónico se incrementa con el incremento del número atómico del ion intercambiante.

Los productos por adición han desplazado a los productos por condensación.

Los productos de condensación se dividen:

Débilmente ácido (Carboxílico)

Intermedio ácido (Fosfónicos)

Fuertemente ácido (Sulfónico)

En las resinas de intercambio aniónico también se dividen en:

Débilmente básicos (alkilaminas)

Fuertemente básicos (base cuaternario amonio)

Estas resinas se encuentran en forma geométrica, de acuerdo a su composición química, pero se adopta principalmente a la forma esférica.

V.- SELECTIVIDAD DE LOS INTERCAMBIADORES DE IONES

Los intercambiadores de iones, tanto como los inorgánicos como los orgánicos, son compuestos que tienen la característica de intercambio iónico sobre ciertos

iones, es decir que el intercambio iónico no se efectúa a el azar como pudiera suponerse.

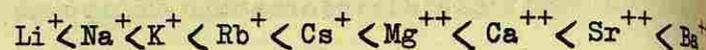
En el intercambio iónico interviene tanto la naturaleza misma del intercambiador de iones, así como las soluciones que se van a poner en contacto con el intercambiador.

Los factores que afectan la selectividad de intercambio iónico, pueden sumarse a través de un razonamiento cualitativo como sigue:

- a) A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias el grado de intercambio iónico se incrementa con el incremento de la valencia de los iones.



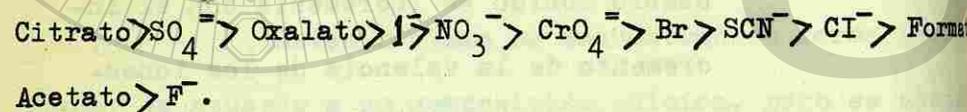
- b) A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias y valencia constante, el grado de intercambio iónico se incrementa con el incremento del número atómico del ion intercambiante.



c) A altas concentraciones, la diferencia en

los potenciales iónico de intercambio de diferente valencia (Na^+ versus Ca^{++}) disminuye y el ion de mas baja valencia tiene un potencial más alto de intercambio.

Por lo que respecta a las resinas intercambiadoras de aniones la selectividad es un poco más compleja ya que interviene un ion formado por varias partículas. La secuencia de las resinas de intercambio aniónico es como sigue:



Una explicación a este comportamiento es la característica eléctrica que poseen los iones al estar en solución. Los iones al ser partículas cargadas eléctricamente, tienden a rodearse con moléculas polares de solvente, lo cual da a cada ion un volumen solvatado equivalente dependiente de la carga eléctrica que posea el ion.

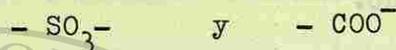
Así el intercambiador a bajas concentraciones, el intercambiador prefiere a los iones que poseen el más pequeño volumen solvatado.

Como podemos apreciar de lo anterior, las resinas tienen preferencia por iones de menor volumen, lo que quiere decir que interviene la estructura molecular del polímero que contiene a los grupos iónicos.

La estructura tridimensional se logra con los enlaces cruzados que se realizan con compuestos químicos en una relación adecuada para obtener una estructura no muy rígida, sino una estructura elástica que pueda contener en su interior moléculas de solvente, a través de las cuales se desplacen los iones intercambiantes. Por eso es tan importante el volumen molecular iónico solvatado. La solvatación de los iones dependerá única y exclusivamente de las cargas electrostáticas de cada ión.

Además de los anteriores factores, interviene la naturaleza del grupo iónico que se encuentra en la estructura molecular de la resina.

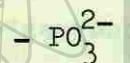
Los grupos iónicos de los intercambiadores de cationes comunmente son los siguientes:



Grupos sulfónicos y carboxílicos respectivamente.

También se han desarrollado recientemente resinas con grupos iónicos tales como:

Radical



Nombre

Fosfónico.

Fosfínico.

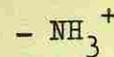
Arsénico.

Selénico.

Además se han sintetizado resinas con dos mas grupos iónicos que dotan a las resinas de características muy particulares.

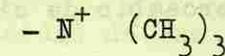
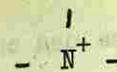
Los grupos iónicos de los intercambiadores de aniones más comunes son los siguientes:

Debilmente básicos:



Grupos Aminos.

Fuertemente básicos:



Bases Cuaternarias.

Se han desarrollado recientemente resinas con bases fuertes cuaternarias fosfónicas y grupos terciarios sulfónicas.



Grupos Fosfonio.



Grupos Sulfónio

Los anteriores grupos insertados en las macromoléculas de las resinas dan características de selectividad, y en la actualidad han sido objeto de muchas investigaciones.

VI.- APLICACION A TRATAMIENTO DE AGUA Y TERMINOLOGIA USADA.

El intercambio iónico se ha aplicado para la eliminación de impurezas tales como calcio y magnesio, (de-

nominado a estos dos cationes como dureza), por intercambio de ciclo sodio.

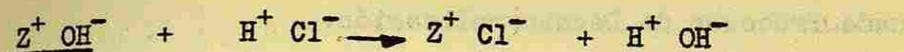


En el intercambio de ciclo sodio se usa cualquiera de los intercambiadores de cationes antes mencionados. Dicho proceso se conoce con el nombre de suavización.

Cuando se quiere eliminar a un mínimo los compuestos solubles que se encuentran en solución es necesario usar las resinas aniónicas y catiónicas en sus formas iónicas oxhidrilo e hidrógeno respectivamente.

Las resinas catiónicas, en su forma iónica hidrógeno intercambia los cationes metálicos por iones hidrógeno. Las resinas aniónicas en su forma aniónica oxhidrilo intercambia los aniones, complementarios de los cationes metálicos, por iones oxhidrilo.

En las siguientes reacciones se muestra el proceso fundamental de este intercambio iónico, llamado desmineralización ó desionización.



Este proceso se presentará de una forma más completa en el capítulo siguiente.

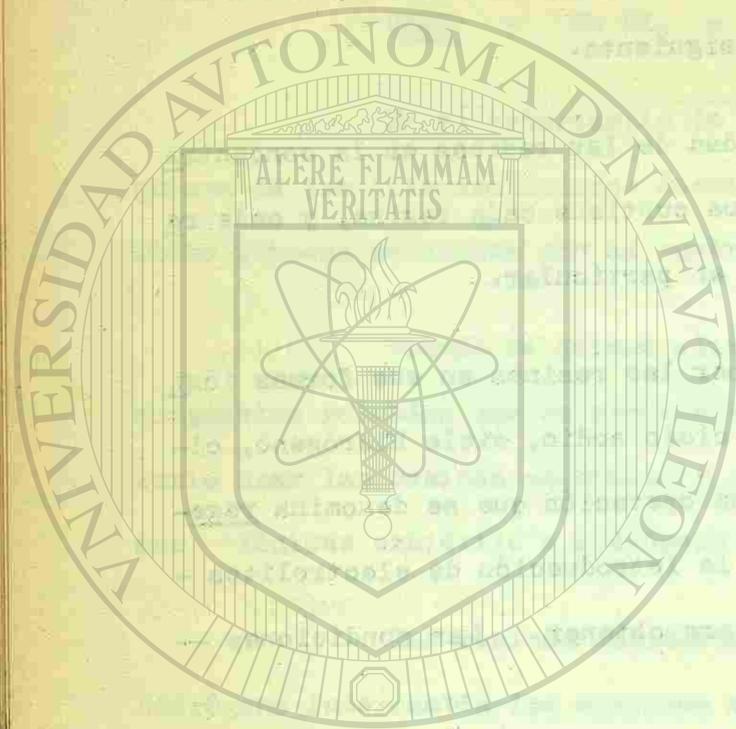
La capacidad de las resinas es la concentración de grupos iónicos que contiene cada resina, y cada resina tiene una capacidad en particular.

Para obtener las resinas en sus formas iónicas iniciales, es decir, ciclo sodio, ciclo hidrógeno, ciclo oxhidrico, se hace una operación que se denomina regeneración que consiste en la introducción de electrolitos a altas concentraciones para obtener las condiciones iniciales.

La alta concentración de las soluciones para regenerar efectúa un intercambio iónico en un sentido inverso al que sufren los intercambiadores de iones o bajas concentraciones.

Una exposición más completa sobre la desionización o desmineralización enfocado directamente al tratamiento de agua se efectuará en la segunda parte, denominada

nada Procesos de Desmineralización.



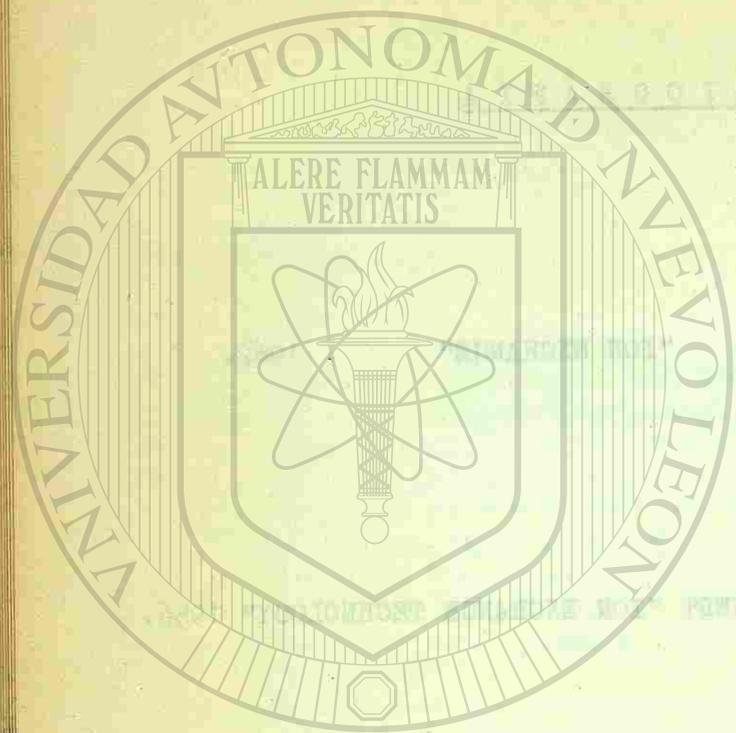
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOGRAFIA

1) F HELFFERICH "ION EXCHANGE" 1962.

2) F. C. NACHOD & J. SCHUBERT "ION EXCHANGE TECHNOLOGY" 1956.



PROCESO DE DESMINERALIZACION

POR

UANI

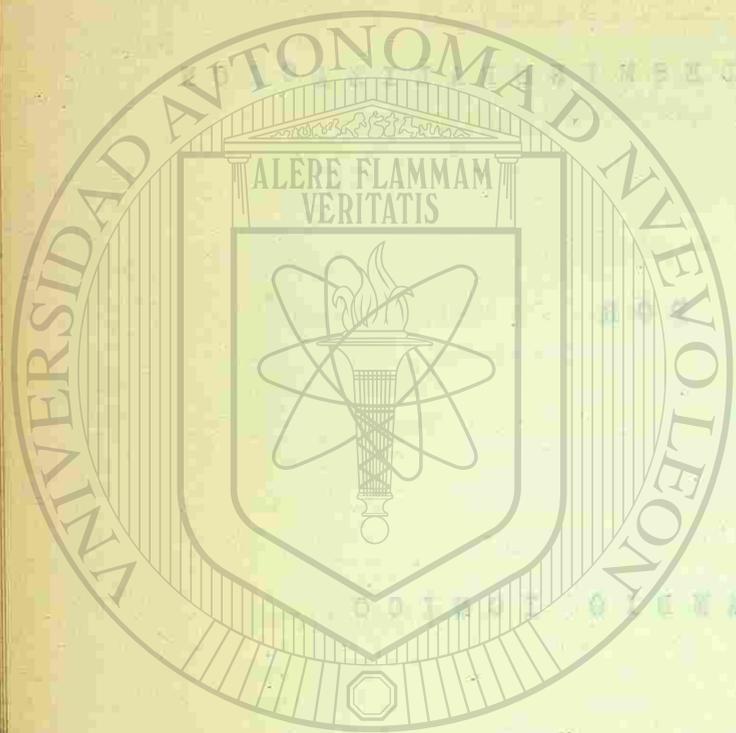
INTERCAMBIO IONICO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MARZO 1967.

POR EL ING. DANIEL ANDRADE LOPEZ.



CAPILLA ALFONSO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

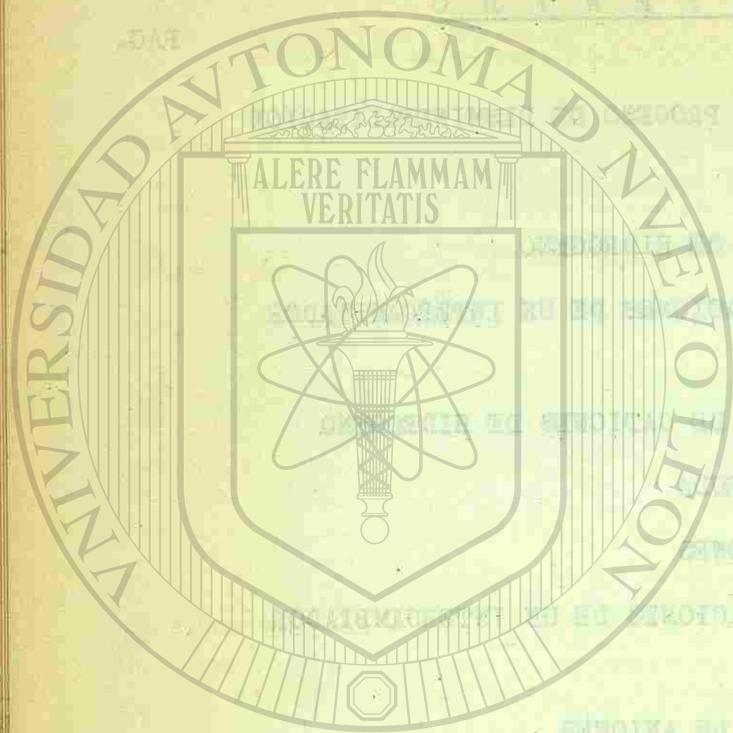
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

C O N T E N I D O

PAG.

DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO DE DESMINERALIZACION	
DEFINICION DE TERMINOS	
INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO	
DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE UN INTERCAMBIADOR DE CATIONES	
EQUIPO PARA INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO	
LIMITACIONES DEL AGUA CRUDA	
INTERCAMBIADORES DE ANIONES	
DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE UN INTERCAMBIADOR DE ANIONES	
EQUIPO PARA INTERCAMBIO DE ANIONES	
LIMITACIONES DEL AGUA ACIDA POR TRATAR	
DESMINERALIZADORES DE LECHO MEZCLADO	
SISTEMAS DESMINERALIZADORES	
CONCLUSIONES	





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

PROCESO DE DESMINERALIZACION POR INTERCAMBIO IONICO

SECCION I

DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO DE DESMINERALIZACION

La desmineralización es el proceso por medio del cual se remueven las sales minerales del agua a través del intercambio de iones. Solamente las sales que se ionizan en el agua se pueden remover por medio de este proceso. Con la mayoría de las aguas industriales es posible usar la desmineralización para remover las sales hasta casi el mismo punto obtenido en el proceso de destilación.

La desmineralización del agua es fundamentalmente un proceso de intercambio iónico de dos etapas:

En la primera etapa, una Zeolita intercambiadora de Cationes en la condición Hidrógeno intercambia iones H^+ por cationes metálicos (Calcio, Magnesio, Sodio) presentes en el agua.

Los aniones presentes en el agua no son intercambiados al pasar a través de la Zeolita intercambiado-

ra de Cationes.

El efluente del intercambiador de cationes contiene ácidos, el tipo y la cantidad de ellos dependen de los aniones presentes en el agua.

Cloruros, Sulfatos y Nitratos estarán en forma de sus correspondientes ácidos fuertes, Acido Clorídrico, Acido Sulfúrico y Acido Nítrico. Estos son comúnmente llamados Acidez Mineral Libre (AML).

Bicarbonatos y Carbonatos estarán en la forma de su correspondiente ácido débil; Acido Carbónico. Este se disocia para formar Agua y Bióxido de Carbono.

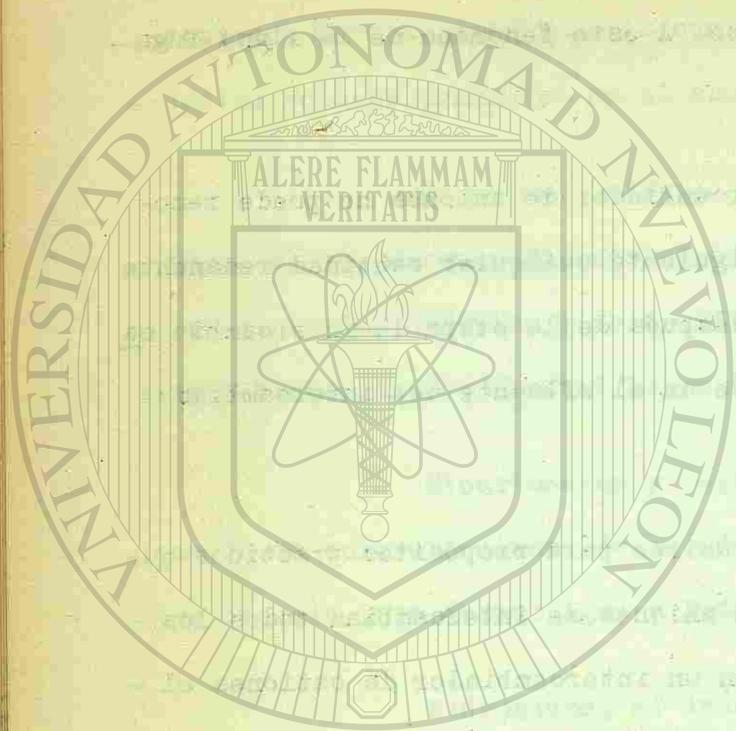
Hidróxidos, si inicialmente están presentes, se combinarán con los Hidrógenos para formar agua, por lo siguiente no dan como resultado ninguna acidéz.

En la segunda etapa, una Zeolita intercambiadora de aniones en la condición alcalina, remueve aniones en la forma de sus correspondientes ácidos previamente formados en el agua al pasar a través del intercambiador de Cationes.

La remoción de cationes metálicos en el intercambiador catiónico es generalmente incompleta. Un pequeño porcentaje de los cationes permanece en el efluente del intercambiador catiónico. A este fenómeno se le llama fuga de cationes.

Un intercambiador de aniones no puede remover cationes. Por consiguiente cualquier cantidad remanente de cationes metálicos después de la etapa de intercambio catiónico, estará presente en el efluente del intercambiador de aniones.

Puede asumirse para propósitos prácticos que en un intercambiador de aniones se intercambian todos los aniones, mientras que en un intercambiador de cationes el intercambio de éstos es mucho menos eficiente; por lo tanto, la calidad del efluente (electrolitos totales) de una instalación de desmineralización es esencialmente una función de la unidad o unidades Catiónicas.



CAPILLA ALFONSO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION II

DEFINICION DE TERMINOS

Las siguientes definiciones corresponden a - los términos comunmente utilizados en desmineralización relacionados con un análisis de agua:

Cationes Totales (CT)

Suma de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , H^+ todos como CaCO_3 .

Cationes Totales Metálicos (CTM)

Suma de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ todos como CaCO_3 .

Aniones Totales (AT)

Suma de HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$, OH^- , $\text{PO}_4^{=}$, Cl^-

$\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- todos como CaCO_3 .

Cationes totales deben ser iguales a Aniones Totales.

Acidez Mineral Teórica (AMT)

Suma de Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , todos como CaCO_3 .[®]

Los NO_3^- raramente están presentes en un análisis de agua.

Iones Totales Acidos (ITA)

Suma de AMT, CO_2 , SiO_2 todos como CaCO_3 .

Porcentaje de Sodio (% Na)

$$\% \text{ Na} = \text{ppm Na} \div \text{ppm CT.}$$

Porcentaje de Alcalinidad (% Alc)

$$\% \text{ Alc} = \text{ppm Alc A} \div \text{ppm AT.}$$

Porcentaje de Sulfatos (% SO₄)

$$\% \text{ SO}_4 = \text{ppm SO}_4 \div \text{ppm AMT.}$$

Electrolitos Totales (ET)

Los electrolitos son compuestos fuertemente ionizados y numéricamente iguales a la cantidad de los CT AT (no a la suma de ellos). SiO₂ y CO₂ siendo compuestos débilmente ionizados no se incluyen como electrolitos.

Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Disueltos (STD).

Estos términos generalmente incluyen la suma de ET y SiO₂. Sin embargo, ST algunas veces también incluye sólidos suspendidos (SS). Las garantías de una agua desmineralizada deberían estar siempre en términos de ET y no de STD.

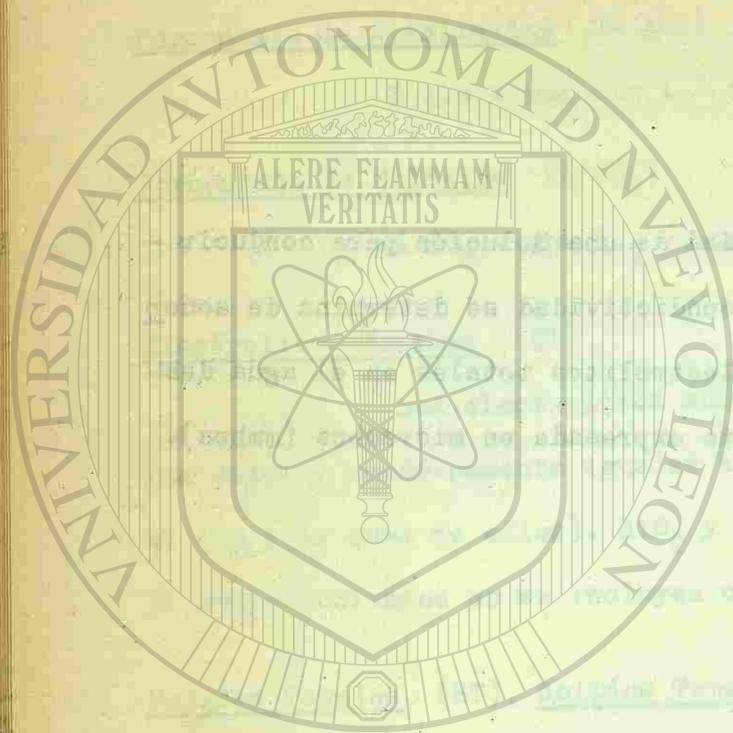
Fuga

Los electrolitos o la sílice que pasan a través de los intercambiadores catiónico y Aniónico debido a un incompleto intercambio iónico. La fuga de Sílice aumenta en la misma relación en que disminuye la relación entre ITA a SiO₂.

La habilidad de una Solución para conducir corriente eléctrica. La conductividad se determina de acuerdo con el contenido de electrolitos totales en el agua desmineralizada, generalmente expresada en micromhos (mmhos).

Conductividad

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



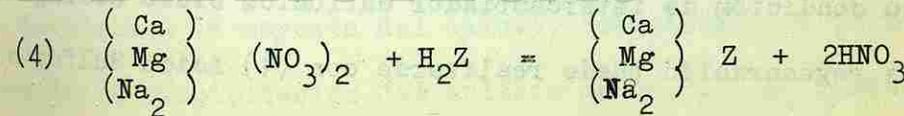
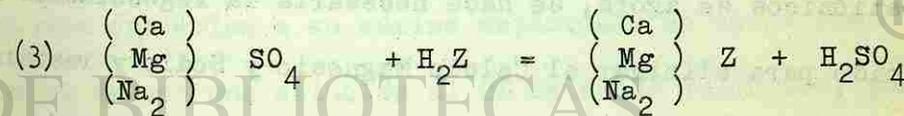
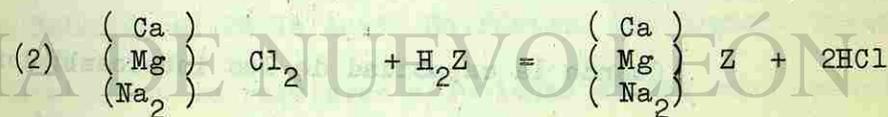
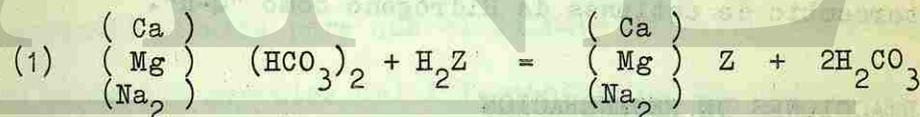
CAPILLA ALFONCINA

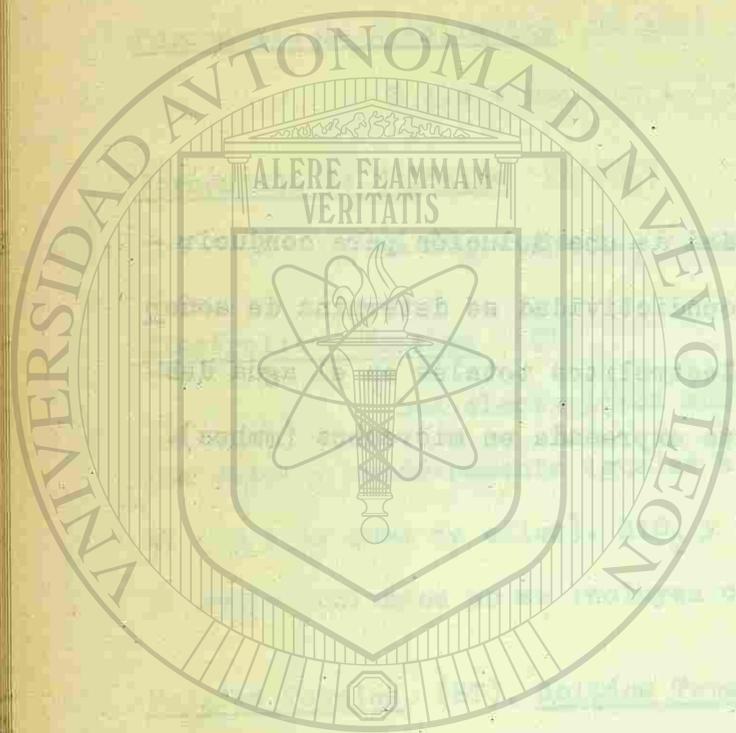
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION III

INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO

Intercambio de cationes de hidrógeno es el nombre dado al proceso por medio del cual los iones de calcio, magnesio y sodio, presentes en el agua, se intercambian por iones de hidrógeno, y por lo tanto los bicarbonatos, -- cloruros, sulfatos y nitratos se convierten a sus respectivos ácidos. Los ácidos formados son el ácido carbónico --- (H_2CO_3), el ácido clorhídrico (HCl), el ácido sulfúrico --- (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3). Usando el símbolo H_2Z para el material intercambiador de cationes de hidrógeno, las reacciones que forman estos ácidos son las siguientes:





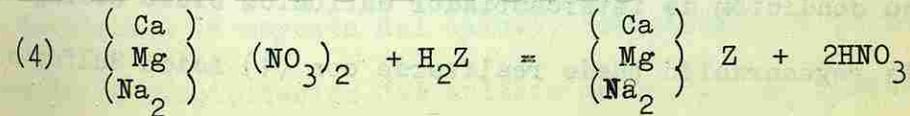
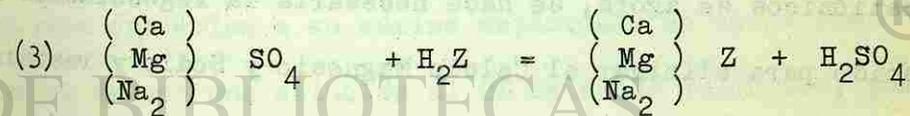
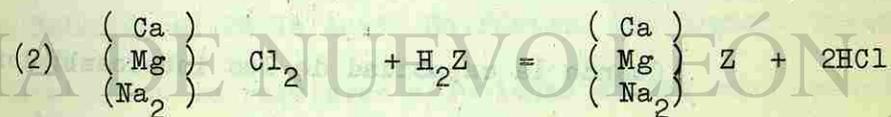
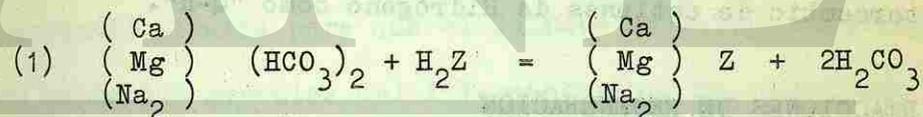
CAPILLA ALFONCINA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION III

INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO

Intercambio de cationes de hidrógeno es el nombre dado al proceso por medio del cual los iones de calcio, magnesio y sodio, presentes en el agua, se intercambian por iones de hidrógeno, y por lo tanto los bicarbonatos, -- cloruros, sulfatos y nitratos se convierten a sus respectivos ácidos. Los ácidos formados son el ácido carbónico --- (H_2CO_3), el ácido clorhídrico (HCl), el ácido sulfúrico --- (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3). Usando el símbolo H_2Z para el material intercambiador de cationes de hidrógeno, las reacciones que forman estos ácidos son las siguientes:



El ácido carbónico formado en la reacción 1, inmediatamente se rompe en agua y bióxido de carbono, dejando únicamente los ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico teóricamente en el efluente de una unidad intercambiadora de cationes de hidrógeno.

Este rompimiento del ácido carbónico se muestra en la siguiente reacción:

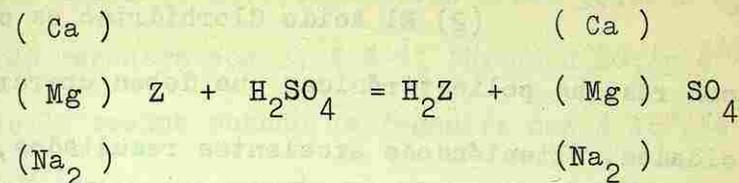


La unidad intercambiadora de cationes de hidrógeno, también conocida con el nombre de unidad de Zeolita de Hidrógeno, contiene una Resina Poliestirénica Sulfonada. En lo sucesivo nos referiremos a la resina Permutit Q en el intercambio de cationes de Hidrógeno como "Q-H".

REACCIONES DE REGENERACION

Cuando la capacidad de los intercambiadores cationicos se agota, se hace necesaria la regeneración con ácido para eliminar el Calcio Magnesio y Sodio y restaurar su condición de intercambiador cationico ciclo Hidrógeno. Esta regeneración puede realizarse con (1) Acido Sulfúrico (2) Acido Clorhídrico.

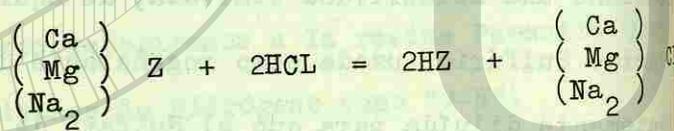
(1) El ácido Sulfúrico es generalmente el más ampliamente usado y el más barato, las reacciones que se suceden, en forma condensada, son las siguientes:



Como se indica en las reacciones anteriores, los productos resultantes son Sulfato de Calcio, Magnesio y Sodio. De estas sales el Sulfato de Magnesio y Sodio son muy solubles y no presentan dificultades para eliminarse del lecho al momento de enjuagarse éste. El sulfato de Calcio tiene una Solubilidad limitada, de aquí que la solución de Acido Sulfúrico usada como regenerante debe ser lo suficientemente diluida para que el Sulfato de Calcio no precipite sobre los gránulos del intercambiador. Se recomienda una Solución al 2% de Acido Sulfúrico. Con algunas resinas poliestirenas se requieren soluciones ácidas mucho más fuertes para operarlas a su máxima capacidad. En estos casos primero se usa una solución al 2% de ácido sulfúrico, que se desplaza a la mayoría del calcio, reduciendo los peligros de la precipitación del sulfato de calcio. El resto -

del ácido se añade a concentraciones crecientes hasta un máximo de 6%.

(2) El Acido Clorhídrico es comunmente usado con resinas poliestirénicas que deben operarse a altas capacidades, obteniéndose excelentes resultados, todos los productos de la regeneración son altamente solubles, por lo que pueden emplearse soluciones hasta de 15% de concentración durante todo el ciclo de regeneración sin peligro. El costo del ácido clorhídrico es mayor que el del sulfúrico. Las reacciones de regeneración con el ácido clorhídrico se pueden presentar en forma condensada como sigue:



CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO Y FUGA DE CATIONES

La capacidad de intercambio catiónico y la fuga de cationes con la resina "Q-H" ó cualquier otra resina poliestirénica sulfonada, dependen de lo siguiente: (2) por ciento de sodio en el total de cationes en el agua y (3) por ciento de alcalinidad en el total de aniones

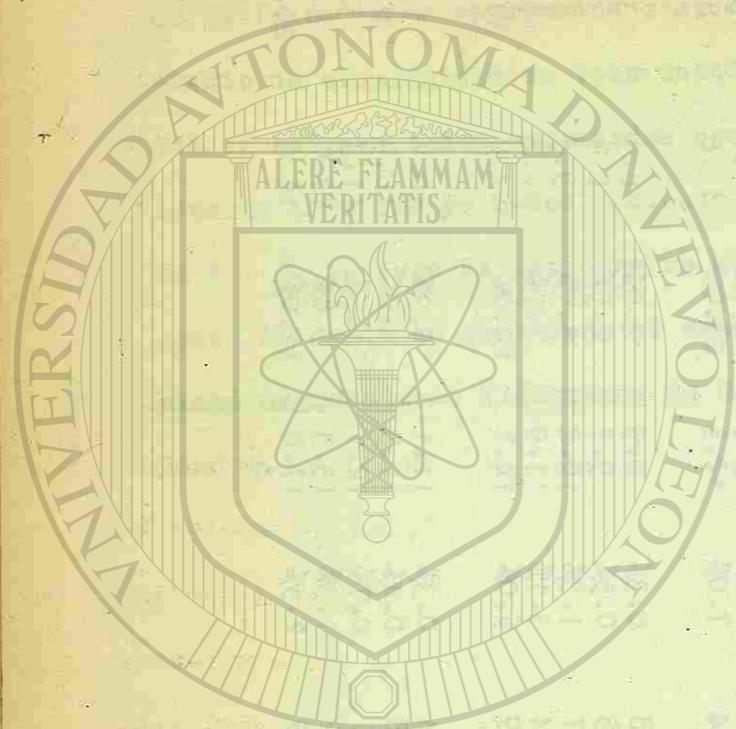
el agua cruda.

Con respecto a (1), en forma breve podemos decir que la "QH" se regenera con 3, 4 ó 6 lb. de H₂SO₄/pie³ y la capacidad de la resina cuando se regenera con 4 lb/pie³ es más ó menos 20% mayor que cuando se regenera con 3Lb./pie³ y cuando se regenera con 6 lb/pie³ la capacidad sería aproximadamente 45% mayor que cuando se regenera con 3 lb/pie³. - Asimismo, con cualquier agua, mientras más regenerante se use por unidad de volumen, la fuga de cationes será menor. - Esta resina también puede ser regenerada con 9 y 12 lb. de H₂SO₄/pie³.

Con respecto a (2), mientras más alto sea el porcentaje de cationes de sodio en relación con el total de cationes, será mayor la capacidad de la resina y mayor la fuga de cationes. Con respecto a (3), mientras más alto sea el porcentaje de alcalinidad en relación con el total de aniones, será más alta la capacidad de la resina y más baja la fuga de cationes. Estos resultados se muestran en la tabla adjunta, que dá las capacidades típicas de la "Q-H" cuando se regenera con 3, 4 y 6 lb. de H₂SO₄ 66°B Beaumé

por pie³ de resina (66° Beaumé es igual a 93.2% de H₂SO₄)
 El porcentaje de sodio se toma usando el sodio y el total
 de cationes todos expresados como CaCO₃, asimismo el por-
 ciento de alcalinidad se toma usando la alcalinidad y el
 total de aniones todos expresados como CaCO₃. Todo esto de-
 acuerdo a lo que ya hemos indicado anteriormente en la pa-
 na No. 3. La fuga de cationes se muestra en por ciento de
 total de cationes que tiene el agua cruda. Estando la ca-
 pacidad expresada en Kilogramos de CaCO₃ por pie³ de inter-
 biador.

Acido Sulfúrico Sodio	90% Alcalinidad		50% Alcalinidad		5% Alcalinidad	
	Kgr/pié ³	Fuga	Kgr/pié ³	Fuga	Kgr/pié ³	Fuga
10%	7.5	0.5%	7.0	2.7%	6.6	3.7%
30%	8.1	1.4%	7.5	3.9%	7.0	5.5%
50%	9.0	3.0%	8.3	6.0%	7.7	8.0%
70%	10.6	4.8%	9.9	12.1%	9.3	16.8%
90%	13.4	7.0%	12.5	29.0%	11.8	38.0%
10%	8.8	0.3%	8.5	2.0%	8.3	3.0%
30%	9.5	0.5%	9.2	2.5%	8.8	3.3%
50%	10.7	1.3%	10.2	3.5%	9.6	4.8%
70%	12.4	3.1%	11.9	7.7%	11.2	11.4%
90%	14.9	6.0%	14.5	20.0%	14.0	30.0%
10%	11.4	0.3%	11.1	0.9%	10.7	1.9%
30%	11.8	0.4%	11.5	1.0%	10.9	2.5%
50%	12.7	0.7%	12.1	1.5%	11.3	3.8%
70%	14.2	1.3%	13.3	3.8%	12.5	8.3%
90%	17.9	2.5%	17.0	12.0%	16.4	20.0%



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION IV

DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE UN INTERCAMBIADOR DE CATIONES.

A continuación se dará una breve descripción de las operaciones que se requieren en el funcionamiento de una unidad intercambiadora de cationes:

1. CICLO DE INTERCAMBIO IONICO

En esta operación se procede a hacer circular el agua cruda por tratar a través de un lecho de Zeolita de Hidrógeno. El agua circula por el lecho, de arriba hacia abajo, y a su paso por la Zeolita va intercambiando los Cationes Metálicos, Calcio, Magnesio y Sodio que contiene por los iones Hidrógeno de ésta, según se explica en las reacciones de la página No. 6. Lógicamente que a medida que va circulando el agua a través de la Zeolita, ésta se va empacando y a su vez va mermando su capacidad de intercambio de iones Hidrógeno; por consiguiente, cuando la Zeolita se agota completamente hay que restaurarla, para lo cual se procede a las siguientes dos operaciones:

2. CICLO DE LAVADO

Esta operación de lavado tiene por objeto lavar, separar, limpiar y clasificar hidráulicamente el lecho de zeolita del intercambiador catiónico, para lo cual se procede a introducir agua cruda a través de la Zeolita pero en sentido inverso al de la primera operación, es decir, de abajo hacia arriba y por un tiempo previamente determinado de aproximadamente 10 minutos. Esta agua posteriormente es enviada al drenaje.

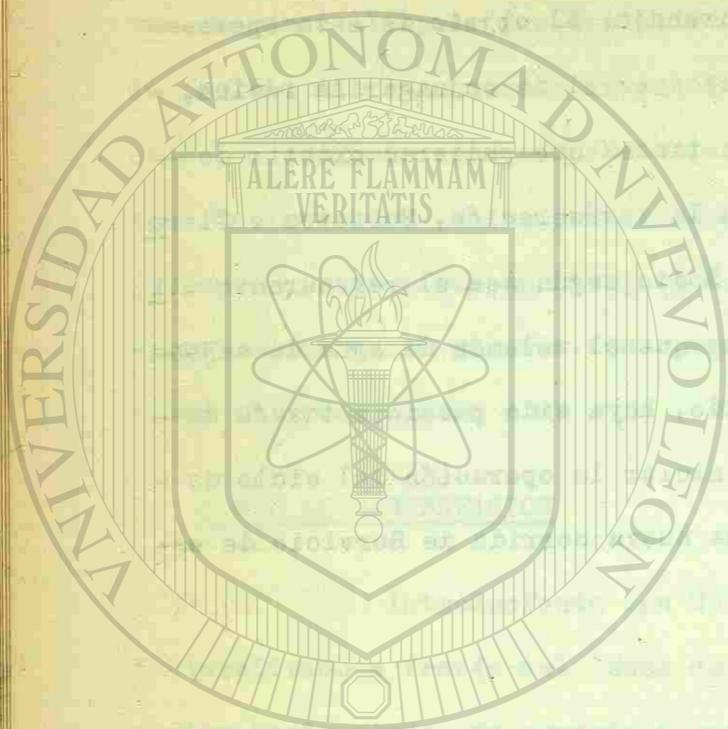
3. CICLO DE REGENERACION

Introduciendo una Solución de ácido Sulfúrico ó Clorhídrico a través del lecho de Zeolita en el sentido de arriba hacia abajo, se procede a restarzarle su capacidad de intercambio iónico, efectuándose las reacciones indicadas anteriormente y enviando los compuestos resultantes de estas reacciones al drenaje, una vez terminada ésta operación se procede a la siguiente:

4. CICLO DE ENJUAGUE

Nuevamente se vuelve a introducir agua cruda

en el mismo sentido que en el del ciclo de intercambio iónico, pero ésta agua, una vez que ha fluído a través del lecho de Zeolita es enviada al drenaje. El objeto de esta operación como su nombre lo indica es el de enjuagar la resina, eliminando así las últimas trazas que pudieran existir de los compuestos formados en la regeneración, Sulfatos o Cloruros de Calcio, Magnesio y Sodio según sea el regenerante utilizado. Finalmente, una vez que el volumen de agua de enjuague, previamente establecido, haya sido pasado a través de la Zeolita, se procede a iniciar la operación del ciclo de intercambio iónico para una nueva corrida de Servicio de esta unidad.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

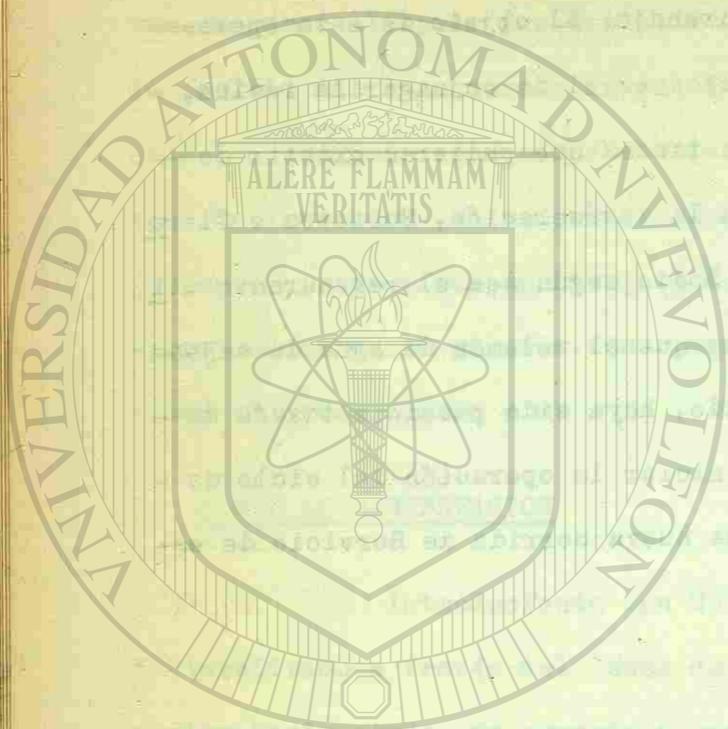
SECCION V

EQUIPO PARA INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO

El equipo utilizado para llevar a cabo el proceso de intercambio de cationes de hidrógeno consiste de los siguientes elementos que se enuncian a continuación:

TANQUES PARA INTERCAMBIO

Básicamente son recipientes verticales a presión consistentes de un cilindro de acero al carbón con dos tapas abombadas a un radio esférico igual al del diámetro del cilindro y con un espesor de material adecuado para resistir la presión requerida. Los recipientes standard se diseñan para una presión de 75 lbs. por pulg. cuadrada y las dimensiones comerciales varían entre 16" y 120" de diámetro, siendo la altura recta entre 5' y 12'. Los recipientes están recubiertos en su interior con hule, plastisol u otros recubrimientos a prueba de ácido. Las conexiones internas son de PVC u otros materiales a prueba de ácido y las tuberías y conexiones son de PVC ó fierro recubiertas interiormente de hule.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION V

EQUIPO PARA INTERCAMBIO DE CATIONES DE HIDROGENO

El equipo utilizado para llevar a cabo el proceso de intercambio de cationes de hidrógeno consiste de los siguientes elementos que se enuncian a continuación:

TANQUES PARA INTERCAMBIO

Básicamente son recipientes verticales a presión consistentes de un cilindro de acero al carbón con dos tapas abombadas a un radio esférico igual al del diámetro del cilindro y con un espesor de material adecuado para resistir la presión requerida. Los recipientes standard se diseñan para una presión de 75 lbs. por pulg. cuadrada y las dimensiones comerciales varían entre 16" y 120" de diámetro, siendo la altura recta entre 5' y 12'. Los recipientes están recubiertos en su interior con hule, plastisol u otros recubrimientos a prueba de ácido. Las conexiones internas son de PVC u otros materiales a prueba de ácido y las tuberías y conexiones son de PVC ó fierro recubiertas interiormente de hule.

BAJO DREN

En el fondo de los recipientes hay un sistema de bajo dren que sirve para coleccionar el agua ácida durante el ciclo de intercambio iónico, distribuir el agua de lavado durante el ciclo de lavado y remover la solución ácida y el agua de enjuague durante los ciclos de regeneración y enjuague.

Los diseños de bajo dren son variados, ya sea de placa deflectora o de cabezal con tubos laterales, los cuales necesitan cama soportante de la Zeolita, constituida de arena y grava graduada y el último diseño más práctico y eficiente es el de tipo de Falso Fondo con coladeras especiales.

LECHO INTERCAMBIADOR DE CATIONES

Encima del bajo dren se encuentra el lecho de Zeolita intercambiadora de cationes siendo la altura mínima de éste de 2' y máxima de 7'. Como el lecho se nivela y se regula hidráulicamente por medio de la operación de contralavado, las partículas más gruesas van al fondo del lecho y

más finas en la parte superior, con lo cual se asegura una resistencia uniforme y por lo tanto un flujo uniforme del agua a través del lecho. Por encima del lecho se encuentra el espacio libre necesario para la expansión del mismo que se efectúa durante el contralavado, separando las partículas de resina y soltando cualquier material insoluble que pueda haberse acumulado durante la corrida de Servicio. El espacio para la expansión se expresa como un por ciento de la profundidad del Lecho de Zeolita, siendo de un 75% para el caso específico de la Q-H.

COLECTOR SUPERIOR

En la parte superior de los recipientes se encuentra un colector superior que consiste de unas coladeras de discos de plástico, que tiene por objeto introducir y distribuir el agua cruda durante el ciclo de intercambio iónico y el enjuague y además coleccionar el agua del ciclo de lavado y entregarla al drenaje. La adecuada distribución del agua cruda es necesaria, de otra manera puede producirse un agujero en la parte superior del lecho y causar un flujo localizado debido a la menor resistencia que tendría este a través de la zona menos gruesa.

DISTRIBUIDOR DE REGENERANTE

A una distancia corta arriba de la superficie del Lecho de Zeolita se encuentra el sistema distribuidor de la Solución de ácido regenerante, el cual sirve para introducir y distribuir uniformemente el ácido sobre la Zeolita, de tal manera que todas las partes entren uniformemente con dicha solución.

TANQUE Y ADITAMENTOS PARA REGENERACION

Generalmente es utilizado un recipiente de acero al carbón, recubierto de hule, plastisol o plomo y en algunos casos este puede ser de polietileno. En este recipiente se prepara una solución de ácido, normalmente a una concentración del 20%, debe tenerse en cuenta que al preparar esta solución, el ácido debe ser agregado al agua y no el agua al ácido. Durante la regeneración el ácido al 20% concentración se succiona usando un eyector hidráulico el cual además de diluir la solución a la concentración adecuada (normalmente 2%) la introduce al Lecho de Zeolita por medio del distribuidor regenerante.

En el caso de que la solución se introduzca

por medio de una bomba en lugar de usar un eyector, se debe de preveer la manera de diluir la solución al 2% antes de introducirla al lecho de Zeolita, usando una línea de agua de difusión en la descarga de la bomba.

CONTROLES DE LAVADO Y ENJUAGUE

Es esencial que el lavado se efectúe al caudal especificado, debido a que un gasto de lavado bajo tiende a empacar el Lecho de Zeolita y uno muy alto puede mandar parte del material intercambiador de iones al drenaje. El caudal de lavado y enjuague se controlan normalmente por medio de una válvula macho.

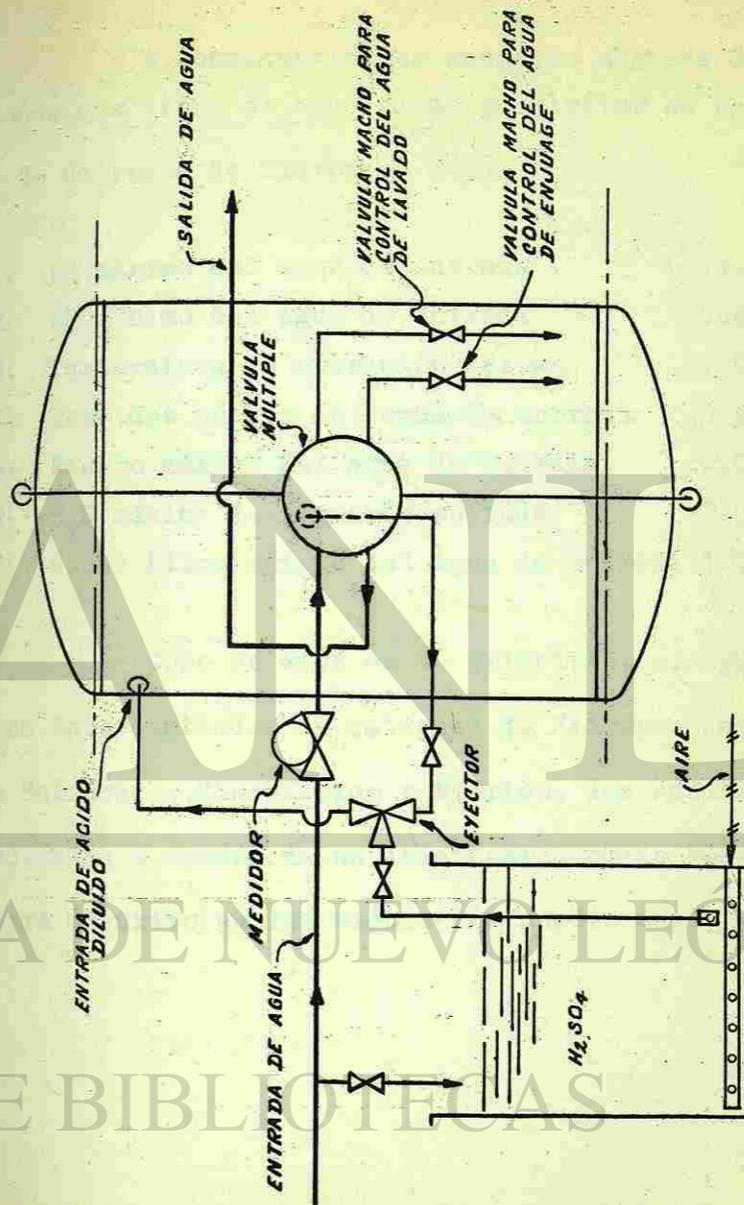
VALVULA DE PASO MULTIPLE

Esta válvula de paso Múltiple juega un papel muy importante en la mayoría de las unidades a presión que se usan hoy en día en el campo del tratamiento de agua, ya que puede ser utilizada no solo en estas unidades de intercambio iónico, sino también en Filtros, Purificadores de Carbón Activado, Suavizadores de Zeolita, etc. Esta válvula incorpora 6 puertos y un disco rotatorio por medio del cual

el agua que entra puede ser dirigida por distintos caminos para efectuar las distintas operaciones de los ciclos de intercambio iónico, lavado, regeneración (si existe), y enjuague. Antes de su introducción, estas operaciones se controlaban por medio de cinco válvulas individuales.

MEDIDOR DE CAUDAL

Este medidor de caudal es instalado en la tubería de entrada de agua cruda al intercambiador de cationes. Normalmente es un medidor Neptune de disco ó de cresta y tiene por finalidad indicarnos el momento en que el Lecho de Zeolita se ha agotado y requiere ser regenerado, cerrando un contacto y enviando una señal eléctrica que bien puede ser recibida por una alarma audible ó visual.



- CAMBIO POR CATIONICO EN CICLO HIDROGENO -

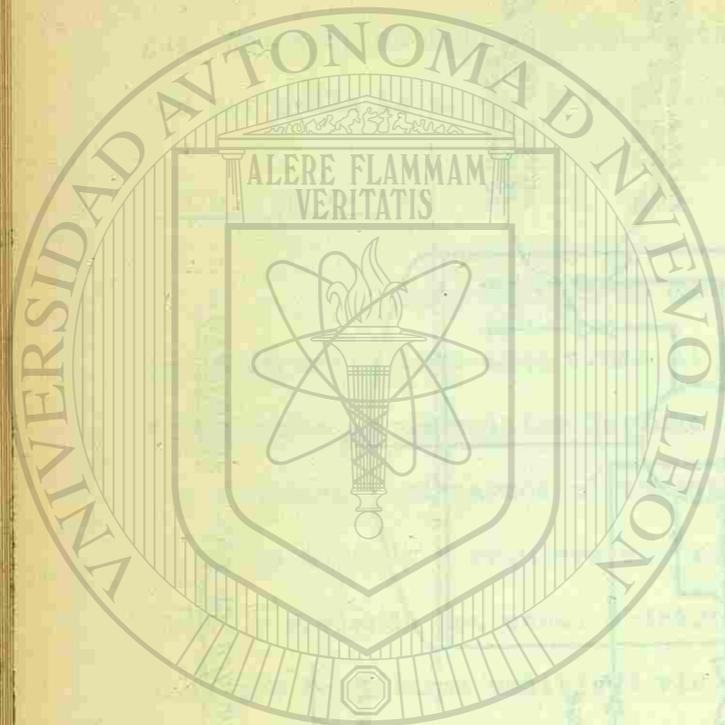
SECCION VI

LIMITACIONES DEL AGUA CRUDA

A continuación se enumeran algunas de las limitaciones que tiene el agua cruda por tratar en un intercambiador de Cationes de Hidrógeno Q-H:

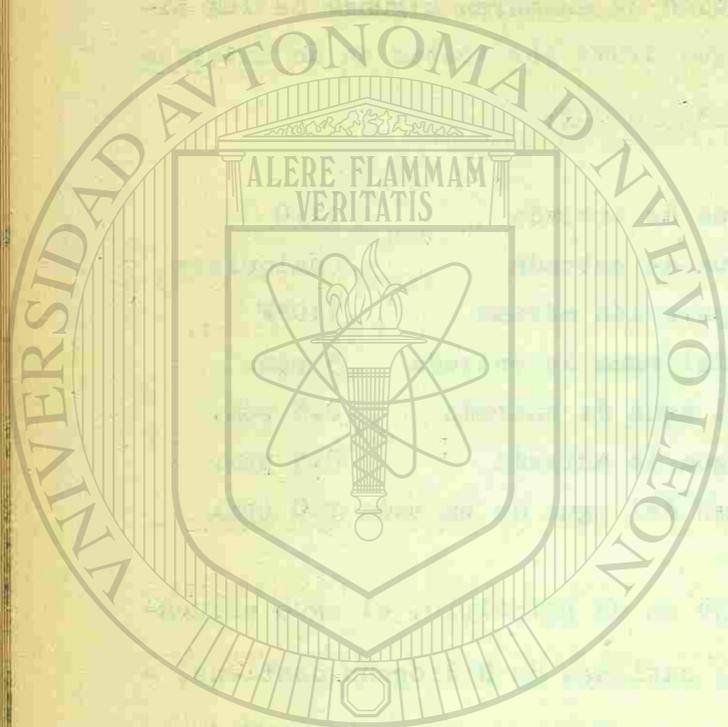
- | | |
|--|------------|
| 1. pH máximo del agua de entrada | 11.0 |
| 2. pH mínimo del agua de entrada | Cualquiera |
| 3. Temperatura de operación máxima | 110°F |
| 4. Turbidez máxima del agua de entrada | 5 ppm. |
| 5. Hierro máximo del agua de entrada | 0.5 ppm. |
| 6. H ₂ S máximo del agua de entrada | 0.5 ppm. |
| 7. Cloro Libre máximo del agua de entrada | 1.0 ppm. |

Como se dijo en un principio, el agua efluente de un intercambiador de cationes de Hidrógeno contiene, -- ácidos Sulfúrico, Clorhídrico y Nítrico, los cuales serán -- neutralizados a través de un intercambiador de aniones, el -- cual será descrito en los siguientes capítulos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION VII

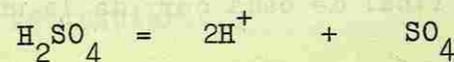
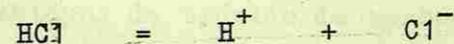
INTERCAMBIADORES DE ANIONES

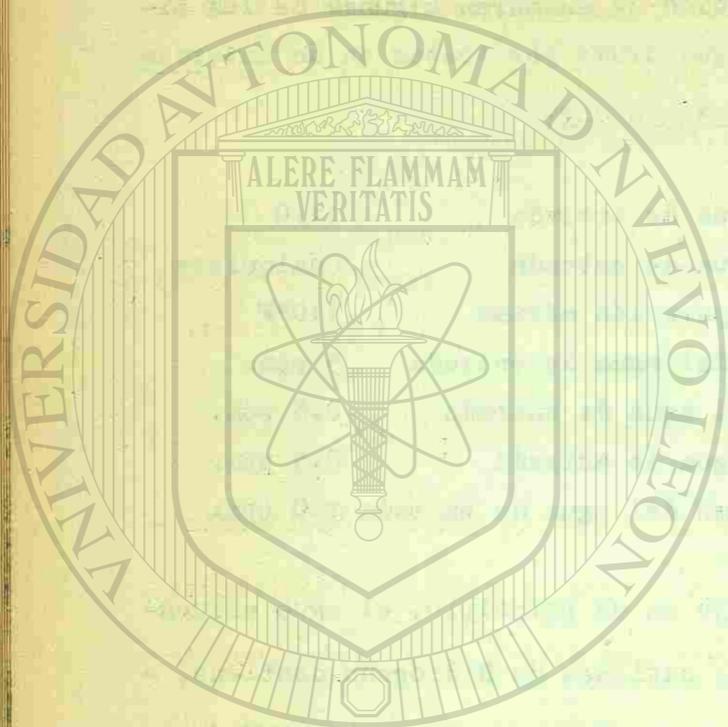
Existen tres tipos de intercambiadores de aniones que pueden usarse en el proceso de desmineralización y se pueden clasificar como sigue:

1. Intercambiadores de aniones debilmente básicos.
2. Intercambiadores de aniones de basicidad intermedio.
3. Intercambiadores de aniones fuertemente básicos.

INTERCAMBIADORES DE ANIONES DEBILMENTE BASICOS:

Los intercambiadores de aniones debilmente básicos se pueden usar para remover los ácidos fuertemente ionizables, pero no remueven los ácidos debilmente ionizables. Los ácidos fuertemente ionizables son los ácidos que en el agua tienden a disociarse fácilmente en sus componentes catiónicos y aniónicos. Los principales ácidos fuertemente ionizables en el agua son el Clorhídrico, Sulfúrico y Nítrico. Estos ácidos fácilmente se disocian en el agua de la siguiente manera:





CAPILLA ALFONCINA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION VII

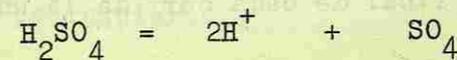
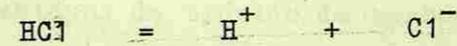
INTERCAMBIADORES DE ANIONES

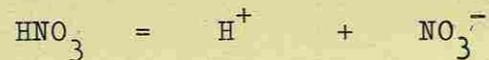
Existen tres tipos de intercambiadores de aniones que pueden usarse en el proceso de desmineralización y se pueden clasificar como sigue:

1. Intercambiadores de aniones debilmente básicos.
2. Intercambiadores de aniones de basicidad intermedio.
3. Intercambiadores de aniones fuertemente básicos.

INTERCAMBIADORES DE ANIONES DEBILMENTE BASICOS:

Los intercambiadores de aniones debilmente básicos se pueden usar para remover los ácidos fuertemente ionizables, pero no remueven los ácidos debilmente ionizables. Los ácidos fuertemente ionizables son los ácidos que en el agua tienden a disociarse fácilmente en sus componentes catiónicos y aniónicos. Los principales ácidos fuertemente ionizables en el agua son el Clorhídrico, Sulfúrico y Nítrico. Estos ácidos fácilmente se disocian en el agua de la siguiente manera:

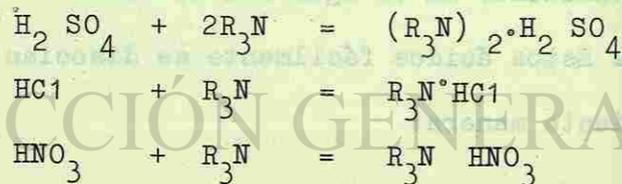




Los ácidos debilmente ionizables son aquellos ácidos que no se disocian fácilmente en sus componentes catiónicos y aniónicos, sino en vez de eso, fácilmente se rompen en sus componentes no-iónicos. Los principales ácidos debilmente ionizables en el agua son el carbónico y el silfúico. En estos ácidos se muestra un rompimiento de la siguiente manera:



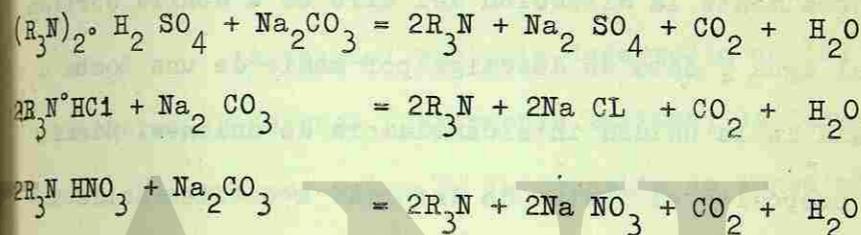
Usando el símbolo R_3N para los intercambiadores de aniones debilmente básicos, las reacciones envueltas en la remoción de ácidos fuertemente ionizables en la operación de servicio de un intercambiador de aniones debilmente básico se puede escribir como sigue:



Al final de cada corrida la unidad interca-

biadora de aniones debilmente básica se contralava, se regenera con una solución de ceniza de sosa (Na_2CO_3), se enjuaga y se regresa al servicio.

Las reacciones de la regeneración se pueden describir como sigue:



Como los ácidos debilmente ionizables no se remueven por medio del intercambiador de aniones debilmente básico, el afluyente contiene la misma cantidad de Sílice que el agua cruda, y un contenido de bióxido de carbono correspondiente al formado en su paso a través de la unidad catiónica más el contenido original de bióxido de carbono. La mayoría de este bióxido de carbono se puede remover por medio de un desgasificador, ó hasta cierto límite, donde las cantidades de agua son relativamente pequeñas, en un descarbonador, dejando residuos de bióxido de carbono de menos de 10 ppm según lo que se requiera.

El principio de funcionamiento de los desgasificadores y decarbonatadores básicamente consiste en eliminar una determinada cantidad de bióxido de carbono del agua (en este caso procedente de la unidad intercambiadora de cationes) mediante el mezclado íntimo de esta agua y el aire suministrado por un ventilador integral a estas unidades. Generalmente la dirección del aire es a contra corriente con el agua y ésta se descarga por medio de una bomba a la entrada de la unidad intercambiadora de aniones. Siendo nuestro propósito el tratar de informar a ustedes sobre intercambio iónico, no entraremos en detalles con este tipo de unidades.

INTERCAMBIADORES DE ANIONES DE BASICIDAD INTERMEDIA

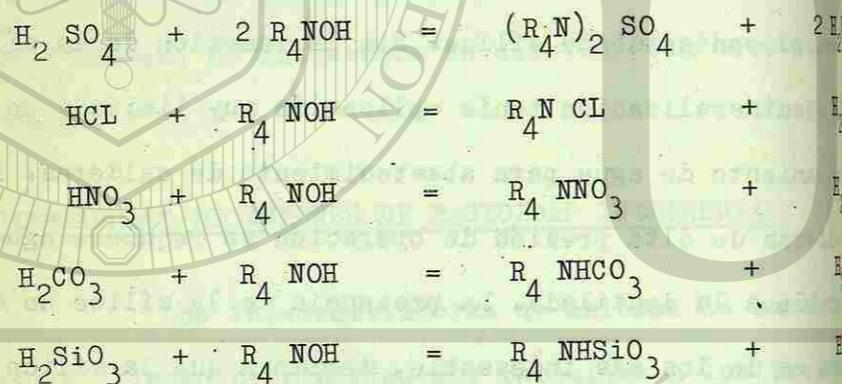
Los intercambiadores de aniones de basicidad intermedia, tienen propiedades muy parecidas a los intercambiadores de aniones debilmente básico y se pueden usar para remover los ácidos fuertemente ionizables. Se diferencian, sin embargo, en que se regeneran con sosa cáustica en vez de ceniza de sosa. Debido a su basicidad intermedia, estos intercambiadores de aniones, toman algo del bióxido de carbono

y por lo tanto, si el contenido de bióxido de carbono excede de 10 ppm, la dosificación del regenerante deberá de aumentarse, ó si se usa un desgasificador, éste debe de colocarse antes del intercambiador de aniones de basicidad intermedia.

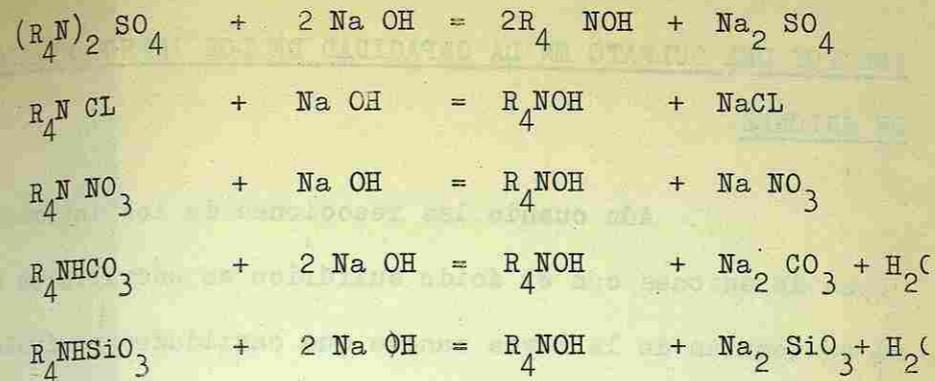
INTERCAMBIADORES DE ANIONES FUERTEMENTE BASICOS

Antes del reciente desarrollo de los intercambiadores de aniones fuertemente básicos, la desmineralización del agua por medio de intercambio de iones no reducían el contenido de sílice. Sin la remoción de la sílica, la desmineralización tenía aplicación muy limitada en el Tratamiento de agua para abastecimiento de calderas. Para calderas de alta presión de operación se requiere agua comparable a la destilada. La presencia de la sílice en dicha agua es de los más indeseable, debido a que la sílice puede permitir la formación de incrustaciones en los tubos ó vaporizarse con el vapor y producir incrustaciones en las aspas de la turbina. Por lo tanto, es necesario que el agua desmineralizada, tenga un bajo contenido de sílice para que pueda ser útil en abastecimiento de calderas.

Los intercambiadores de aniones fuertemente básicos se diferencian de los intercambiadores de aniones debilmente básicos, en que los primeros no solamente remueven los ácidos fuertemente ionizables, sino también remueven los ácidos debilmente ionizables. Usando el símbolo R_4NOH para los intercambiadores de aniones fuertemente básicos, las reacciones envueltas en la remoción de ambos ácidos, los fuertemente y debilmente ionizables durante la corrida se pueden escribir de la siguiente manera:



Al final de la corrida, la unidad intercambiadora de aniones fuertemente básica se contralava, se regenera con una solución de sosa cáustica (NaOH), se enjuaga y regresa al servicio. Las reacciones de regeneración se pueden escribir de la siguiente manera:



Aún cuando los intercambiadores de aniones fuertemente básicos pueden remover el ácido carbónico, es más barato removerlo como bióxido de carbono ($H_2CO_3 = CO_2 + H_2O$) por medios mecánicos, en vez de removerlo por medios químicos. Por lo tanto, en la mayoría de las plantas desmineralizadoras de intercambio de iones, el bióxido de carbono del efluente ácido del intercambiador de cationes de hidrógeno, que se usa en el primer paso del proceso, se remueve por medio de un desgasificador, o tanque decarbonatador antes de entrar a la unidad intercambiadora de aniones fuertemente básico. Las excepciones a esto, son en las aguas que se desmineralizan pero su contenido de alcalinidad de bicarbonato o carbonato es muy reducida y en la desmineralización de cantidades relativamente pequeñas de agua.

EFFECTOS DEL SULFATO EN LA CAPACIDAD DE LOS INTERCAMBIADORES DE ANIONES.

Aún cuando las reacciones de los intercambiadores de aniones con el ácido sulfúrico se escribieron como si se tomaran de la misma manera que cantidades equivalentes de ácido clorhídrico ó nítrico, también se toman, hasta cierto punto, como si solamente uno de sus dos cationes de hidrógeno fueran ácidos. La capacidad de todos estos intercambiadores de aniones es por lo tanto mayor para el ácido sulfúrico que para cantidades equivalentes de ácido clorhídrico ó nítrico, como se muestra en la siguiente Tabla, de la que el sulfato se expresa como por ciento de acidéz mineral Teórica (cloruros + sulfatos + nitratos) todos expresados como Ca CO_3 .

Ti
Interc
de A

Fuertem
Bási
Tipo
(per,ut

Fuertem
Bási
Tipo
(Permut

Basic
Interme
(Permut

Debilme
Bási
(De-Aci

+ Con
nerante
bono en
ppm; y

Bás
quedars
bras, l
ser en

n
-
li
si
le
fi
-
e
an
-
re
-
n
áus

CAPACIDADES DE INTERCAMBIADORES DE ANIONES TÍPICOS

Capacidad en Kgr./pie³ de 0% a 100% de Sulfato

Tipo Intercambiadores de Aniones	Regenerante (Lb./pie ³)	Capacidad en Kgr./pie ³ de 0% a 100% de Sulfato					
		0%	20%	40%	60%	80%	100%
Fuertemente Básico Tipo 1 (permutit S-1)	22 Lb. NaOH	5.8	6.2	6.5	7.0	7.3	7.6
	2.5 " "	6.6	7.0	7.4	8.0	8.3	8.6
	3 " "	7.5	7.9	8.4	9.0	9.4	9.7
	4 " "	8.7	9.2	9.8	10.5	10.9	11.3
	5 " "	9.6	10.1	10.7	11.5	12.0	12.4
	6 " "	10.0	10.6	11.2	12.0	12.5	13.0
Fuertemente Básico Tipo 2 (Permutit S-2)	3 " "	11.4	11.5	11.6	12.0	12.7	13.8
	4 " "	13.3	13.4	13.6	14.0	14.8	16.1
	5 " "	14.3	14.4	14.6	15.0	15.9	17.3
	6 " "	15.2	15.3	15.5	16.0	17.0	18.4
	8 " "	16.2	16.3	16.5	17.0	18.0	19.6
	10 " "	17.1	17.3	17.5	18.0	19.1	20.7
Basicidad ⁺ Intermedia (Permutit A)	3.2, 4.0 ó 4.5 Lb. Na Oh	16.0	17.3	18.5	20.0	20.7	21.2
Debilitante Básico (De-Acidite)	4.2 Lb. de Na ₂ CO ₃	13.1	14.3	15.6	17.0	18.3	20.1

+ Con el intercambiador de aniones de basicidad intermedia, la dosificación del regenerante usado, sosa cáustica, en Lb./pie³, es de 3.2 si el contenido de bióxido de carbono en el influente de la unidad aniónica es de 10 ppm ó menor; 4.0 si es de 10 a 50 ppm; y 4.5 si es de 50 a 100 ppm.

Básicamente, no hay fuga de aniones, excepto por supuesto, los aniones que deben de quedarse en solución para balancear eléctricamente la fuga de cationes. En otras palabras, la fuga de cationes determina ambas fugas, la de cationes y aniones y tienen que ser en la misma cantidad si ambos se expresan como CaCO₃.

EF

DE

do

si

te

ci

hi

ca

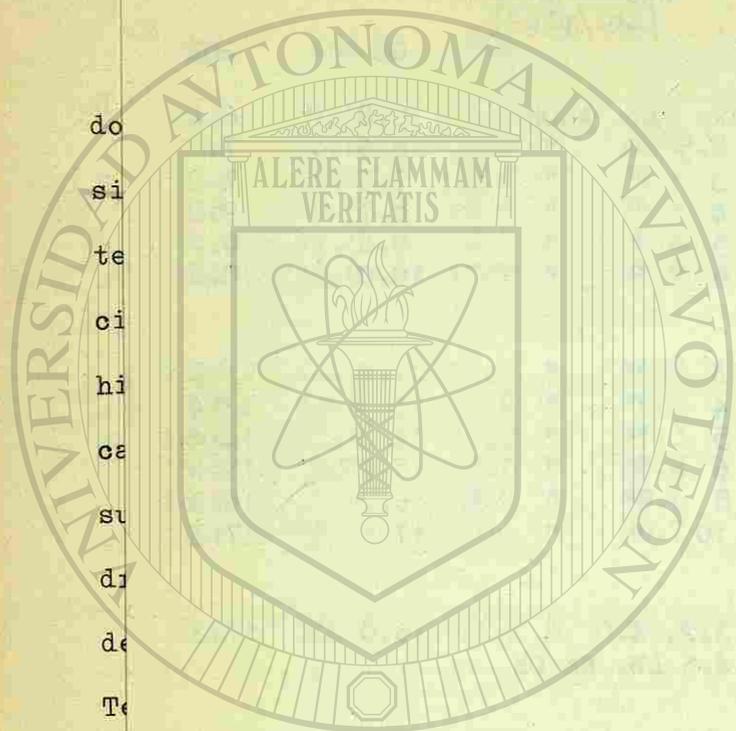
su

di

de

Te

c



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

VARIABLES PARA REMOCION DE SILICE

El contenido de sílice en el efluente de un intercambiador de aniones, depende de las siguientes 4 variables entre 0.02 ppm y 2.00 ppm aproximadamente como sílice:

1. Relación de iones ácidos totales a la sílice (IAT/SiO_2). Si esta relación es elevada, la remoción de sílice será más eficiente que si esta relación es baja.

2. Dosificación del regenerante.

Cuando más alta sea la dosificación de la sosa cáustica, el efluente de sílice será más bajo.

3. Temperatura de la solución del regenerante. El uso de una solución caliente de sosa cáustica ($100^{\circ}-130^{\circ}F$) para la regeneración, permite una mejor eficiencia en la remoción de sílice, comparada con la regeneración con solución de sosa cáustica a temperatura ambiente.

4. Uso del intercambiador de aniones.

- Como se mostró con anterioridad, los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 2, tienen más alta capacidad y por lo tanto, más alta eficiencia de regenerante que los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 1. Sin embargo, los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 1 tienen una mayor afinidad a la sílice y deben de usarse cuando se requiere una remoción de la sílice crítica.

SECCION VIII

DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE UN INTERCAMBIADOR DE ANIONES

Las operaciones que se requieren en el funcionamiento de una unidad intercambiadora de aniones son -- las mismas que se explicaron en el Capítulo IV, claro que -- aplicadas al intercambio de aniones.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4. Uso del intercambiador de aniones.

- Como se mostró con anterioridad, los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 2, tienen más alta capacidad y por lo tanto, más alta eficiencia de regenerante que los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 1. Sin embargo, los intercambiadores de aniones fuertemente básicos del Tipo 1 tienen una mayor afinidad a la sílice y deben de usarse cuando se requiere una remoción de la sílice crítica.

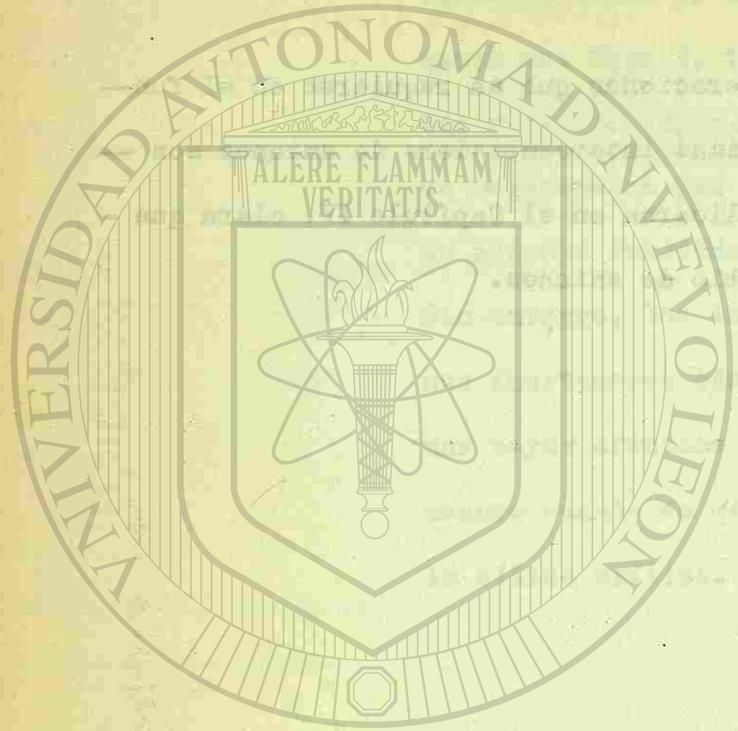
SECCION VIII

DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES DE UN INTERCAMBIADOR DE ANIONES

Las operaciones que se requieren en el funcionamiento de una unidad intercambiadora de aniones son -- las mismas que se explicaron en el Capítulo IV, claro que -- aplicadas al intercambio de aniones.

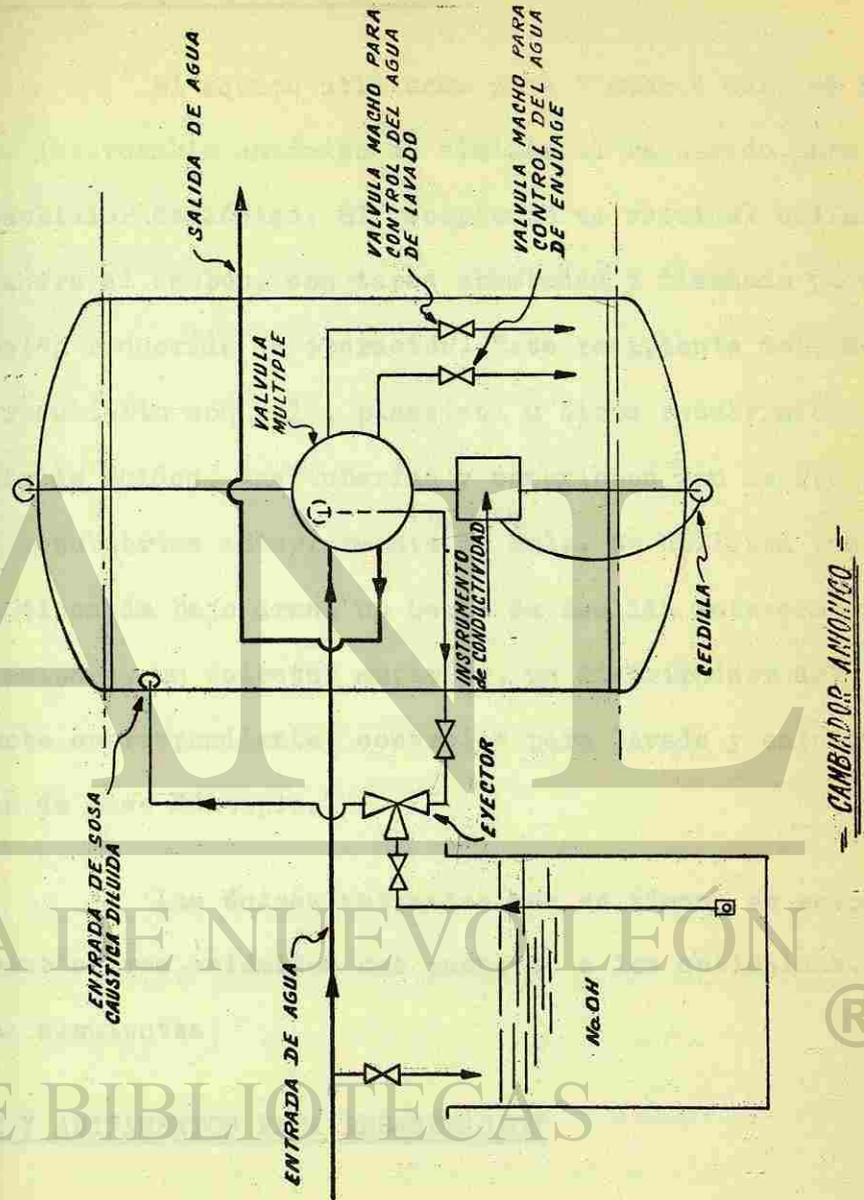
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

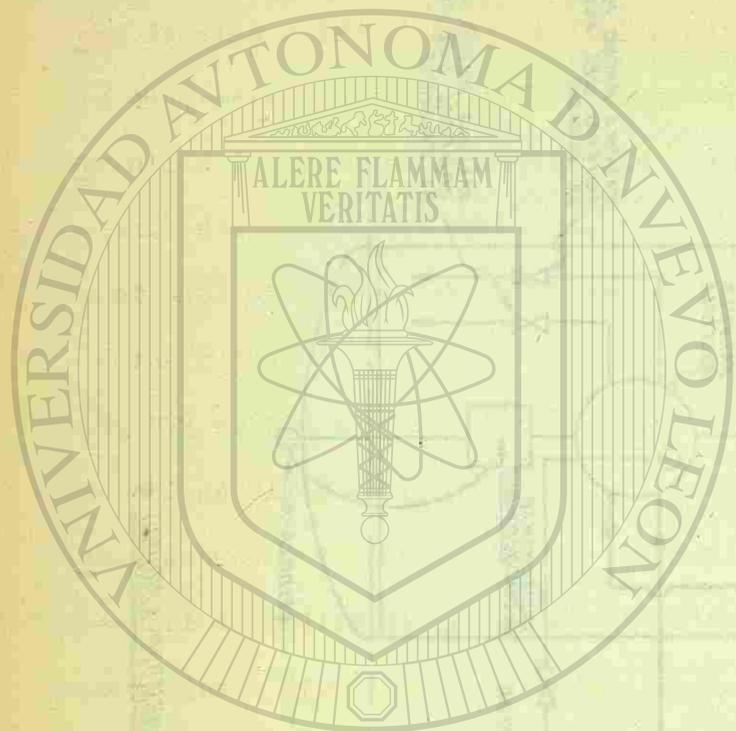
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION IX

EQUIPO PARA INTERCAMBIO DE ANIONES

El equipo utilizado para llevar a cabo el proceso de intercambio aniónico es similar al requerido para el intercambiador catiónico. El recipiente es vertical cilíndrico de acero al carbón, con tapas abombadas y diseñado para la presión requerida de operación. Este recipiente debe de estar recubierto con hule, plastisol u otros recubrimientos a prueba de ácidos, las tuberías y conexiones son de PVC y/o fierro recubiertas interiormente de hule. Se utilizan los mismos tipos de bajo dren, un lecho de Zeolita intercambiadora de aniones, un colector superior, un distribuidor del regenerante correspondiente, controles para lavado y enjuague, válvula de paso Múltiple.

Las únicas variantes que se tienen en estos intercambiadores aniónicos con respecto a los catiónicos, son las siguientes:

TANQUE Y ADITAMENTOS PARA REGENERACION

El recipiente utilizado en este caso es cons-

truido de acero al carbón sin requerirse ningún recubrimien-
to anticorrosivo, aunque algunas veces se suministra de po-
liétileno únicamente por economía. En este recipiente se
prepara una solución alcalina de Ceniza de Sosa o de Sosa-
Cáustica según sea la naturaleza de la Zeolita aniónica, a
una concentración del 16% normalmente, la solución al 16%
es succionada por medio de un eyector hidráulico, diluida
al 5% e introducida al Lecho de Zeolita por medio del dis-
tribuidor de regenerante. Las mismas recomendaciones indica-
das anteriormente, en el caso del uso de una bomba para la
introducción del regenerante.

MEDIDOR DE CAUDAL E INSTRUMENTO DE CONDUCTIVIDAD

El final del ciclo de intercambio de aniones
de estas unidades es controlado normalmente por medio de un
medidor de caudal instalado en el influente de la unidad in-
tercambiadora de cationes previamente mencionado. Este final
del ciclo también se puede verificar por medio de un instru-
mento de conductividad instalado en el efluente de la unidad
intercambiadora de aniones, aunque el propósito principal de
este instrumento es determinar el final del ciclo de enjua-
gue de esta unidad, así indicado por el valor de la conducti-
vidad en micromhos.

SECCION X

LIMITACIONES DEL AGUA ACIDA POR TRATAR

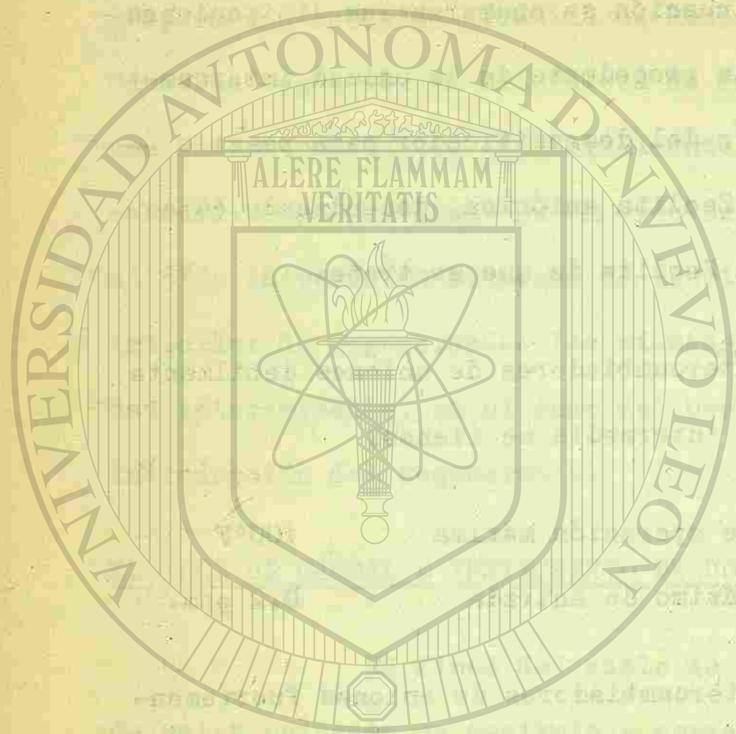
A continuación se enumeran las limitaciones
que tiene el agua ácida procedente de la unidad intercam-
biadora de cationes y/o del desgasificador para pasar a
través de un Lecho de Zeolita aniónica, dependiendo éstas
de la naturaleza de la Zeolita de que se trate:

Para intercambiadores de aniones debilmente
básicos y de basicidad intermedia se tienen:

1. Temperatura de operación máxima 100°F
2. Cloro libre máximo de entrada 0.2 ppm.

Para intercambiadores de aniones fuertemen-
te básicos se tienen:

1. Temperatura de operación máxima 120°F
2. Cloro Libre máximo de entrada 0.5 ppm.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION XI

DESMINERALIZADORES DE LECHE MEZCLADO

Como se mencionó en el Capítulo I, la desmineralización es un proceso de intercambio iónico de dos etapas, las unidades que hemos descrito anteriormente como Catiónicas y Aniónicas efectúan la desmineralización del agua en dos etapas separadas una de la otra, sin embargo, este mismo proceso se puede llevar a cabo en dos etapas pero en una sola unidad de lecho mezclado, este lecho consiste de una mezcla íntima de resina poliestirénica sulfonada trabajando en el ciclo hidrógeno y una resina aniónica fuertemente básica. A medida que el agua fluye por este lecho, interviene en una profusión de contactos alternantes entre la resina catiónica y aniónica. De aquí que, la unidad de lecho mezclado, ya se use sola o como unidad de acabado, efectúa una remoción tan completa de los electrolitos del agua, que la concentración de sólidos en el efluente es menor de 1 ppm.

Al final del ciclo de operación de la unidad de Lecho mezclado, las resinas catiónica y aniónica deben ser separadas antes de poderse regenerar. Esta operación se

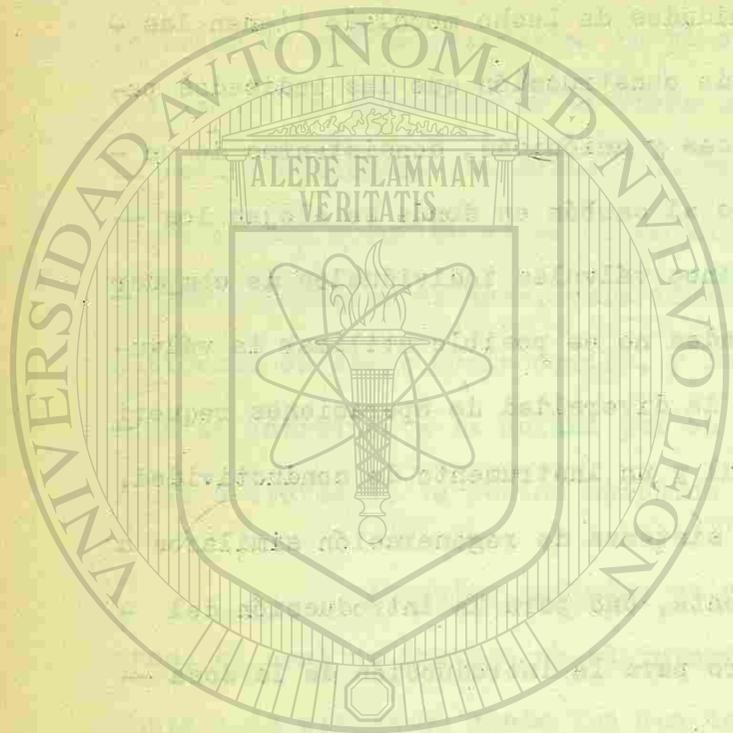
efectúa controlando el ciclo de lavado, el que debido a la baja densidad específica de la resina aniónica, separa las dos resinas en una capa superior de resina aniónica y una inferior de resina catiónica. En el ciclo de regeneración, los lechos se regeneran en la misma unidad simultáneamente, la resina catiónica con ácido y la resina aniónica con sosa cáustica. La solución de ácido se introduce a la unidad por la parte inferior de ésta, para fluir a través de la resina catiónica de abajo hacia arriba, y la solución de sosa cáustica se introduce a la unidad por su parte superior para fluir a través de la resina aniónica de arriba hacia abajo.

En estas unidades existe un colector de interface, el cual se instala en el interior de estas, precisamente a la altura en donde los dos lechos de resinas están separados uno del otro. El objeto de este accesorio es el de colectar las dos soluciones de ácido y sosa, después de haber fluído a través de su correspondiente lecho de resina, para enviarlas al drenaje.

Después de que los lechos se enjuagan y se dejan libres de exceso de reactivos, se sopla a través de estas una corriente de aire a presión para lograr una mez-

cla íntima de la resina catiónica y aniónica, después de la cual se pone la unidad en servicio nuevamente.

Estas unidades de Lecho mezclado tienen las mismas características de construcción que las indicadas para las unidades catiónicas y aniónicas, consistentes de un solo recipiente de acero al carbón en donde se alojan los dos lechos de resina, cinco válvulas individuales de compuerta ya que en estas unidades no es posible utilizar la válvula de paso Múltiple por la diversidad de operaciones requeridas, un medidor de caudal y un instrumento de conductividad. También se utilizan dos sistemas de regeneración similares a los descritos anteriormente, uno para la introducción del ácido sulfúrico y el otro para la introducción de la sosa cáustica.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

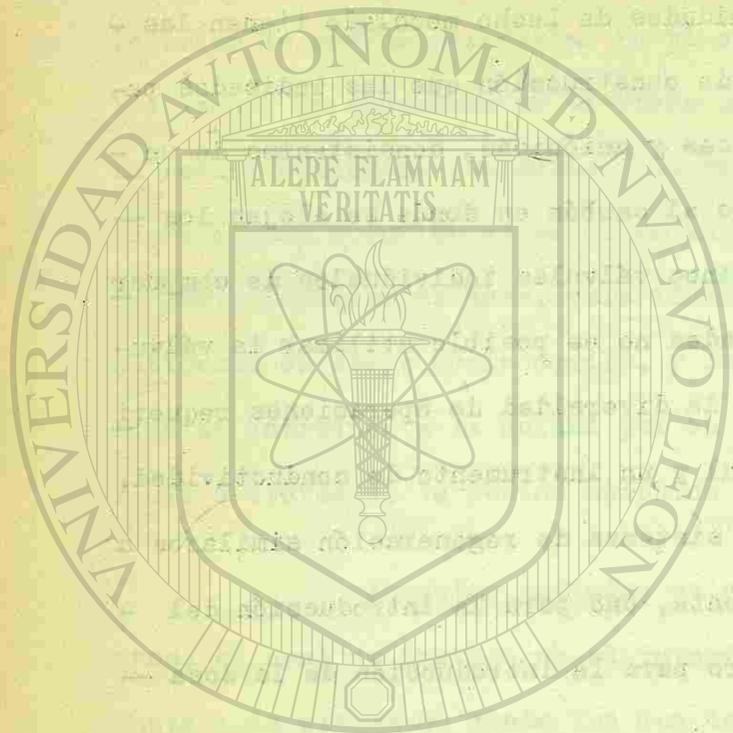
SECCION XII

SISTEMAS DESMINERALIZADORES

Una planta desmineralizadora en la que la unidad intercambiadora de cationes es seguida en serie por una unidad intercambiadora de aniones, normalmente se le llama - Planta Desmineralizadora de "dos pasos". Esto se aplica también al caso donde una batería de unidades intercambiadoras de cationes es seguida en serie por una batería de unidades intercambiadoras de aniones. Estas plantas de dos pasos son las más sencillas y las más usadas en desmineralización, pero hay otros sistemas que encuentran aplicación en algunas - casos.

Los nueve arreglos principales que se tienen para plantas desmineralizadoras son los que se ilustran en - el diagrama adjunto.

Con respecto a la selección de cual de estos arreglos debe de usarse en un caso particular, principalmente depende de la calidad de agua por tratar, de la calidad - del agua requerida para el uso que se le va a dar, de la economía del costo de operación de cada uno de ellos, así como



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SECCION XII

SISTEMAS DESMINERALIZADORES

Una planta desmineralizadora en la que la unidad intercambiadora de cationes es seguida en serie por una unidad intercambiadora de aniones, normalmente se le llama - Planta Desmineralizadora de "dos pasos". Esto se aplica también al caso donde una batería de unidades intercambiadoras de cationes es seguida en serie por una batería de unidades intercambiadoras de aniones. Estas plantas de dos pasos son las más sencillas y las más usadas en desmineralización, pero hay otros sistemas que encuentran aplicación en algunas - casos.

Los nueve arreglos principales que se tienen para plantas desmineralizadoras son los que se ilustran en - el diagrama adjunto.

Con respecto a la selección de cual de estos arreglos debe de usarse en un caso particular, principalmente depende de la calidad de agua por tratar, de la calidad - del agua requerida para el uso que se le va a dar, de la economía del costo de operación de cada uno de ellos, así como

del costo inicial de cada planta.

TIPO A - DOS PASOS CON INTERCAMBIADOR ANIONICO DEBILMENTE

BASICO

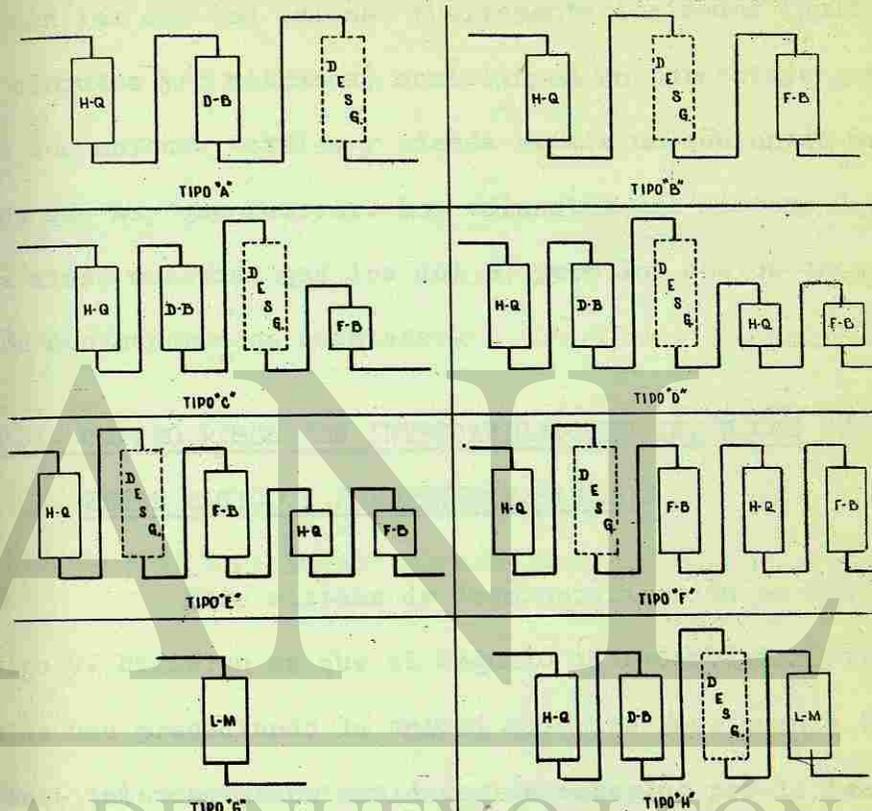
Este tipo se usa en procesos de desmineralización de agua donde no se requiere remoción de sílice. Dependiendo de la composición del agua cruda y del nivel de regeneración en el intercambiador catiónico, este sistema normalmente removerá los electrolitos hasta 2 ppm, el bióxido de carbono puede reducirse a 10 ó 15 ppm, el contenido de sílice no sufre cambio alguno.

TIPO B - DOS PASOS CON INTERCAMBIADOR ANIONICO FUERTEMENTE

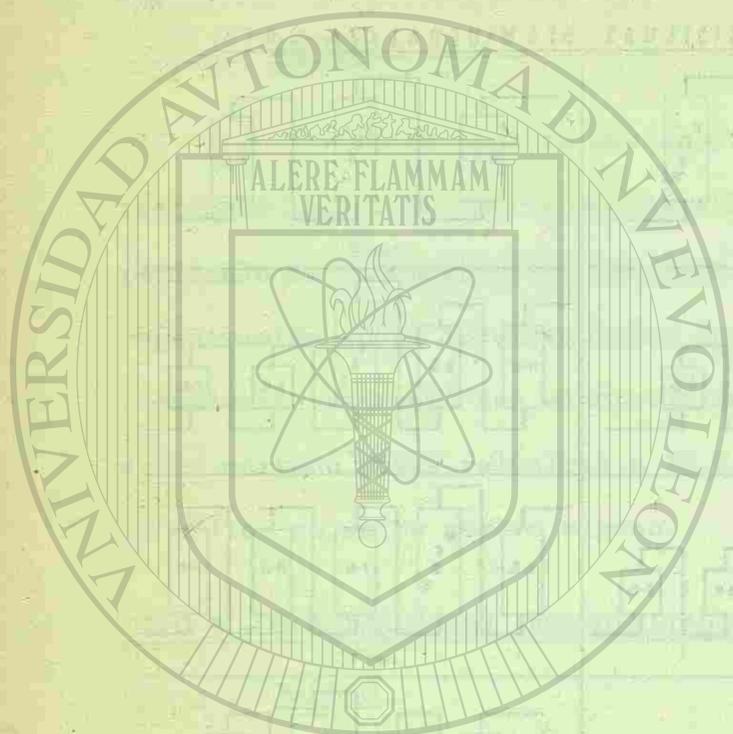
BASICO

Este tipo se usa en procesos de desmineralización de agua donde se requiere remoción de sílice. En estos sistemas los sólidos totales pueden reducirse de 2 a 10 ppm como residuo y la sílice, dependiendo de su contenido en el agua cruda, del tipo de resina usada y si se regenera con sosa cáustica caliente o fría, su contenido se reducirá de 0.02 ppm a 0.15 ppm.

ARREGLO DE SISTEMAS DESMINERALIZADORES.



- H-Q = Unidad de intercambio Catiónico Hidrógeno.
- D-B = Unidad Aniónica débilmente básica.
- DESG. = Desgasificador (cuando se muestran líneas punteadas su uso es opcional, según el contenido de CO₂).
- F-B = Unidad Aniónica fuertemente básica.
- L-M = Lecho mezclado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TIPO C - TRES PASOS USANDO INTERCAMBIO ANIONICO DEBILMENTE BASICO Y FUERTEMENTE BASICO.

Este tipo de desmineralización se emplea en aguas en las que los aniones fuertemente ionizados (sulfatos, cloruros y/o nitratos) constituyen un porcentaje grande de los aniones totales y además existe un contenido de sílice que hay que remover. Los efluentes del sistema C son de la misma cualidad que los del B, pero los costos de operación son menores en este caso.

TIPO D - CUATRO PASOS CON INTERCAMBIADORES ANIONICOS DEBILMENTE BASICO Y FUERTEMENTE BASICO.

Este sistema de desmineralización es similar al tipo C. Difieren en que el segundo intercambiador catiónico se usa precediendo la unidad aniónica fuertemente básica. Este intercambiador catiónico secundario, por lo tanto, elimina la fuga de cationes tan completamente que el efluente final del paso cuatro, usualmente no contiene más que 1 ppm de sólidos totales. El contenido de sílice en el efluente está dentro de los rangos de los Tipos B y C.

TIPO E - CUATRO PASOS USANDO UNIDADES DE ACABADO.

Este tipo de sistema de desmineralización, usa un intercambiador catiónico en el primer paso, un intercambiador aniónico fuertemente básico en el segundo paso, una unidad de intercambio catiónico de acabado en el tercer paso y una unidad de intercambio aniónico fuertemente básica de acabado en el cuarto paso. Este sistema se usa ampliamente, pero no en forma exclusiva, en aguas en las que los aniones alcalinos constituyen una proporción substancial de los aniones totales.

Puesto que la mayoría de los cationes y aniones se eliminan en los primeros dos pasos, la carga de las siguientes dos unidades es muy pequeña. Por lo tanto, las unidades de acabado contienen Lechos de resina mucho más pequeños que las unidades primarias, y pueden trabajarse a flujos mucho más grandes, pueden usarse para manejar los flujos de una batería primaria, y no deben ser regeneradas con la misma frecuencia que las unidades primarias. El total de sólidos en el efluente de este sistema es de una o menos ppm. La sílice esta dentro de los rangos de los efluentes tipo B.

TIPO F - CUATRO PASOS SERIES ALTERNANTES

Este tipo de sistema de desmineralización difiere del tipo E en que el intercambiador catiónico hidrógeno que se usa en el tercer paso es del mismo tamaño que el usado en el primer paso; en que el intercambio aniónico fuertemente básico usado en el cuarto paso es del mismo tamaño que el usado en el segundo; que los intercambiadores catiónicos y aniónicos en pares, se alternan en operación en flujo ascendente y que los flujos son los mismos en todas las unidades. La calidad del efluente es igual que la del tipo E.

Ya que este sistema se usa normalmente con aguas en las que la alcalinidad constituye un porcentaje mayor del total de aniones, usualmente se emplea un desgasificador entre las dos unidades primarias. Si la alcalinidad es baja, se puede omitir el desgasificador. Considerando este sistema Tipo E en el que se use un desgasificador y si numeramos las unidades en las cuales los pasos 1, 2, 3 y 4 se denominan No. 1, No. 2, No. 3 y No. 4, el agua primera se pasa a través de la unidad 1, luego por el desgasificador y después por las unidades 2, 3 y 4, en serie.

Ya que durante el ciclo de operación, las cargas en las unidades 3 y 4 son muy reducidas, muy poco de su capacidad ha sido usada al final del ciclo de operación y 2. Por lo tanto, durante el intervalo en que las unidades 1 y 2 se retrolavan, regeneran y se ponen en servicio, la 3 y la 4 llevan la carga total, la tubería y válvulas se arreglan de tal manera que el agua entra primero a la unidad No. 3, luego al desgasificador y después a la unidad No. 4 y al servicio. Cuando las unidades 1 y 2 vuelven al servicio, aquí se efectúan los pasos 3 y 4 del proceso.

Quando las unidades 3 y 4 han alcanzado el final del ciclo de operación, se interrumpe el servicio y se regeneran, y durante este intervalo, las unidades 1 y 2 con el desgasificador trabajando ahora entre ellas, llevan la carga completa; cuando las unidades 3 y 4 vuelven al servicio, toman su posición original de llevar a efecto el tercer y cuarto pasos del proceso. De esta manera el sistema F da un servicio continuo.

TIPO G - LECHO MEZCLADO

Este sistema de desmineralización generalmente

te es usado como unidad de acabado o con aquellas aguas en que el contenido de sólidos totales no es muy alto. Respecto a la remoción de sílice tiene los mismos rangos que el Tipo B, puesto que usa una resina aniónica fuertemente básica. Los costos de operación, sin embargo, son mayores que con otros sistemas, pero pueden reducirse usando este como unidad de acabado.

TIPO H - INTERCAMBIO ANIONICO DEBILMENTE BASICO CON DOS PASOS MAS LECHO MEZCLADO PARA ACABADO.

Estos sistemas se usan generalmente con aguas en donde la acidéz mineral teórica constituye un porcentaje sustancial de los aniones totales. Con estas aguas el primer paso se efectúa en un intercambiador catiónico, el segundo en un intercambiador aniónico débilmente básico y en el tercer paso se emplea una unidad de lecho mezclado para acabado, removiendo ésta únicamente la fuga de cationes, sílice y pequeñas cantidades de bióxido de carbono. Consecuentemente los costos de operación son más bajos que en el Tipo G y la calidad del agua es la misma que la obtenida en el Tipo G.

TIPO I - INTERCAMBIADOR CATIONICO CON DERIVACION, SEGUNDO
POR DESGASIFICADOR Y LECHO MEZCLADO.

Este sistema de desmineralización es aplicable con aguas en las que los aniones alcalinos constituyen un gran porcentaje de los aniones totales, por lo tanto en este sistema siempre se usa desgasificador. En el primer paso casi toda el agua se pasa a través del intercambiador catiónico que cuenta con una derivación, de manera que una pequeña cantidad de flujo de agua cruda puede mezclarse con el efluente del intercambiador catiónico. Este flujo de agua debe ser el suficiente para que su alcalinidad neutralice los ácidos minerales del efluente del intercambiador catiónico. La mezcla pasa a través de un desgasificador que elimina el bióxido de carbono (el formado en el intercambiador catiónico más el formado en la neutralización y el que se encuentra libre en el agua cruda) hasta un residuo muy bajo, aproximadamente 10 ppm. En el siguiente paso, que es el Lecho mezclado, se eliminan pequeñas cantidades de electrolitos, sílice y el bióxido de carbono residual.

La calidad del efluente en estos sistemas es

la misma que la del sistema G, los costos de operación son menores ya que la mayoría de la alcalinidad y el bióxido de carbono formado se eliminan del agua antes de entrar a la unidad de lecho mezclado.

CONCLUSIONES

La desmineralización con remoción de sílice, ha probado ser un método económico para proveer agua de repuesto para calderas de alta presión de operación. En muchos casos es un método más económico para agua de repuesto que la destilación usando evaporadores de efecto sencillo. La desmineralización, ya sea con ó sin remoción de sílice, ha probado ser un proceso útil y económico para muchas industrias. El uso de agua desmineralizada ha sido aplicada a la manufactura de productos químicos y farmacéuticos. El agua desmineralizada se usa en algunos procesos textiles, en el plateado de espejos, y en algunos procesos de electroplateado. También ha sido ampliamente usado en varios procesos de manufactura, donde la calidad del producto terminado, puede verse afectarse por la presencia de sales minerales en el agua

que entra en contacto con el producto.

Hoy en día, hay disponibles, intercambiadores de cationes de hidrógeno que pueden tolerar temperaturas de operación tan altas como 250°F. Los materiales intercambiadores de aniones de basicidad intermedia y débil pueden tolerar temperaturas de operación solamente de 100°F. Los intercambiadores de aniones fuertemente básicos deben generalmente operarse con temperaturas de agua que no excedan 120°F. Como consecuencia, es necesario llevar a cabo los procesos de desmineralización a temperaturas relativamente bajas hoy en día. Sin embargo, algunos intercambiadores de aniones fuertemente básicos que hoy en día, se prueban, se pueden operar a temperaturas de aproximadamente 170°F.

Quando el agua cruda tiene una gran cantidad de sólidos disueltos, la evaporación puede frecuentemente probar ser el método más económico para obtener agua que sea casi libre de sales minerales. Si el agua cruda está contaminada con sustancias de naturaleza orgánica, un pretratamiento será requerido para su purificación, coagulación y filtración para reducir el contenido de materia orgánica a un valor muy bajo, antes de desmineralizarla.

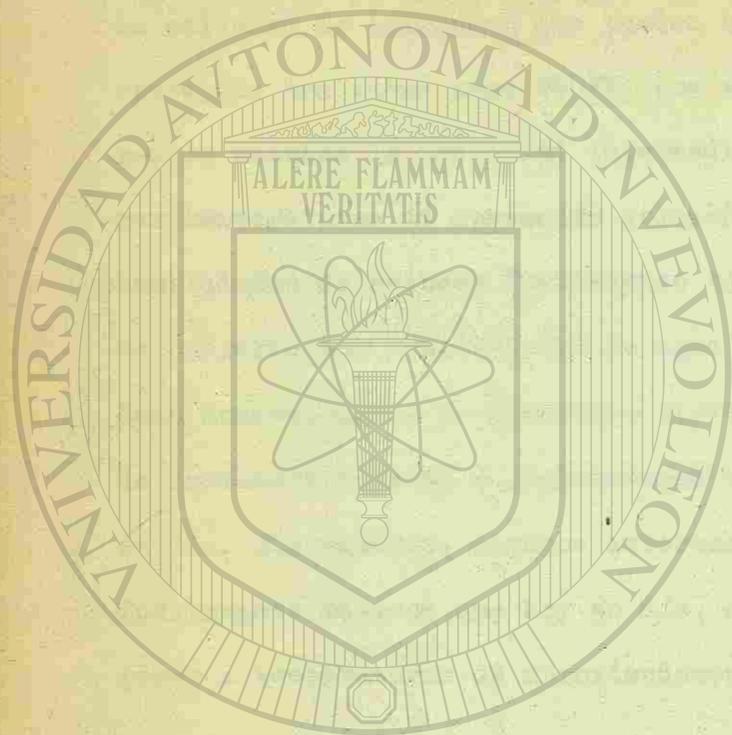
lor

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESCUELA DE GRADUADOS

CURSO INTENSIVO SOBRE:
CORROSION E INCRUSTACION EN TUBERIAS

TEMA
PREVENCION Y REMOCION DE INCRUSTACIONES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

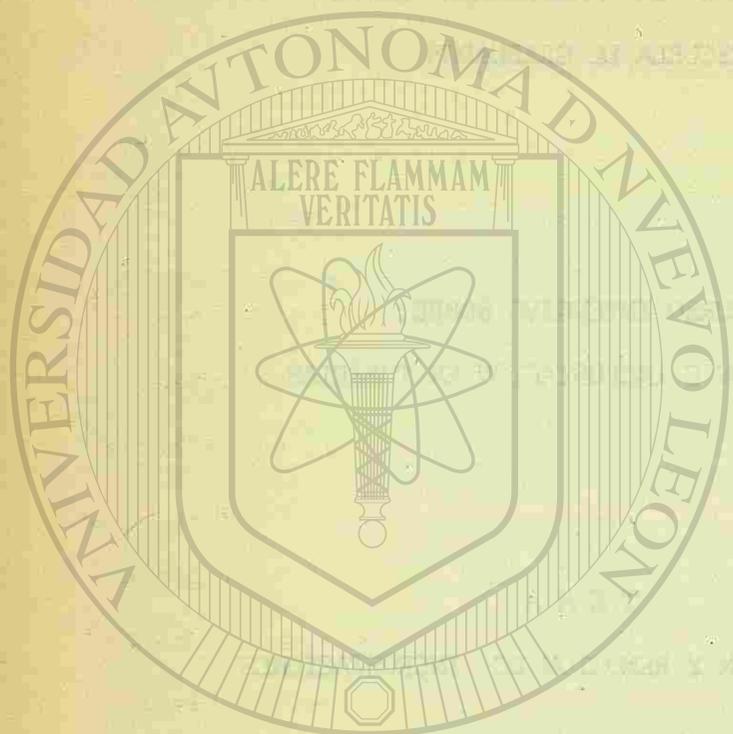
ING. VÍCTOR E. SERRATO COLOMER

NALCO DE MEXICO, S.A. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ABRIL DE 1967

MONTERREY, MEXICO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TEMA X

PREVENCIÓN Y REMOCIÓN DE INCRUSTACIONES

A).- CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA.

Influencias de las diferentes clases de materiales de los conductos.

Para enmarcar el presente tema dentro de un cuadro de condiciones más o menos definidas, es conveniente restringir la discusión al caso de conducción de aguas crudas a temperatura ambiente. Dichas aguas podrán provenir de pozos artesianos o profundos, de manantiales, ríos, lagos o represas. En esta forma, se podrán cubrir los casos de mayor interés práctico para los aquí presentes. Las generalizaciones que se pueden hacer con estas aguas, no podrían aplicarse en ninguna forma a aguas de desperdicio doméstico o industrial, a aguas salobres ni al agua de mar.

Iniciaremos el estudio del tema con una pregunta: [®]

¿Qué se entiende por calidad del agua?

No existe una respuesta objetiva breve para esta pregunta, pues al hablar de calidad inmediatamente se piensa en bases ó estándares contra los cuales evaluar ésta. No existe ni puede existir un estándar numérico que defina la calidad del agua, debido a que cada uso de ella condiciona los requisitos que deberá llenar ésta. Sin embargo podemos introducir el concepto de "Estabilidad" del agua:

Se entiende que un agua es estable cuando no causa ninguno de los problemas siguientes:

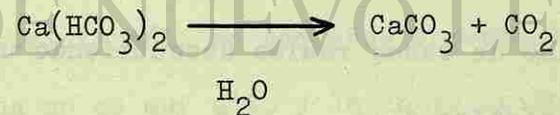
- a) Incrustación Mineral Cristalina.
- b) Corrosión de los Metales con lo que tiene contacto.
- c) Acumulación y desarrollo de masas de microorganismos.
- d) Enlodamiento y atascamiento de las líneas de conducción.

En esta forma, el concepto "Estabilidad" se comprende todas las características de calidad del agua.

Ahora estamos en posibilidad de analizar sistemáticamente las distintas variables que definen la calidad de un agua, en función a los problemas que éstas pueden causar:

I. Incrustación: Como se vió en un tema anterior, la incrustación se produce cuando una sal en el agua alcanza una concentración igual ó ligeramente mayor a su solubilidad real a las condiciones de operación.

I-1 Carbonato de Calcio: La sal que más comúnmente causa incrustaciones en las tuberías es el Carbonato de Calcio. Cuando el agua tiene un contenido excesivo de Bicarbonato de Calcio, éste se precipita formando costras que en ocasiones llegan a obstruir totalmente el flujo del agua. Irónicamente, este fenómeno ocurre cuando el Carbonato de Calcio se deposita directamente sobre el meta, debido a una reacción catódica que paraliza la corrosión del metal. También se obtiene precipitación directa del Carbonato de Calcio sobre el metal cuando existe alta velocidad en el agua y se altera el equilibrio:



en la película de flujo laminar en contacto con la pared del tubo, debido al desprendimiento de CO_2 .

Cuando la concentración del bicarbonato de -

calcio es muy inestable, éste se precipita directamente en el caudal de agua en forma de lodo, por lo que no se forman películas duras como en el caso anterior.

Para conocer las condiciones de equilibrio del Carbonato de Calcio se cuenta en algunos "Indices" que seguramente fueron discutidos en el tema No. IV de este curso. Entre ellos los más conocidos son el "Indice de Saturación del Dr. Langelier y el "Indice de Estabilidad" del Dr. Ryznar. Ambos parten de un análisis físico-químico de las variables que influyen el equilibrio de la solubilidad del bicarbonato de calcio:

Concentración de Calcio, concentración de Bicarbonato, Iones no Comunes (Sólidos Disueltos) y temperatura. El Dr. Ryznar modificó la enunciación del Índice a $(2pH_s - pH)$ y correlacionó sus valores experimentales de laboratorio con los de casos reales descubriendo una consistencia bastante satisfactoria.

Se encontró que abajo de 6.0 de Índice de Estabilidad el agua precipita $CaCO_3$ en cantidades mayores cuanto más bajo sea dicho índice. Sabiendo la "Tendencia Direc-

cional" del agua, tenemos dos variables que podemos modificar para evitar la sobresaturación del Bicarbonato: La concentración de Calcio y la Alcalinidad. Se puede disminuir la Dureza de Calcio por alguno de los tratamientos descritos en el tema No. IX o se puede acidificar el agua por burbujeo de gases de combustión con alto contenido de CO_2 o por adición directa de algún ácido mineral.

Quando se trata de manejar grandes volúmenes de agua, por lo general ninguno de estos métodos es práctico ni económico pues el costo de las instalaciones para acidificación es alto y el control es bastante difícil. Por otra parte, si el agua es para uso potable o industrial, la adición de ácidos minerales no es conveniente ya que se incrementa el contenido de sólidos disueltos.

La disminución en la Dureza de Calcio se efectúa actualmente sólo en pequeñas comunidades donde el gasto de agua no es muy alto y la instalación requerida es pequeña. El método preferido para esta remoción es la precipitación de la Dureza Temporal (De Bicarbonatos): Mediante la adición de cal se transforma el bicarbonato de calcio en

carbonato insoluble de calcio que se elimina por sedimentación y filtración. Es preciso notar que cuando las reacciones de precipitación no se realizan correctamente, se puede presentar el fenómeno de post-precipitación después de los filtros causando abundante precipitación e incrustación en esa parte de la tubería.

Las ventajas de la eliminación de la dureza bicarbonatada son su bajo costo de operación y que además de la disminución de Calcio se reduce el contenido de Sólidos Disueltos. Eskel Nordell (3) dice que el suavizar el agua de uso Municipal es muy conveniente pues el incremento en el valor del agua se justifica por la reducción tan notable en el consumo de jabón (1 Kilo de cal elimina la misma Dureza que 20 Kilos de Jabón), y la disminución de los costos de mantenimiento de calentadores de agua domésticos e industriales, así como por la menor incrustación formada en las redes de conducción Municipales lo que mantiene bajos los costos de bombeo. Otros autores que citan observaciones interesantes sobre la suavización de aguas Municipales son Olson (4), Timanus (5), Unda O. (6), etc.

La eliminación o disminución de Dureza por procedimientos de intercambio iónico no se realiza en la actualidad en los grandes sistemas municipales por varias desventajas que este método tiene:

- a) No se remueve selectivamente el Ion Calcio, sino también el Magnesio, Fierro, etc.
- b) El agua obtenida es de Dureza muy baja: 1 a 5 ppm., por lo cual es muy corrosiva para las tuberías.
- c) No disminuyen los sólidos en el proceso, sólo aumenta la concentración de Ion Sodio que a altos niveles es perjudicial para la salud. Algunas de estas desventajas se evitan para la suavización "repartida", o sea suavizando sólo una fracción del total de agua y mezclándola con la otra fracción de agua para dar la Dureza final deseada.

Por supuesto que el sistema de intercambio iónico tiene varias ventajas sobre la suavización por precipitación como son:

- a) Instalaciones más compactas.
- b) Fáciles de automatizar.
- c) Sin el problema de disposición de lodos.

d) Se obtiene un agua de calidad muy uniforme.

e) Etc., etc.

I-2 Fierro y Manganeseo.

Otros componentes del agua que pueden causar obstrucciones en las tuberías son el fierro y el manganeseo, los cuales fomentan el desarrollo de ciertos microorganismos como las bacterias incluídas en los nombres genéricos "Crenothrix" y Gallionella", que usan para su propio metabolismo la energía liberada en el proceso de oxidación del ion ferroso a la forma férrica. Estas bacterias son esencialmente aerobias y pueden vivir en la luz o en ausencia de ellas. Se ha encontrado que estas bacterias precipitan un volumen de hidróxido férrico hasta 500 veces mayor que su propio volumen; de ahí que los depósitos de fierro en tuberías lleguen a ser tan abundantes y causen serias restricciones al flujo. Se han hecho observaciones similares en el caso del Manganeseo.

REMOCION DE FIERRO Y MANGANESO: El fierro en el agua generalmente existe en una o varias de las seis

formas siguientes:

- 1) Bicarbonato Ferroso.
- 2) Hidróxido Ferroso.
- 3) Sulfato Ferroso.
- 4) Fierro Orgánico (Quelato)
- 5) Carbonato Ferroso.
- 6) Hidróxido Férrico.

El Bicarbonato Ferroso es la forma más común en que el Fierro se encuentra en las aguas crudas. Los procesos más típicos para la remoción del Bicarbonato Ferroso son:

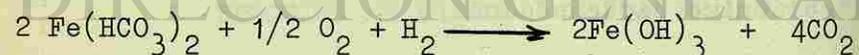
- (1) Aereación, Sedimentación y Filtración.
- (2) Suavización por Intercambio Iónico con Resinas catiónicas en ciclo sódico.
- (3) Descationización por columna catiónica en ciclo ácido.
- (4) Suavización por proceso cal-soda y precipitación.
- (5) Suavización de dos pasos: Cal en Caliente-intercambio catiónico ciclo sódico.
- (6) Proceso Zeolita-Manganeseo.

Como los procesos (2) al (5) fueron explicados en el tema IX, solamente describiré en forma breve los procesos (1) y (6).

(1) El proceso: Aereación-Sedimentación-Filtración, parte del hecho que las formas oxidadas del hierro son infinitamente menos solubles que las ferrosas a un mismo pH y que al poner el oxígeno del aire en contacto íntimo con el agua que contiene hierro soluble, éste último se oxida y al mismo tiempo se precipita ya que al aerear el agua bicarbonatada, se pierde gas carbónico, subiendo automáticamente el pH.

La reacción de oxidación se realiza a una velocidad que es función del pH, habiéndose encontrado que a un pH arriba de 7.5 en un tiempo de retención mínimo de 15 minutos, se logra una reducción total (hasta + 0.1 ppm.) de hierro.

La reacción es como sigue:



110 + 16

De la Estequiometría de la reacción se observa que 1 ppm. de Oxígeno Disuelto elimina aproximadamente 7 ppm. de Hierro como Fe. Como el agua a 25°C tiene una solubilidad aproximada de 10 ppm., con tener un buen contacto aire-agua, un pH conveniente y el tiempo de retención necesario, no habrá problema en reducir el contenido de hierro a límites despreciables (0.1 ppm.).

Para lograr una aereación efectiva se usan charolas de coque circulares o rectangulares con tres o cuatro charolas sobrepuestas y se hace caer el agua por gravedad en cascada, poniéndose ésta en contacto con el aire.

Las charolas descargan el agua a una fosa o tanque donde se retiene el agua por un tiempo determinado hasta obtener la precipitación del hidróxido férrico. Si es necesaria la adición de un alcali al agua, se deposita en esta fosa.

Si la fosa actúa como sedimentador, será necesario instalar un sistema para la remoción periódica de lodos.

Si se desea un efluente final libre de turbidez y color, es necesario filtrar el agua por filtros convencionales de arena gravitacionales ó de presión.

(6) Remoción de Fierro por el proceso de Zeolita de Manganese. La Zeolita de Manganese se prepara in-situ usando las zeolitas naturales tipo arena-verde, pasando por ellas en forma alternada una solución de sulfato de Manganese y permanganato de Potasio. Como resultado se obtiene una zeolita de Manganese que es un material granular con las siguientes características:

Color	- Negro
Tamaño	- 16 - 50 Mallas
Peso por Litro	- 1.56 kilos
Capacidad para Fe ó M	- 1.4 g/lt.
KMnO ₄ por regeneración	- 3.0 g./lt.
Flujo máximo de operación	- 3 gpm./ft. ²
Flujo mínimo de retrolavado	- 8 gpm./ft. ²

Debido al alto costo de los regenerantes, especialmente el permanganato, el uso de este proceso sólo limita a empresas pequeñas o instalaciones domésticas.

este caso, no se obtiene una suavización del agua, sino que al pasar ésta por el lecho de zeolita, son oxidados el fierro y el manganeso precipitándose directamente sobre dicha zeolita y siendo retenidos por ella.

Los procesos de eliminación del bicarbonato de Manganese son idénticos a los del Fierro con la excepción de que se requiere pH más elevado (superior a 10.3), para lograr la precipitación de los óxidos superiores del Manganese. Esto puede modificarse manteniendo una concentración de óxidos precipitados en contacto con el agua nueva; se encontró que 1,000 ppm. de estos óxidos en contacto con agua de 10.0 ppm. de Manganese redujeron el pH de precipitación a 8.5 con un tiempo de retención mínimo de 15 minutos.

I-3 Agentes Anti-Incrustantes.

Del campo de la físico-química han surgido una serie de sustancias orgánicas e inorgánicas que tienen la propiedad de inhibir la formación de incrustaciones y los dos provenientes de la supersaturación del Carbonato de Calcio y de Oxidos de Fierro y Manganese.

El producto pionero en este campo fue un Metafosfato de Sodio molecularmente deshidratado (6 y 7) al que se le ha asignado el nombre convencional de "Hexametafosfato de Sodio", debido a que consiste de una serie de agregados moleculares representando por la fórmula empírica $(\text{NaPO}_3)_x$, donde "X" tiene un valor aproximado de 6.0.

Se ha encontrado que el hexametafosfato y otros polifosfatos de sodio evitan la depositación del Carbonato de Calcio y de los Oxidos de Hierro y Manganese sobre las superficies de los tubos que hacen contacto con el agua. Lo sorprendente de esto, es que las dosis de estos productos requeridas para lograr tal finalidad son muy pequeñas en comparación con las concentraciones de las sustancias incrustantes $(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)$, por lo cual se llama a esto un "tratamiento marginal" ("Threshold Treatment").

La dosis aproximada de Hexametafosfato necesaria para inhibir la deposición del Carbonato de Calcio es de 2.0 ppm. como valor promedio (Gráfica No. 1). La dosis exacta dependerá de la mayor o menor tendencia incrustante del agua (pH y Temp), así como del tiempo de retención del

agua en el sistema. A valores altos de estas variables corresponden mayores dosis de Metafosfatos y viceversa.

Para estabilizar fierro y/o Manganese en aguas Municipales, por un período de 24 horas y cuando el contenido total de ambos combinados no excede a 3.0 ppm., se requiere 3 ó 4 veces dicho valor en forma de Polifosfato. Esta dosis es adicional a la de estabilización de Carbonato de Calcio (8).

El mecanismo de inhibición se sugiere como la resultante de una estabilización de condiciones de sobre saturación con respecto al CaCO_3 . El fosfato se adsorbe sobre los nucleos de cristalización ya presentes o recién formados distorsionándolos, con lo que pierden la propiedad de aceptar nuevas capas de Carbonato de Calcio (9).

La estabilidad de los polifosfatos disminuye a pH bajo y con altos contenidos de Calcio y altas temperaturas. En presencia de estas variables, los polifosfatos se hidratan absorbiendo algo de alcalinidad del agua, pasando a Ortofosfatos, los cuales carecen de las propiedades antes descritas.

Por último, sólo hare mención de un grupo de productos orgánicos que también poseen propiedades de anti-nucleación (10):

- 1) Derivados de Lignosulfonatos.
- 2) Taninos Modificados.
- 3) Carboxi-Metil-Celulosa (C.M.C.)
- 4) Agentes Tenso-Activos y Humectantes.
- 5) Dextrinas y Almidones.

Estos productos por lo general se usan para complementar la acción de los polifosfatos, pero su uso está restringido a aguas de uso industrial por problemas de potabilidad y de costo.

T E M A X

B).- Remoción de la Incrustación Mediante Substancias Químicas.

El lavado químico ha evolucionado a través de los siglos desde las épocas primitivas en que se usaban las cenizas de la madera y los alcalis naturales para la limpieza personal y doméstica, hasta los modernos solventes que varían desde ácidos inorgánicos hasta complejos compuestos orgánicos.

Pasaron muchos siglos en la vida del hombre sobre la tierra hasta que éste tuvo que enfrentarse con los problemas del mantenimiento de plantas industriales. En la época actual la limpieza química está adquiriendo mayor importancia conforme aumenta la complejidad de los equipos de proceso. Los diseñadores no pueden ya sacrificar el aspecto práctico ni el económico en función de la simplicidad de forma requerida para la accesibilidad que es indispensable para la limpieza puramente mecánica.

Una de las industrias pioneras en la limpieza química fue la del Petróleo pues los depósitos en la fo-

Por último, sólo hare mención de un grupo de productos orgánicos que también poseen propiedades de anti-nucleación (10):

- 1) Derivados de Lignosulfonatos.
- 2) Taninos Modificados.
- 3) Carboxi-Metil-Celulosa (C.M.C.)
- 4) Agentes Tenso-Activos y Humectantes.
- 5) Dextrinas y Almidones.

Estos productos por lo general se usan para complementar la acción de los polifosfatos, pero su uso está restringido a aguas de uso industrial por problemas de potabilidad y de costo.

TEMA X

B).- Remoción de la Incrustación Mediante Substancias Químicas.

El lavado químico ha evolucionado a través de los siglos desde las épocas primitivas en que se usaban las cenizas de la madera y los alcalis naturales para la limpieza personal y doméstica, hasta los modernos solventes que varían desde ácidos inorgánicos hasta complejos compuestos orgánicos.

Pasaron muchos siglos en la vida del hombre sobre la tierra hasta que éste tuvo que enfrentarse con los problemas del mantenimiento de plantas industriales. En la época actual la limpieza química está adquiriendo mayor importancia conforme aumenta la complejidad de los equipos de proceso. Los diseñadores no pueden ya sacrificar el aspecto práctico ni el económico en función de la simplicidad de forma requerida para la accesibilidad que es indispensable para la limpieza puramente mecánica.

Una de las industrias pioneras en la limpieza química fue la del Petróleo pues los depósitos en la fo-

mación productoras y en los fondos de los pozos productores restringen la producción hasta el extremo de hacerla incosteable. Al identificarse la causa de este problema, se inició el tratamiento llamado "estimulación", que consiste en inyectar cantidades substanciales de ácidos minerales, especialmente clorhídrico para disolver dichos depósitos y reiniciar la explotación normal de petróleo. Sin embargo, dada la agresividad del HCl sobre el metal de las tuberías de los pozos, rápidamente sobrevinieron problemas de corrosión que ocasionaron picaduras y roturas de los tubos. Tratando de evitar esto se usaron ácidos menos agresivos pero los resultados no fueron satisfactorios. Entonces se desvió la atención hacia los inhibidores de corrosión que protegen los metales sin quitar el ácido su efectividad contra los depósitos, entre éstos se evaluaron las minas etoxiladas de la brea, la dibutil-tiourea, el hexinol, la caseína, etc. Con el desarrollo de buenos inhibidores se pudo lograr usar el ácido clorhídrico con seguridad y buena protección.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- SUSTANCIA
- Sólidos en Suspensión
- Sílice
- Cloruro de
- Carbonato de
- Bicarbonato
- Cloruro de
- Carbonato de
- Bicarbonato
- Sulfato de
- Cloruro de
- Carbonato de
- Bicarbonato
- Acidos Libres
- Oxígeno
- Acido Carbónico
- Grasas y Ace
- Materia Orgánica
- Aguas Negras

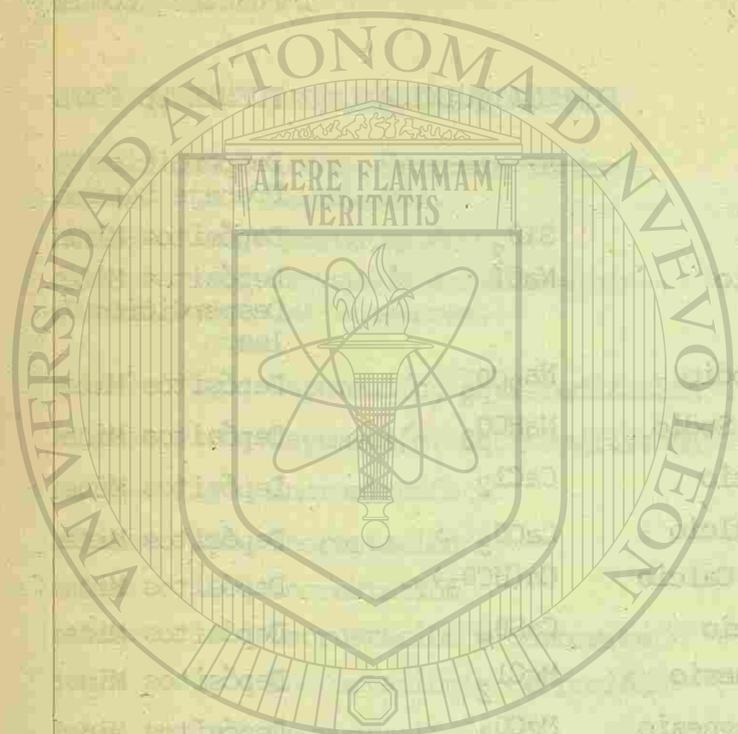
CAPILLA ALFONCINA

U.A.N.L.

TABLA I

IMPUREZAS COMUNES DEL AGUA

SUSTANCIA	FORMULA QUIMICA	FUENTE DE CONTAMINACION	PROBLEMA QUE OCASIONA
Sólidos en Suspensión	-----	Desperdicios Industriales Drenaje Superficial	Lodos, Incrustaciones Espumación.
Sílice	SiO_2	Depósitos Minerales	Incrustación
Cloruro de Sodio	$NaCl$	Depósitos Minerales Desperdicios Industriales	Corrosión en determinadas ocasiones.
Carbonato de Sodio	Na_2CO_3	Depósitos Minerales	Espumación, quebradización
Bicarbonato de Sodio	$NaHCO_3$	Depósitos Minerales	Espumación, quebradización
Cloruro de Calcio	$CaCl_2$	Depósitos Minerales	Incrustación
Carbonato de Calcio	$CaCO_3$	Depósitos Minerales	Incrustación
Bicarbonato de Calcio	$Ca(HCO_3)_2$	Depósitos Minerales	Incrustación
Sulfato de Calcio	$CaSO_4$	Depósitos Minerales	Incrustación y Corrosión
Cloruro de Magnesio	$MgCl_2$	Depósitos Minerales	Incrustación y Corrosión
Carbonato de Magnesio	$MgCO_3$	Depósitos Minerales	Incrustación
Bicarbonato de Magnesio	$Mg(HCO_3)_2$	Depósitos Minerales	Incrustación
Acidos Libres	$HCl-H_2SO_4$	Drenajes de Minas Desperdicios Industriales	Corrosión
Oxígeno	O_2	Absorción de la Atmósfera.	Corrosión
Acido Carbónico	H_2CO_3	Absorción de la Atmósfera, Depósitos Minerales, descomposición de la materia orgánica.	Corrosión
Grasas y Aceites	-----	Desperdicios Industriales	Corrosión, Depósitos Espumación.
Materia Orgánica Aguas Negras	-----	Desperdicios Industriales y domésticos.	Corrosión, Depósitos Espumación.



Antes de iniciar cualquier operación de limpieza química, es indispensable haber efectuado un buen análisis de los depósitos o incrustaciones que se pretenden -- disolver. A veces con una simple adición de ácido en un vaso de precipitado se obtiene la disolución de depósitos que -- son predominantemente de carbonato de calcio. En ocasiones se requieren análisis más elaborados como la difracción por Rayos-X, para una identificación más completa de los componentes de un depósito y su estructura dentro del mismo. Algunas veces no existe tiempo suficiente para hacer un análisis muy detallado, como es el caso de las limpiezas de emergencia que se hacen a calderas de fábricas de papel en que todo el proceso está detenido por falta de vapor. En estos casos se hacen análisis simples, se hace uso de datos anteriores y se complementa con una buena dosis de intuición y experiencia.

Un buen análisis de depósitos puede mostrar: [®]

- 1) Si el depósito puede o no ser disuelto -- por los reactivos químicos.
- 2) Qué agente químico deberá usarse.

3) Qué problemas de toxicidad y corrosión deberán prevenirse.

4) Cuál es el mejor método para efectuar la limpieza.

Aún cuando la corrosión es grandemente mitigada por los inhibidores en la limpieza ácida, siempre será conveniente la asesoría de un Ingeniero de corrosión y su supervisión durante todo el proceso, pues los problemas que se pueden causar son tan complejos que sólo un experto puede prevenirlos.

El programa de una limpieza química no se reduce a escoger un ácido y un inhibidor, sino que envuelve toda una serie de consideraciones:

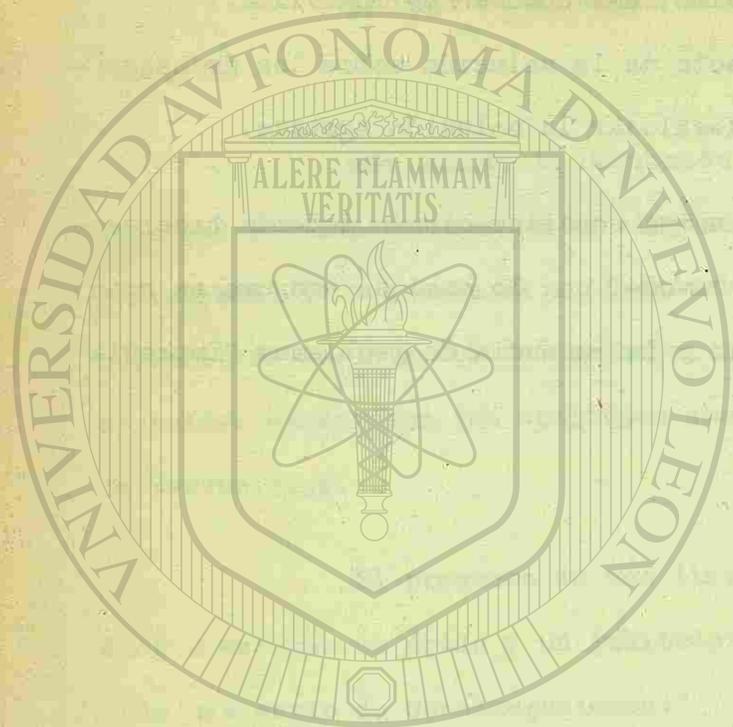
- a) Concentración del ácido que se va a utilizar.
- b) Concentración del inhibidor.
- c) Temperatura de la solución de limpieza.
- d) Análisis para determinar la composición de los depósitos que se van a eliminar.
- e) Efectos del solvente sobre el o los meta-

les con que va a tener contacto.

f) Toxicidad y combustibilidad de los gases liberados en la reacción, así como su corrosividad.

g) Efecto de la solución sobre los drenajes por los que se va a desalojar la solución agotada.

Todas estas consideraciones deberán hacerse antes de efectuar un lavado, con lo cual se asegura en gran parte el éxito de éste y la ausencia de problemas "imprevistos".



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AGENTES DE LIMPIEZA

En la tabla No. 1 ⁽¹⁾ se encuentran listados algunos de los agentes químicos más comúnmente utilizados y los materiales de construcción que los resisten. Entre estos materiales tenemos el ácido clorhídrico, el carbonato e hidróxido de sodio solos o en mezcla, el hipoclorito de sodio, las soluciones neutralizadoras pasivamente, los solventes aromáticos, las soluciones alcalinas de cresol, las colas del Metil-Iso-Butil Carbinol (MIBC), que contiene aproximadamente un 10% de MIBC y 90% de alcoholes polivalentes.

COMO SE USAN LOS ACIDOS

El ácido sulfúrico, nítrico y fosfórico son todos adecuados para usarse en limpiezas químicas, pero el ácido clorhídrico es más seguro, más barato, puede ser inhibido adecuadamente y forma pocos productos de reacción insolubles.

Los sistemas de acero inoxidable pueden limpiarse efectivamente con ácido sulfúrico o nítrico. (El uso

del ácido nítrico se limita a aceros inoxidable). Sin embargo, si el sistema (incluyendo los grados estabilizados), ha operado a temperaturas de sensibilización, no se podrá efectuar un lavado ácido sin causar ataque intergranular. Los vapores liberados al usar ácidos nítrico, sulfúrico, o fosfórico pueden ser muy peligrosos para la salud.

El ácido muriático es el ácido más reactivo en cuanto a la disolución de incrustación inorgánica y productos de corrosión. Debido a sus propiedades reactivas, muchas empresas prefieren dejar esta limpieza en manos de compañías especialistas con amplia experiencia y equipo adecuado.

PELIGRO DE LOS GASES LIBERADOS

El ácido inhibido que se usa en equipo de acero resulta en la evolución de gases. Si se encuentra presente algo de sulfuro de hierro en los depósitos o lodos que se van a eliminar, su reacción con HCl liberará sulfuro de hidrógeno gaseoso (H_2S).

Por lo general los sulfuros reducen la eficiencia de la mayoría de los inhibidores. Pero lo que es más

importante, el H_2S gaseoso es extremadamente tóxico y bastante inflamable. Por lo tanto se deberá ventilar adecuadamente el equipo en todo tiempo. Además deberá prohibirse estrictamente fumar, encender fuego o soldar en las cercanías de cualquier equipo que contenga ácido para limpieza.

El hidrógeno deberá ser venteado con precaución en dirección hacia arriba y afuera del edificio. Algunas compañías acostumbran burbujear los gases desprendidos a través de una solución cáustica. Después se tiene la precaución de tirar el sulfuro de sodio resultante en algún lugar donde no pueda regenerar el ácido sulfhídrico.

CUIDADOS ESPECIALES PARA ALGUNAS ALEACIONES

Las distintas aleaciones reaccionarán en forma diferente a un ácido inhibido. Las pequeñas diferencias en componentes como el azufre y el fósforo, pueden tener efectos considerables sobre la corrosión causada por el ácido de limpieza. Las áreas sujetas a esfuerzos severos ó que han sido trabajadas en frío, afectadas térmicamente, e incluso que tengan diferencias en el tamaño del grano se verán influenciadas en su velocidad de corrosión. Por ejemplo, el --

acero acero al carbono-molibdeno se corroe aproximadamente al doble de velocidad que el acero de bajo carbono en algunas soluciones. Los aceros al cromo en algunos casos pueden tener una velocidad de corrosión mayor que los aceros de bajo carbono. Por otra parte las aleaciones de cobre usualmente tienen muy bajas velocidades de corrosión en ácidos no-oxidantes tales como el HCl ó el H_2SO_4 debido principalmente a su posición relativa en la serie electromotriz.

Algunos problemas de corrosión se desarrollan como el resultado de acumulaciones del ion férrico y el cúprico. El incremento de cloruro férrico en la solución al estar disolviendo sales de fierro con HCl puede evitarse por la introducción de ácido nuevo. (El cloruro férrico induce picaduras sobre el acero) El mismo remedio se aplica contra la acumulación de ion cúprico en la limpieza de calderas donde el cobre recogido en las secciones de condensado y precalentamiento se localiza en la caldera como cobre metálico. Durante la limpieza ácida los iones cúpricos se encuentran en la solución. La solución parcialmente consumida y con un alto contenido de iones férricos y/o cúpricos no deberá ser utilizada en otro equipo.

Otro factor a considerar es la probable aceleración de la corrosión galvánica en los equipos que contienen metales visímiles en contacto. Esto se debe tanto a la acción depolarizante del ácido clorhídrico, como a su gran poder electrolítico.

ENJUAGUE POSTERIOR A LA LIMPIEZA

La limpieza ácida normalmente es seguida por el enjuague de la unidad utilizando agua y una solución alcalina en forma sucesiva. Si el HCl se ha usado para limpiar equipo de acero inoxidable, se considera altamente imperativo la eliminación total de iones Cl^- . Por pruebas de laboratorio se ha demostrado que la corrosión de grietas por esfuerzo puede ocurrir en aceros inoxidables austeníticos en la operación de arranque de una unidad si el ácido clorhídrico de lavado no ha sido eliminado cuidadosamente de la unidad. Por esta razón ordinariamente se evita el uso del HCl en aceros inoxidables austeníticos. Como precaución adicional se acostumbra preparar las soluciones neutralizante con reactivos de bajo contenido de cloruro y utilizando agua desmineralizada.

LIMPIEZA ACIDA PREVIA AL RECUBRIMIENTO DE METALES

La preparación de las superficies metálicas por medio de limpieza química antes de aplicar algún recubrimiento se ha convertido en una práctica bastante común. Generalmente esta limpieza se efectúa por inmersión de la pieza en un baño de solución química. La única limitación a este método la dan por lo general el tamaño y la forma de las piezas. En algunos casos cuando se desea galvanizar piezas de acero que son demasiado grandes para inmersión en soluciones de decapado, se pueden sumergir dichas piezas parcialmente sumergiendo un extremo a la vez.

En otros casos, los depósitos pueden ser quitados por limpiadores alcalinos, solventes, por emulsificación ó por desengrasado a vapor. El ácido fosfórico puede ser efectivo para la remoción de capas delgadas de óxidos. Los detergentes alcalinos además de ser más libres de riesgos, son usados en soluciones acuosas y pueden ser esparcidos, usados en inmersión y en métodos electrolíticos.

Entre los ácidos de decapado tenemos el sulfúrico, fluorhídrico, muriático, fosfórico, nítrico y mez-

clas de ellos. Se requiere adicionar inhibidores a estos ácidos debido a que el ataque sobre el metal sano no puede ser controlado con precisión.

CASO PRACTICO DE LIMPIEZA DE UNA CALDERA

CON AGENTES QUELATANTES (1)

En abril de 1964 falló una caldera con tubos y paredes de agua que opera a una presión de 850 Lb/pulg² y genera 200,000 lbs. de vapor por hora. El examen del tubo que falló además de la inspección interior de otros tubos adyacentes, confirmaron la presencia de una incrustación seria de sílice. Las muestras de incrustación se remitieron a una compañía especialista en limpieza para su análisis, la cual decidió limpiar el sistema con ácido clorhídrico inhibido complementado con bifluoruro de amonio. La muestra de incrustación se disolvió satisfactoriamente.

El trabajo de limpieza en la caldera fue considerado un fracaso, ya que la máxima remoción de depósitos lograda fue como de un 40%. Se procedió a consultar con otras compañías y con los asesores de tratamiento de agua, pero no se logró ninguna conclusión positiva. Se estimaba que una se-

gunda limpieza similar a la anterior no sacaría más de un 20% adicional de la incrustación original y que en cualquier caso quedaría un 40% de los depósitos internos sin extraer.

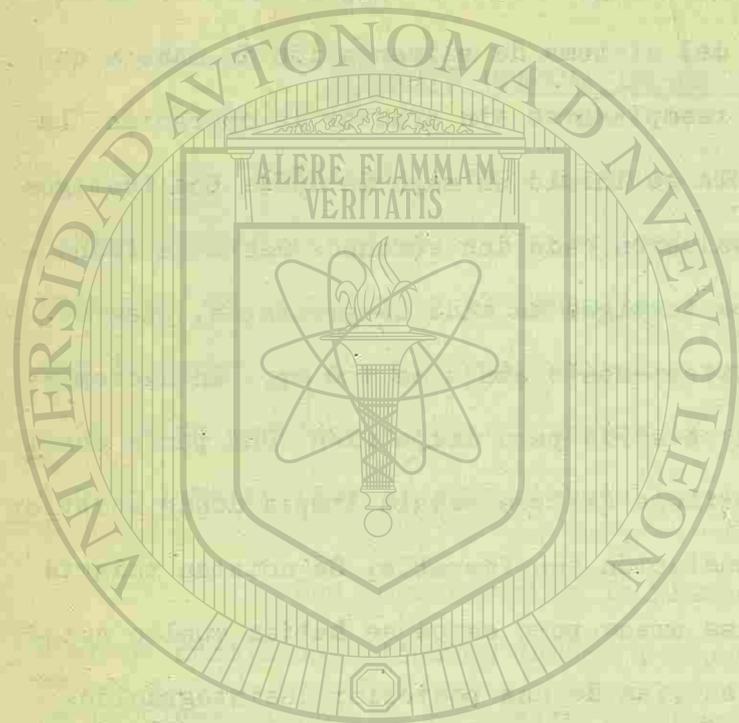
REMOCION GRADUAL DE DEPOSITOS

Llegado a este punto una de las compañías de limpieza química que ha tenido bastante experiencia en el campo de los quelatos, y el consultor del tratamiento de agua de la compañía, en forma separada, propusieron la adición de un agente quelatante durante la operación normal con la idea de remover gradualmente los depósitos.

Los Ingenieros de la Planta se mostraron reacios contra esta técnica debido a reportes que existían de problemas serios de corrosión resultantes del uso de los quelatos. Sin embargo, como la caldera no se prestaba a una limpieza mecánica satisfactoria se decidió probar la técnica de los quelatos con la esperanza de resolver el problema. Desde luego se consideró también la gran ventaja de eliminar una segunda parada para otra limpieza ácida.

Se instaló un sistema de dosificación para

alimentar EDTA a una concentración de 4 ppm. al agua de alimentación en el lado de succión de las bombas de alimentación. Se instalaron testigos de corrosión de acero y cobre en una derivación del sistema de alimentación de manera que puedan aislarse y reemplazarse sin afectar la operación. La alimentación de EDTA se inició en mayo de 1964. Los testigos de corrosión se evaluaron cada dos semanas. Hasta la fecha la corrosión de los testigos ha sido despreciable, pues se ha mantenido consistentemente abajo de 1.0 mpy. En diciembre de 1964 la caldera se abrió para inspección. Una parte considerable de la superficie visible estaba limpia donde anteriormente existía incrustación considerable. Se notaban todavía depósitos en algunas áreas pero estos se habían vuelto notablemente suaves y en vías de una posterior desintegración. No se encontró evidencia de corrosión en la caldera. Se estimó que durante los siete meses de operación de los quelatos la cantidad de metal de la caldera que se había perdido era considerablemente menor que la pérdida en el tratamiento ácido después de esta inspección se redujo la dosis de quelato de 4 a 2 ppm. por recomendación del consultor de tratamiento de agua.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

C).- Remoción de la Incrustación por Medios Mecánicos.

La remoción mecánica de incrustaciones de tuberías y equipo de proceso se remonta a los inicios de los procesos industriales.

Los primeros equipos industriales se fabricaban basados en diseños que permitían un acceso fácil a las áreas del equipo que se llenaban de incrustación. Evidentemente estos diseños eran por lo general excesivamente caros y poco funcionales.

La limpieza de grandes tramos de tubería se hacía golpeando ésta con pesados martillos o calentando el tubo por medio de sopletes u otros medios y luego enfriando repentinamente, con lo cual se rompía la incrustación debido a su alto coeficiente de expansión térmica, por lo general distinto al del tubo sobre el cual estaba fija.

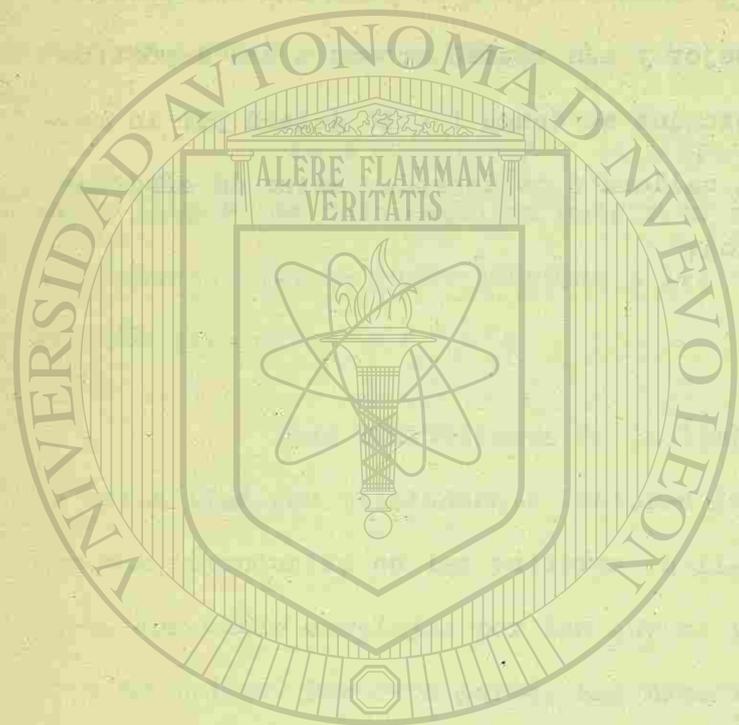
En los casos de calderas y demás equipos multitubulares, se usan turbinas rotatorias con masas metáli--

cas en la punta que golpean fuertemente la superficies incristadas conforme van avanzando. Estas turbinas causan el desprendimiento de las costras de depósito dejando las superficies más o menos limpias.

Para complementar la limpieza del trompo, se pasan después de éste cepillos metálicos rotatorios que arrastran lo que se quedo adherido a los tubos dejándolos aún más limpios.

Las limitaciones de la limpieza mecánica en la actualidad son precisamente factores de diseño mecánico que han introducido en las calderas configuraciones y curvaturas demasiado complejas por las que no puede entrar este tipo de equipo. Por otra parte, hay materiales como el admiralty y otras aleaciones de cobre que son bastante suaves y fácilmente son dañadas por el uso de estas herramientas. Sólo basta recordar que un rayón en una superficie metálica se convierte automáticamente en una area anódica, o sea, altamente susceptible al ataque corrosivo para comprender el porqué se ha descontinuado el uso de estas herramientas con este tipo de metales.

La limpieza mecánica es un buen auxiliar de la limpieza química, porque ayuda a eliminar los depósitos semisuelos y los voluminosos, con lo cual las soluciones ácidas tienen un mejor y más rápido acceso a los depósitos remanentes. Siempre que se tenga tiempo deberá por lo menos cepillarse una caldera o condensador antes de efectuar una limpieza química.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

BIBLIOGRAFIA

Angelier, W.F.: The Analytic Control of Anti-Corrosion
Water Treatment, J.A.WWA, 28: 1500 (1936).

Byznar, J.W., "A New Index for Determining Amount of Cal-
cium Carbonate Scale Formed by a Water", J.A.W.W.A. 36, -
No. 4, Abril (1944).

Ordell, E., "Water Treatment for Industrial and Other Uses",
Reinhold Publishing Corporation, New York, 2nda. Edición-
1961.

Ilsen, H.N., "Benefits and Savings from Softening Water -
for Municipal Supply, J.A.W.W.A. 36 (1939).

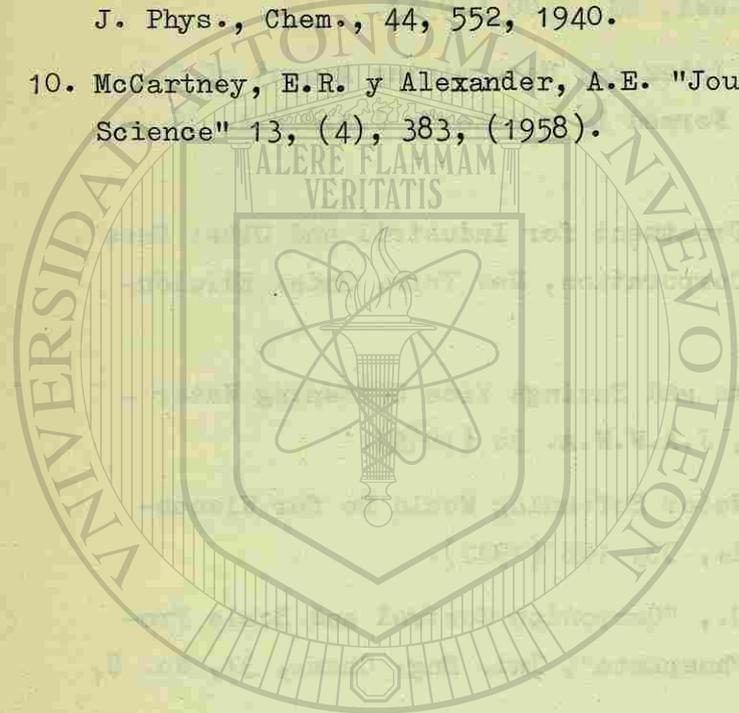
Rowson, L.R., "What Water Softening Would Do for Wiscon-
sin Cities, J.A.W.W.A., 33, 103 (1941).

Batch, G.B., y Rice O., "Corrosion Control and Scale Pre-
vention with Glassy Phosphate", Ind. Eng. Chem., 37, No. 8,
10-5 Agosto 1945.

Rice, O., y Partridge, E.P., "Threshold Treatment-Elimina-
tion of Calcium Carbonate Deposits from Industrial Waters".,
Ind. Eng. Chem., 31, No. 1, 58, Enero 1939.

Anda, F., "Teoría y Diseño de Plantas de Tratamiento de --
Agua Potable", Depto. de Publicaciones de la Univ. Católica
de Chile, 389, (1963).

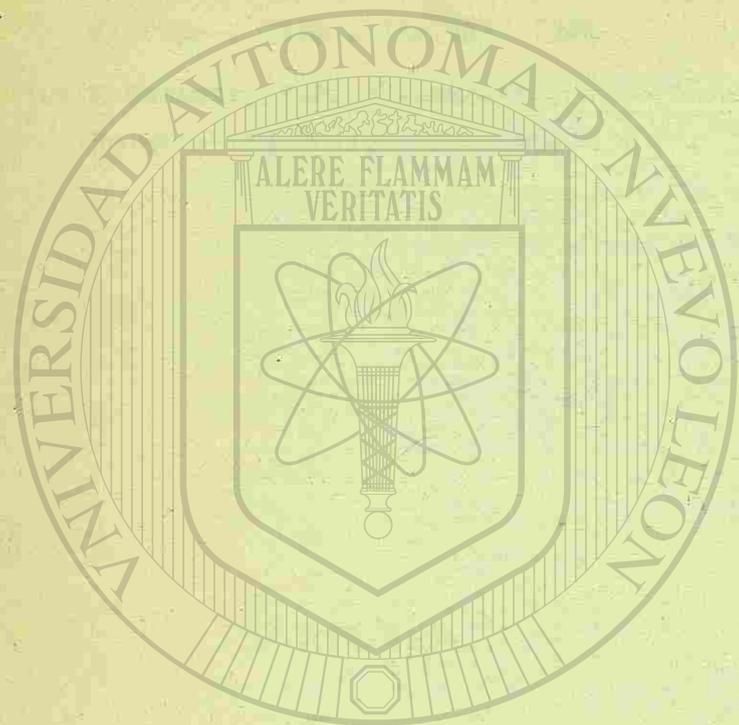
9. Buehrer, T.F., y Reitemier, R.F., "Inhibiting Action of Minute Amounts of Sodium Hexametaphosphate on the Precipitation of Calcium Carbonate from Ammoniacal Solutions, J. Phys., Chem., 44, 552, 1940.
10. McCartney, E.R. y Alexander, A.E. "Journal of Colloid Science" 13, (4), 383, (1958).



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

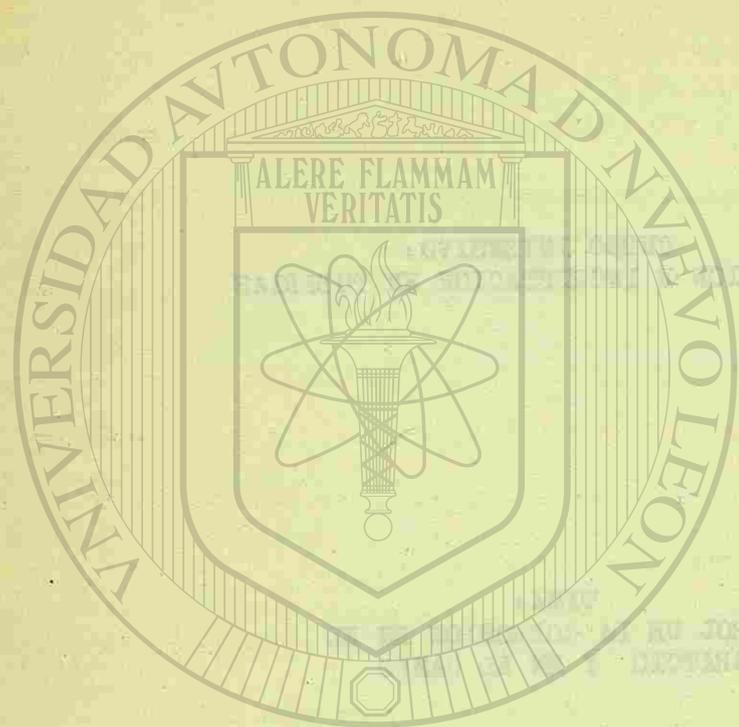
POR:
MARSHALL E. PARKER

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESCUELA DE GRADUADOS

CURSO INTENSIVO:
CORROSION E INCRUSTACION EN TUBERIAS

TEMA:
CONTROL DE LA CORROSION EN EL
LABORATOIO Y EN EL CAMPO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CONTROL DE LA CORROSION EN EL LABORATORIO

Y EN EL CAMPO

TECNICA DE LABORATORIO.

Existen cuatro tipos generales de pruebas - de laboratorio en la investigación de la corrosión.

- 1.- Ensayos preliminares para obtener conocimientos básicos.
- 2.- Investigaciones que tienen por objetivo el descubrimiento de hechos específicos relacionados con un problema real o supuesto.
- 3.- Pruebas de control, para mantener el desarrollo de un proceso a un nivel adecuado de efectividad.
- 4.- Pruebas de comportamiento, para evaluar materiales o procesos.

Existen por supuesto, muchas variaciones de estas categorías.

La investigación, como tal generalmente se - hace por Ingenieros; usualmente está reservado a Universida

des, Fundaciones y Departamentos de Investigación de las --
grandes empresas. Sin embargo es necesario considerar los --
siguientes principios generales.

1.- Ningún trabajo completo de investigación se debe --
iniciar sin haberse consultado previamente la lite --
ratura técnica disponible, para evitar una duplica --
ción de esfuerzos. Como ciertamente es enorme el --
volumen de publicaciones existentes, su consulta --
y educación se van haciendo cada vez más difícil.

2.- Si bien el objetivo principal del proyecto de in --
vestigación debe estar definido, el investigador --
debe mantenerse siempre alerta sobre resultados o --
procesos inesperados; ya que en muchos casos los --
resultados de estos descubrimientos son más impor --

tantes que el objetivo del estudio original.

3.- Nunca se debe intentar una investigación sin dispo --
ner de sobra, y no apenas de suficientes recursos --
y de tiempo.

Un proyecto parcialmente desarrollado que debe --
abandonarse cuando los fondos se acaban, signifi --
ca una pérdida total de tiempo y dinero.

Las indeterminaciones pueden incluir desde --
una medición sencilla del oxígeno disuelto en una muestra --
de agua, hasta una encuesta complicada que se realiza en el --
caso de un serio problema no-previsto de corrosión. En esta --
escala de tres determinaciones.

1.- Análisis específicos del agua, sea de antiguos o --
de fuente; son rutinarios y repetidos, sirviendo --
para muchos propósitos, además del control de la --
corrosión.

2.- Pruebas y estudio de la corrosión observada, cuyo --
fin es encontrar una manera de controlarla. Las --
pruebas sobre el medio corrosivo y del espécimen --
afectado por la corrosión, se pueden incluir en --
esta categoría.

3.- Pruebas referentes a métodos de control propuestos --
o sugeridos; con ellas se ligan las pruebas de eva --
luación.

Las pruebas que suministran información referente al control de la corrosión incluyen entre otras - las siguientes:

Sólidos disueltos totales cuyo contenido en el agua se determina evaporando una muestra pesada hasta que esté completamente seca; el peso del residuo permanentemente se expresa como una parte del peso inicial; la unidad de medida que se usa generalmente es partes por millón (p.p.m.). Posiblemente ha sido mencionado en una clase previa a la mía que ésta característica se relaciona muy estrechamente con la corrosividad. Existen muchas excepciones, como son: aguas muy blandas (bajo contenido de sólidos disueltos.).

Son frecuentemente poco agresivas debido a la tendencia que presenta para formar depósitos.

Conductividad o resistividad: Son términos equivalentes, expresan la propiedad que tiene el agua de conducir la electricidad. Generalmente los químicos, los operadores de calderas y los técnicos en agua, tienen una tendencia para usar la palabra conductividad mientras que

los especialistas en corrosión prefieren el término resistividad, los dos términos son recíprocos. Normalmente la conductividad se expresa en ohms por centímetro, o en la unidad menor y más conveniente que en micror ohms por centímetro.

Estas unidades son dimensionalmente correctas, frecuentemente se encuentra en la literatura técnica las unidades ohms o micro ohms referente a la conductividad, lo que es incompleto y ambiguo. El término ohms por centímetro usado para expresar resistividad es matemáticamente incorrecto. Existe una fuerte relación entre conductividad y corrosividad. La conductividad y el contenido de sólidos disueltos totales pueden presentar la siguiente relación: en casi todas las aguas naturales. El producto de la resistividad en ohms centímetros por el contenido de sólidos disueltos totales, expresados en parte por millón, es de alrededor de 400,000. Este resultado presenta una variación de aproximadamente 20% de más o de menos.

Los análisis químicos son normalmente (y en especial cuando se refieren a un procedimiento rutinario) limitados a la determinación de los iones siguientes: calcio, magnesio, sodio y potasio: así como carbonatos, hidróxidos -

sulfatos, cloruros y nitratos. La suma de todos ellos debe igualar el contenido de sólidos totales disueltos determinados por evaporación, pero cuando existe una discrepancia muy grande, es indicación de que existe algún otro ion que esta presente en cantidades suficientemente grandes, de manera a ser considerado como importante.

Como la carga total de cationes debe igualar al total de los aniones siendo cero la suma algebraica debería ser posible combinar todos los iones encontrados en un conjunto de compuestos simples. Esto se hace usualmente al reportar los resultados, combinando los diversos iones en el orden que aparece en la lista anterior.

O sea que una cierta cantidad de carbonato de calcio se formará mediante la utilización, sea de todo el calcio o de todo el radical carbonato disponible; el sobrante se combina entonces con el ion siguiente de carga opuesta, hasta que todos se combinen. Cuando no se verifica un balance de cationes y aniones, quiere decir que se cometió un error el análisis, o que un ion importante fué omitido.

La técnica actual para analizar los diversos iones puede realizarse de distintas maneras; existen muchos manuales que tratan del asunto. Una práctica muy común es hacer cada determinación separadamente; los químicos en agua usualmente disponen de un amplio suministro de muestras para trabajar.

pH. La concentración del ion hidrógeno determinada por procedimientos eléctricos. Hace algunos años esta determinación era muy delicada y lenta, pero los avances realizados en la instrumentación, particularmente en los electrodos, nos permitimos ahora determinar el pH automáticamente. El pH es un indicador útil de la corrosividad, pero solamente en combinación con otros factores. Valores muy altos arriba de 9 raramente son corrosivos al acero; valores muy bajos - menos de 4 - son casi siempre corrosivos. Sin embargo muy pocas aguas naturales y casi ninguna utilizada para fines domésticos se encuentran en estos límites y en los rangos intermedios, existen otros factores que son más importantes, como será visto más adelante.

Dureza y Alcalinidad. En cierta forma la al-

calinidad es otra manera de expresar el pH. Sin embargo - en la tecnología del agua, la alcalinidad ha adquirido un significado propio, siendo la suma efectiva de los carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y tal vez otros iones (silicatos y fosfatos), expresados como cantidad equivalente de carbonato de calcio. La dureza en las aguas naturales que es frecuentemente igual a la alcalinidad, es la suma de los carbonatos y sulfatos de calcio y magnesio, expresados en términos de carbonato de calcio. Se reconoce la dureza de una agua por la dificultad con que se forma espuma por el jabón. La diferencia entre dureza permanente y dureza temporal, que fué adoptado hace algunos años, ha perdido popularidad.

El Índice de Langelier es una manera de expresar la tendencia de un agua a formar depósitos. Las aguas duras forman depósitos más rápidamente que las blandas, pero la dureza, tal como fué definida, me da una idea precisa de la tendencia a producir depósitos. Pero si se calcula un valor teórico del pH, utilizando las concentraciones medidas de calcio, los iones básicos totales (por titulación con naranja de metilo), y los iones de carbonatos,

se compara con el valor real del pH medido, los dos pueden ser diferentes, si el pH real es mayor que el calculado (índice positivo) el agua se clasifica como presentando tendencia a la formación de depósitos; un índice negativo significa que los depósitos son solubles. Cuando un agua tiene su índice desviado en la dirección positiva (por cambio del pH) hasta 0.5, si no cambian los demás factores, la corrosión generalmente es menor. Un cambio de la misma magnitud, pero en sentido inverso puede transformar una agua buena en agresiva.

Exámenes biológicos: son de gran importancia bajo el punto de vista de la salud, pero de menos importancia en la corrosión. Sin embargo, existe cierto número de bacterias que se alimentan de pequeñas cantidades de hierro disuelto, y convierten un contaminante invisible en uno indeseable, resultando de ello lo que se conoce como "agua roja".

También existen bacterias que reducen los sulfatos a sulfitos, acelerando la corrosión del acero en el suelo. Algunas otras producen cambios en el contenido de oxígeno por lo que pueden modificar la intensidad de la corrosión.

Las pruebas de control, llevadas a cabo de manera rutinaria o programada, pueden incluir algunos o todos los análisis mencionados, Por ejemplo si se utiliza el control de pH, o se determina con cierta frecuencia o se registra automáticamente, si se sabe que los análisis del agua producen resultados constantes o casi constantes, entonces el control del pH es suficiente para mantener el Índice de Langelier dentro de un valor adecuado, pero si los resultados varían es necesario observarlos cuidadosamente. En otras palabras, cuando se demuestra que las características del agua son de importancia en el control de la corrosión, es necesario mantener sobre ellas una atención constante y cuidadosa.

El papel del oxígeno en la corrosión es muy importante, pero frecuentemente confuso y difícil de interpretar. Casi siempre el oxígeno actúa como un agente de estímulo a la corrosión pero existen casos en los cuales a un aumento en la cantidad de oxígeno disponible corresponde una disminución en la velocidad de la corrosión; también hay casos de corrosión intensa en ausencia de oxígeno.

Por ejemplo, si se preparan dos recipientes semejantes, cada uno con una pieza de acero inmerso en agua (con un poco de sal adicionado, de manera a obtener resultados en un tiempo menor); y si se introduce oxígeno por medio de burbujas en una de las soluciones y nitrógeno (que es inerte y removerá parte del oxígeno disuelto) en la otra, entonces el ataque al acero en el vaso que recibe oxígeno será más severo que en el otro.

Ahora bien, si se prepara un recipiente similar, con una pieza grande de acero inmerso en la solución y se hace burbujear oxígeno en un extremo de la pieza de acero y nitrógeno en la otra extremidad, se observará que el extremo que recibe oxígeno no será atacado mientras que el otro extremo de la pieza sufrirá una corrosión continuada. La corrosión total será mayor que la efectuada si no fuera usado el oxígeno, pero tendrá lugar en el sitio donde no se aplicó el oxígeno.

Este fenómeno se puede explicar en términos electroquímicos. Una pieza de acero expuesto a un electrolito inmediatamente presentará un gran número de áreas anódicas y catódicas, la corrosión se iniciará en las áreas anódi-

cas, y el Hidrógeno comenzará a aumentarse en las áreas catódicas.

Esta acumulación de Hidrógeno aumentará la resistencia del circuito (y también cambiará el potencial en los cátodos) de manera a disminuir la intensidad de la corrosión. El oxígeno, al pasar por la superficie del cátodo, rápidamente removerá el hidrógeno y reducirá la resistencia del circuito, de suerte que las áreas catódicas se transforman en mejores cátodos mientras que las áreas anódicas siguen sufriendo la corrosión bajo la influencia de la pequeña resistencia y del alto potencial. El proceso de disminuir la intensidad de la corrosión por acumulación de hidrógeno es conocido como polarización (en este caso particular, polarización catódica) y la restauración de la efectividad original del cátodo puede llamarse despolarización.

En la corrosión exterior de las tuberías, ha sido observado frecuentemente que las picaduras aparecen en la parte inferior de las mismas; se cree que la razón principal para eso es una especie de celda diferencial

de oxígeno, donde el oxígeno de la atmósfera puede llegar más fácilmente a la parte superior de la tubería.

También ha sido observado que las tuberías y cables tienen una tendencia muy pronunciada para sufrir ataques precisamente abajo de los extremos de áreas pavimentadas, posiblemente por una razón semejante a la expuesta anteriormente. En estos problemas de corrosión exterior, entre tanto, la identificación del papel del oxígeno no ayuda mucho en la solución del problema; es necesario usar métodos diversos, como son revestimientos y protección catódica, para combatir este y otros tipos de corrosión exterior todo en conjunto y al mismo tiempo.

En sistemas cerrados, desde instalaciones para suministro de agua caliente hasta calderas de alta presión, la remoción de oxígeno es un método muy importante en el control de la corrosión.

Existen diversos métodos para remover oxígeno; los tres más comunes son: (1) Deaireación por aspersion en un recipiente cerrado y lavado con vapor o por vacío; (2) pasa a través de un recipiente que contiene pedazos de

acero con la forma de alambres, seguido de filtración para remover el producto de la corrosión; (3) tratamiento con sulfato de sodio u otro compuesto semejante, que se combinará con el oxígeno disponible, de manera a formar un producto que no interfiere en el proceso. Se utiliza combinaciones de los distintos métodos para obtenerse grados diversos de remoción con una economía máxima.

Otros gases disueltos que son importantes en el proceso de la corrosión son el bióxido de carbono y el hidrógeno sulfurado. El proceso frecuentemente causa problemas en las tuberías de retorno de vapor condensado, particularmente cuando el agua original presenta un contenido apreciable de carbonatos. El tratamiento normalmente exige algún inhibidor; silicato de sodio es usado, así como muchos otros, El hexametáfosfato de sodio no es muy efectivo cuando el contenido de CO_2 y de oxígeno son altos.

El hidrógeno sulfurado es un problema en las tuberías de pozos de petróleo; el tratamiento es difícil, exigiendo la inyección de un inhibidor; algunas veces se resuelve el problema con la utilización de una tubería de una aleación especial de níquel. Al lado del pro

blema de corrosión; el H_2S es un componente indeseable de las aguas domésticas, no solamente debido a su olor, pero también porque puede indicar contaminación orgánica puede ser removido con algún éxito por aireación, así como el CO_2 .

PRUEBAS DE CAMPO.-

Se hacen para (1) determinar los efectos de una agua en un cierto número de materiales; (2) para determinar los efectos de aguas de características distintas en uno o más materiales "standar", o (3) para determinar el efecto de algún cambio en el tratamiento, o de alguna combinación de factores que participan de un problema de corrosión.

Al verificar los efectos de un determinado tipo de agua de abastecimiento tratada o natural - en tuberías de materiales distintos, o en revestimientos diversos, la dificultad está en cerciorarse que todas las piezas o áreas revestidas que se prueba sean expuestas a un mismo tiempo de exposición a la corrosión. También es importante verificar que esta exposición sea realmente representativa de las actuales condiciones de servicio. Por ejemplo, la ve

locidad de escurrimiento debe estar en el mismo rango de --
las velocidades reales en el sistema observado, pues se sa-
be que este factor puede tener un efecto pronunciado en la
intensidad de la corrosión. En un estudio concienzudo, de-
berían estar incluidos diversos tubos de cada material, --
trabajándose con velocidades de escurrimiento distintas. -
En caso de que el flujo esté dividido, es casi imposible -
comprobarse que la velocidad sea la máxima a todas las ra-
mas.

Esto significa también una discrepancia en
el volumen de agua corrosiva que pasa por cada uno de los
tubos. Por esta razón se recomienda que los tramos de tu-
bería sean incluidos a un solo conjunto. Deben estar uni-
dos por juntas que los aislen de los otros, pues en caso
de no haber aislamiento se producen acciones galvánicas.

Todas las piezas especiales de la tubería deben ser idé-
nticas de suerte que los efectos de la turbulencia, cuan-
do existan también sean semejantes, en todos los tramos.
Así mismo con esas precauciones, todavía hay peligro de
que un fenómeno que se produce en tramo, introduzca un --
contaminante en la corriente de agua, que pueda producir

un efecto indeseable en otro tramo susuciente. Por ejemplo
una agua agresiva que pasa por un tramo de tuberías de co-
bre puede disolver una cantidad suficiente de cobre, capaz -
de aumentar la intensidad de la corrosión en un tramo de -
aluminio situado más adelante en la misma instalación. La
única manera de evitar este tipo de error está en usar más
de un conjunto de tuberías en las cuales el orden de los -
tramos de materiales diversos es distinto para cada conjun-
to.

Quando un mismo material debe ser probado -
en aguas de características diversas, o en distintos gra-
dos de tratamiento, este arreglo es imposible de ejecutar.
El único remedio es mantener uniformes los caudales en la
tubería; lo mismo se aplica a las temperaturas, presiones
y otros factores que puedan variar.

Quando los especímenes utilizados en las --
pruebas son removidos de la instalación, experimentan un -
cambio significativo de ambiente. Es un problema. entonces
evitar que se produzcan cambios después de la remoción ca-
paces de alterar los resultados. No se debe permitir que -
los especímenes se saquen, o que sean expuestas al aire, -

aún por pequeños intervalos de tiempo; eso puede cambiar radicalmente los productos de la corrosión. El conveniente conservar los especímenes en la misma agua utilizada en el experimento. A veces es difícil, si no imposible mantener todas las condiciones invariables, las temperaturas y presiones variarán y naturalmente los caudales no existirían. En casos de tuberculización, al crear el escurrimiento se permite el oxígeno disuelto llegar a algunos de las áreas activas de donde había sido excluido, o puede ocurrir que otras sustancias se difundan o se desplacen de sus posiciones normales. Esto permitiría la existencia de reacciones muy diferentes de aquellas que se realizaban antes de la conclusión de la prueba.

De cualquier manera, a pesar de que sea imposible llevar el espécimen de vuelta al laboratorio para un examen en estado inalterado, es necesario actuar de manera a conseguir toda la información disponible, Esto --- significa que cada espécimen debe ser examinado cuidadosamente, produciéndose una descripción detallada del mismo en el momento de remoción. Olores, colores y otras características que son particularmente susceptibles de cambio,

deben ser observados cautelosamente.

Una cámara equipada para sacar fotos a pequeña distancia es útil, especialmente si está equipada con películas a color. Cuando existe equipo disponible, los especímenes deben ser sacados y puestos en vacío, para en seguida ser descubiertos con una resina a frío. El espécimen --- así preparado puede ser seccionado en cualquier dirección y examinado en fragmentos pequeños o grandes.

Los especímenes de metal atacado por la corrosión después de haber sido limpiados, de manera a usar todos los productos de la corrosión pueden preservarse recubriéndoseles con un barniz transparente. A veces se forman picaduras en estructuras en las cuales no es deseable o --- práctico remover los especímenes. En tales casos, un testigo usual puede ser obtenido preparándose un molde de la superficie atacada por la corrosión. El molde puede conservarse en su forma original (negativo), o se puede preparar un molde positivo. A veces un poco de color, como sea pintar la superficie original de negro y las picaduras de rojo, puede producir un efecto dramático.

PRUEBAS PARA REVESTIMIENTOS

Las pruebas para revestimientos pueden realizarse en el campo, como investigaciones que se extienden por largos períodos de tiempo, o pueden tomar la forma de pruebas aceleradas en el laboratorio. Ninguna de las dos es totalmente satisfactoria. Las pruebas de campo tardan mucho hasta producir resultados útiles; los mismos datos pueden ser obtenidos frecuentemente al examinar la experiencia de otros, a pesar de que una prueba controlada naturalmente suministrará mas información.

Cuando se trata de compensar muchos revestimientos en una prueba de campo, es necesario cuidar el aspecto de exposición a la corrosión. Para revestimiento interno, el mismo flujo de líquido debe pasar a través de cada espécimen, como fue comentado anteriormente. Al comparar revestimientos externos es importante que todos se encuentren colocados en suelo lo mas uniforme posible; eso es muy difícil en la mayoría de los casos. El mejor criterio unitario para comparar suelos en este particular es la resistividad que se puede determinar en el campo -- utilizando un instrumento de cuatro electrodos; las lectu

ras deben situarse en un espaciamiento conveniente de manera a conseguirse un promedio significativo. También es importante que las extensiones y los diámetros de las secciones utilizadas a la comparación de revestimientos sean iguales o aproximados. Una discusión sobre los errores que se puede cometer, cuando no se toman precauciones debidas, será realizada más tarde.

En largos períodos de tiempo, los revestimientos internos pueden ser evaluados por los cambios verificados en los coeficientes de fricción o, (en tuberías de grande diámetro), por inspección directa.

Los revestimientos externos se comparan en condiciones favorables cuando han estudiado a traves de las medidas de la corriente necesaria para la protección catódica, o por la medida de la conductancia del revestimiento.

Esta característica se determina por técnicas muy complicadas, que varían en la extensión de la sección estudiada y otros factores, unicamente consiste en aplicar a la línea (que debe estar aislada de cualquier otra estructura enterrada inclusive otros tramos de (línea)

una corriente intermitente de protección catódica. El comportamiento de la línea está caracterizado por los cambios de potencial observados. Cuando se toman medidas adecuadas para determinar el verdadero cambio de potencial promedio y la variación real de la corriente, su relación es la conductancia del revestimiento de la línea.

Son necesario buenos terminales, conexiones aisladas y otros accesorios para efectuar las medidas, que se deben hacer al instalarse la línea.

Una línea con un revestimiento de buena calidad puede ser impresionada para detectar fallas en el revestimiento, o áreas afectadas en excavación, utilizando el aparato que se denomina Pearson Coating Inspector.

Este es un aparato en el cual un potencial de corriente alterna es impuesto a la línea (eso es, entre la línea y el suelo), con auxilio de un trasmisor. En seguida dos hombres caminan a lo largo de la línea, separados por una pequeña distancia, llevando en los zapatos una placa de contacto metálicas. El potencial entre los dos es captado y amplificado de suerte que las áreas de concentra-

ción de corriente tales como los que ocurren a las proximidades de una falta en el revestimiento, pueden ser localizadas. Este instrumento no tiene mucho uso para líneas muy viejas o cuando el revestimiento es de mala calidad; los lechos son apenas aproximadamente cuantitativas.

Las pruebas aceleradas para revestimientos que se hacen en el laboratorio son populares, pero los resultados deben ser aceptados con precaución. Cuando por ejemplo, un revestimiento es expuesto a un ambiente con 10 veces la conductibilidad de una exposición real, el ataque será más agresivo, pero no es posible decir que es 10 veces más rápido. Además cuando dos revestimientos de composición muy distintas son sometidas a una exposición severa no hay manera de cerciorarse que la relación de aceleración del daño sea la misma.

La prueba acelerada común consiste en colocar los especímenes revestidos en soluciones de conductibilidad mucho más elevada que las normalmente y entonces someterlos a ciertos voltajes, también más altas que las comentadas en la práctica. Las fallas pueden estar indicadas

por una súbita caída en la resistencia del circuito, cuando uno u otro punto se rompe. O el revestimiento puede ser deliberadamente determinado al comienzo, observándose el aumento en la conductancia a la medida que el daño se propaga, a partir del punto de origen.

Estas pruebas son muy severas, y deberán aplicarse siempre con mucho cuidado. Tienen mayor validez cuando se compara revestimientos de composición muy similar, y menos valor cuando los revestimientos son muy diferentes.

PRUEBAS ACELERADAS PARA REVESTIMIENTOS.

realizadas en el laboratorio son muy comunes pero los resultados deben ser siempre aceptados con precaución.

En realidad es más correcto describirlas como pruebas

de intensificación, pues se hacen de manera a que uno ó más factores del problema sean más severas que lo normal.

Es así que puede o no estar bien aceptar que las cosas se pasan como en condiciones normales, pero con una intensidad mayor. El aún menos cierto que cosas distintas (como será el caso con revestimientos de diver

sas naturales) reciben una aceleración equivalente.

La falla en servicio de un revestimiento es un proceso muy complicado, parcialmente químico, parcialmente eléctrico y parcialmente mecánico. Es muy difícil preveer el efecto resultante al cambiar uno o más de los factores del problema; es aún más difícil hacer esta precisión cuando se efectúa un cambio en dos o más factores, o cuando se prueba dos o más tipos de revestimientos.

La prueba usual para revestimientos consiste en introducir en una solución un espécimen, presentando la solución una conductibilidad mucho más alta que aquella normalmente encontrada, y en seguida someter el espécimen a voltajes diversos, normalmente más altas que las encontradas en la práctica así se cambian dos factores, y el resultado es casi siempre una falla prematura del revestimiento. Esto está indicado por una caída súbita en la resistencia total del circuito, y puede ser registrada por un amperímetro, u otro aparato semejante.

Algunas veces se produce un agujero en el revestimiento original y la prueba consiste en comparar la ve-

locidad de ampliación del daño con el voltaje aplicado.

Estas pruebas son muy violentas, y hay duda si realmente son válidas para comparar revestimientos diversos. Cuando son realizadas en dos revestimientos semejantes, los resultados son aceptables, pero parece ser que determinado revestimiento puede fallar, cuando sometido a un potencial excesivo, si bien que dure más que otros, bajo condiciones mas suaves.

En toda la vida estamos cercados de docenas de ejemplos de procesos, cuyas intensidades son afectadas por factores diversos, pero en condiciones que no son lineales. Consideremos, para ejemplificar una cosa sencilla como es el freir un huevo o derretir el hielo.

Lleva más tiempo freir un huevo en la Ciudad de México que en Veracruz, pero cuanto tiempo tardaría esta operación en un avión no presurizado volando a 15,000 metros?.

El hielo se derrite más lentamente a 10°C que a 20°C , ¿pero con que velocidad se derrite a 1°C ? Que para cuando tratamos de comparar las intensidades con que

se derrite el hielo y el CO_2 sólido en temperaturas diversas?. Pero necesitamos pruebas aceleradas. No es posible esperar 10 años para verificar si un nuevo revestimiento es de buena calidad. La única respuesta razonable a este problema parece estar en la utilización de pruebas aceleradas, pero empleando valores diversos de intensidad no solamente uno al mismo tiempo que se intenta extrapolar los resultados. Simultáneamente las pruebas (revestidas) realizadas bajo condiciones normales deben también realizarse, de manera a ser posible preveer alguna sorpresa, antes que sea muy tarde.

La exposición del tema sobre revestimientos hasta el encuentro ha sido limitado a los revestimientos aislantes, o del tipo no conductor.

En otro tipo, tipo muy importante de revestimiento es el empleo del cemento Portland, o del concreto; son utilizados tanto como revestimiento para tuberías a presión de concreto, como también para revestimientos externos.

Un tubo de concreto que trabaja a presión es esencialmente una tubería muy delgada de acero, con un -

revestimiento espeso de concreto, que es reforzado por una varilla en espiral que lo envuelve. La varilla también es recubierta con otra cámara de concreto. La mayoría de la resistencia está en el concreto; la parte de acero tiene más bien, una función de molde. Pero bajo el punto de vista de la corrosión, lo que se tiene es una tubería de acero con un revestimiento de concreto, que contiene unas varillas.

Concreto no es un aislador; en realidad funciona como un electrólito. Pero es un electrólito que tiene propiedades especiales. Uno de estas es que imparte al acero que resiste un potencial más catódico que aquel desarrollado por el acero en el suelo. Esta diferencia es del orden 0.3 volts.

Esta característica fué descubierta por técnicos de corrosión en California, hace algunos años. Una línea de grandes dimensiones en acero estaba revestida de concreto; pequeñas piezas especiales conectadas a la línea en diversos puntos fueron severamente atacados en un pequeño espacio de tiempo. Las piezas fueron reves-

tidas con una pintura de alquitrán, fallas en tiempos aún menores pero eso no resolvió el problema; en algunos casos se verificaban fallas en tiempos aún menores. Naturalmente la instalación consistía en conectar un ánodo muy grande - la línea revestida de concreto con un ánodo muy pequeño - la pieza especial. El revestimiento de las piezas especiales aumentó aún más la discrepancia entre las áreas.

El concreto es un revestimiento para el acero, que en la mayoría de los suelos y exposiciones a corrientes, se dispersa la protección catódica. Entre tanto, algunas medidas son necesarias. El fabricante de tuberías pre-esforzadas debería ser instruido de manera a hacer una conexión eléctrica, por soldadura, entre la varilla tensora y el cilindro de acero en todas las juntas. Entonces, cuando se construye la línea, se hace una conexión por soldadura entre la juntas, de suerte que todo el acero de la línea se torne electricamente conectado.

En caso de tornarse necesario aplicar la protección catódica, estas precauciones harán posibles ejecutarlas tal protección puede ser necesario si la línea pasa a través de una corriente vagabunda, o área de interferen-

cia, particularmente si es el caso de pasar cerca del área anódica de otro sistema de protección catódica.

En ausencia de problemas de corrientes vagabundas, la corriente necesaria para la protección del acero en el concreto es de aproximadamente $1/8$ de aquello necesario para protección del acero desnudo.

Un número aproximado para efecto de cálculo es de 2.5 mileampers por metro cuadrado.

Protección Catódica.— es un método de control de corrosión basado en el hecho que toda corrosión en contacto con un electrólito es electroquímica. Cuando hay corriente, existe corrosión; cuando hay corrosión, existe corriente. La corriente causa la corrosión o es la corrosión que produce la corriente?. No importa, si se puede anular una de las dos, también se anula la otra. Es así que tratamos de aminorar la corriente con revestimiento que aíslan el metal de su ambiente. Si los revestimientos fuesen perfectos, y si nunca sufriesen daños, serían suficientes para evitar la corrosión.

Pero no son perfectos, de suerte que es necesario tomar algunas medidas. Si se introduce una corriente en el electrólito de alguna fuente, y si la corriente es suficientemente fuerte para contrarrestar las corrientes "naturales" de corrosión en todas las partes de la superficie metálica, es posible evitar la corrosión. Cuando el metal es hierro acero, se cree que la protección catódica, sola, sería capaz de evitar completamente la corrosión, por lo menos en la mayoría de los electrólitos.

Para la protección catódica de una estructura en revestimiento es frecuentemente un proceso caro. Por esta razón, un gran número de estructuras son protegidas mas económicamente por una combinación de revestimiento y protección catódica. Inicialmente se aplica en buen revestimiento no necesariamente el mejor de todos, o el mas caro y en seguida se procede a la protección catódica, para proteger las pequeñas áreas que no son cubiertas por el revestimiento.®

En el caso de tuberías, esta regla particularmente no tiene excepciones, la solución más económica del problema de corrosión es la combinación de un revestimiento

cia, particularmente si es el caso de pasar cerca del área anódica de otro sistema de protección catódica.

En ausencia de problemas de corrientes vagabundas, la corriente necesaria para la protección del acero en el concreto es de aproximadamente $1/8$ de aquello necesario para protección del acero desnudo.

Un número aproximado para efecto de cálculo es de 2.5 mileampers por metro cuadrado.

Protección Catódica.— es un método de control de corrosión basado en el hecho que toda corrosión en contacto con un electrólito es electroquímica. Cuando hay corriente, existe corrosión; cuando hay corrosión, existe corriente. La corriente causa la corrosión o es la corrosión que produce la corriente?. No importa, si se puede anular una de las dos, también se anula la otra. Es así que tratamos de aminorar la corriente con revestimiento que aíslan el metal de su ambiente. Si los revestimientos fuesen perfectos, y si nunca sufriesen daños, serían suficientes para evitar la corrosión.

Pero no son perfectos, de suerte que es necesario tomar algunas medidas. Si se introduce una corriente en el electrólito de alguna fuente, y si la corriente es suficientemente fuerte para contrarrestar las corrientes "naturales" de corrosión en todas las partes de la superficie metálica, es posible evitar la corrosión. Cuando el metal es hierro acero, se cree que la protección catódica, sola, sería capaz de evitar completamente la corrosión, por lo menos en la mayoría de los electrólitos.

Para la protección catódica de una estructura en revestimiento es frecuentemente un proceso caro. Por esta razón, un gran número de estructuras son protegidas mas económicamente por una combinación de revestimiento y protección catódica. Inicialmente se aplica en buen revestimiento no necesariamente el mejor de todos, o el mas caro y en seguida se procede a la protección catódica, para proteger las pequeñas áreas que no son cubiertas por el revestimiento.®

En el caso de tuberías, esta regla particularmente no tiene excepciones, la solución más económica del problema de corrosión es la combinación de un revestimiento

con la protección catódica. En casos de líneas ya instaladas, sin revestimiento, o con revestimiento de mala calidad, es normalmente más económico aplicar la protección catódica a la línea, que sacarla y revestirla, pero cada caso debe estudiarse separadamente.

Con otras estructuras la respuesta puede ser distinta. Por ejemplo, hay dudas muy serias si realmente vale la pena pintar o revestir la superficies internas de los tanques de almacenamiento que van a recibir protección catódica. Son usualmente pintados, pero en muchos casos no hay la preocupación de mantener el revestimiento con el pasar del tiempo. Es necesario proteger la superficie arriba de la línea de agua; la protección catódica solamente alcanza la superficie cubierta por el electrólito.

Las plataformas de perforación instaladas en aguas poco profundas en el mar usualmente reciben protección catódica; en muchos casos no se emplean revestimientos, excepto pintura protectora para la estructura, que tiene efecto el tiempo existente entre la construcción y la instalación de la estructura; esta pintura puede determinarse rápidamente, y no es reservada. En otros casos

la estructura completa puede ser galvanizada, o recubierta con una pintura a base de resina epóxica y rica en zinc, - pasa en seguida recibir la protección catódica, como un suplemento.

El problema principal en la protección catódica es aquel de distribución de la corriente. Es necesario mantener una corriente mínima, mismo en las partes más difíciles de alcanzar, y esto significa suministrar toda la estructura a una corriente mayor que la necesaria. Eso representa un desperdicio, a lo mejor, y en algunos casos puede representar también una cantidad de corriente que en realidad produce daños al revestimiento.

Para los interiores de los tanques de almacenamiento, se obtiene una buena distribución poniéndose los ánodos en circuitos. Si el circuito es muy pequeño, - en las proximidades del centro del tanque se obtendrá una excelente uniformidad en la distribución de la corriente, pero la resistencia será mayor que la necesaria; si el circuito es muy grande, en las proximidades de las paredes del tanque la resistencia será baja, pero la distribución será mala. Se establece un compromiso entre los dos casos,

en parte con ayuda de cálculos matemáticos y en parte por métodos empíricos. Es necesario instalar ánodos adicionales, de manera a proteger el fondo del tanque; en el caso de un tanque elevado con una tubería de soporte de grande diámetro, se instala un rosario de ánodos, debidamente aislados de la tubería, y conectados a un rectificador separado, o a un circuito separado del rectificador principal, pues es posible que su resistencia sea mucho menor que aquella de los ánodos principales.

Anodos galvánicos son raramente empleados en este caso; si el agua presenta un bajo contenido de sólidos disueltos, a manera de ser adecuada para uso doméstico, su resistencia es demasiado alta para el uso efectivo de ánodos de magnesio o de zinc; de ahí que casi todos los tanques de almacenamiento de agua para fines domésticos emplean sistemas de circuitos impresos para protección.

Anodos de grafito son utilizados raramente en los tanques; los más comunes son; hierro fundido con alto contenido de silicones (Durirou, 14.5% de silicones), aluminio, y algunas veces platino o titanio platinado en latitudes extremas del norte, donde las condiciones en --

el invierno son muy rigurosas, los ánodos pueden ser destruidos por el hielo; el aluminio es un material muy usado en estos casos, pues puede ser instalado de manera a consumirse en una estación. Cuando el hielo no es un problema, hierro con alto contenido de silicones es el material preferido, En algunas localidades el agua viene de manantiales o fuentes de las montañas, y consiste, en su gran mayoría, de nieve derretida.

Esta agua tiene un contenido de sólidos muy bajo, y por eso una baja conductibilidad. Por otro lado presenta un contenido de oxígeno disuelto muy alto, pudiendo ser extremadamente agresiva. Esto significa que la protección catódica requiere, sea un rectificador de voltaje de alto poder (que no solamente es caro, pero también peligroso) o un área anódica grande.

El problema se resuelve con la utilización de pedazos relativamente delgados de aluminio; el gran área suministra la baja resistencia necesaria, y los ánodos pueden consumirse en una sola estación.

Una ventaja del aluminio para este tipo de instalación, es que a pesar de disolverse con el uso, los --

productos de la corrosión no tiene color, olor, sabor y no son nocivos, de manera que no imparten ninguna característica indeseable al agua. Un ánodo de acero sería igualmente efectivo en la que se refiere a la protección, pero sus efectos en el agua serán nocivos.

Las superficies interiores de las grandes tuberías de agua pueden protegerse, pero existen algunos problemas especiales en el caso. Los ánodos deben instalarse - quizás cada diez diámetros en la tubería, de manera a conseguirse una distribución de la corriente, cada ánodo requiere una pieza especial para soportarlo y tomar posible la conexión eléctrica necesaria. Solamente se permite utilizar ánodos insolubles, pues los que se disuelven pueden desintegrarse, y pedazos del ánodo causarán dificultades en las válvulas, bombas o piezas especiales situadas aguas abajo. Hierro con alto contenido de silicones, plástico y aleaciones de plomo plata han sido utilizados en estos casos.

Quando se trata de agua de enfriamiento para intercambiadores de color o condensadores, pueden existir dos problemas, que no se encuentran en el caso del agua potable. El contenido de sólidos y portando la Conductibili-

dad pueden ser mucho más altos, y la temperatura también será más alta. Un problema adicional es frecuentemente aquel de encontrar espacio para instalar los ánodos.

La alta conductibilidad frecuentemente encontrada puede hacer posible el uso de los ánodos galvánicos. Esto presenta la ventaja adicional que en el caso de un contacto adicional entre el ánodo y la estructura, no se interrumpe la protección (a pesar de que puede reducirla); mientras que un contacto entre un ánodo activado por un rectificador y la estructura, usualmente resultará en la operación de un interruptor de circuito; mismo que se mantenga la corriente, la protección se pierde casi totalmente.

Quando se utiliza un circuito impreso, los ánodos que entran en solución y contaminan el agua pueden ser perfectamente pervisibles. Si se desea ánodos permanentes, el hierro (alto) con alto contenido de silicones es un buen material. Si hay cloruros presentes, es conveniente usar una modificación de la aleación de alto contenido de silicones, en la cual se añade un pequeño porcentaje de molibdeno. Esta combinación o, de hecho cualquier protección catódica en agua salada o salobre debe emplearse so-

lamente en recipientes abiertos; hay generación de cloro -- que puede significar un riesgo de toxicidad o de explosión.

Algunas instalaciones usan agua de enfriamiento de una fuente que puede variar desde dulce hasta salada, de acuerdo con la precipitación pluviométrica y el conocimiento de las mareas. Aquí se necesita un rectificador auto-regulable, de manera a entregar la cantidad de corriente adecuada, de acuerdo con las variaciones, Estas -- unidades de corriente constante son útiles también en otras aplicaciones.

Posiblemente la aplicación en mayor escala de la protección catódica se realiza en las tuberías, líneas de conducción de gran extensión, especialmente aquellas que transportan gas o derivados de petróleo son casi siempre protegidas. Las de transporte de aceites son más raramente protegidas, y las de agua, aún menos. Cuántas partes de la diferencia se explica por la seriedad relativa de las fugas en las distintas categorías de líneas. -- Una pequeña fuga en una línea de agua representa un inconveniente algún costo de reparación, pero no mucho. En una línea de transmisión de alta presión que transporta gas, -

no existe lo que podría ser una pequeña fuga; cuando hay -- una falla en la línea, ella explota en la mayoría de los casos, y frecuentemente se produce un incendio del gas; puede verificarse grandes pérdidas de propiedades o mínimo de vidas.

El problema principal aquí es el usual, o sea, distribución de corriente para obtenerse la corriente mínima necesaria en el punto más difícil de alcanzar es necesario suministrar más corriente que aquella de protección al restante de la línea. La distribución de corriente mejora cuando se utiliza un grande número de pequeñas unidades; pero los costos de tal sistema pueden ser mayores que aquellos de un sistema con pocas unidades de grandes dimensiones. Cada problema debe ser resuelto separadamente; la situación ideal es de obtener protección al menor costo posible no necesariamente con la menor cantidad de corriente.

En una línea de gran potencial protector de un rectificador decrece logarítmicamente en cada sentido. -- Esta función estará representada en papel semi-logarítmico como una línea recta; eso es, en papel con una escala aritmética en las abscisas, representando distancias en la línea,

y una escala logarítmica en las ordenadas, representando los cambios en potencial debidos a la corriente suministrada. No se lleva en cuenta los efectos de la polarización.

La ecuación para la distribución de potencial es:

$$\Delta E_x = \Delta E_0 e^{-\alpha x}$$

Siendo ΔE_x el cambio de potencial a una distancia x , ΔE_0 es el cambio de potencial en el origen (localización de la unidad), e es la base de logaritmos naturales y α es una constante que depende de la conductancia del revestimiento y de la resistencia longitudinal de la línea;

$$\alpha = \sqrt{rk}$$

Siendo k la conductancia, en ohms por unidad de longitud y r la resistencia longitudinal, en ohms por unidad de longitud. Deberá notarse que la constante tiene las unidades de por unidad de longitud. Esta constante se determina, normalmente, no por mediciones de k y r , sino directamente por la disminución del potencial que se observó a lo largo de la línea que se prueba. La forma de la expresión para la disminución de la corriente que

pasa por la línea es precisamente la misma:

$$\Delta I_x = \Delta I_0 e^{-\alpha x}$$

Otra forma para la expresión, que es útil para derivar las constantes de la línea, de datos experimentales es:

$$\alpha L = \log_e (\Delta E_a / \Delta E_b) \quad \alpha L = \log_e (\Delta I_a / \Delta I_b)$$

donde a y b son dos puntos en la línea, y L es la distancia entre ellos se debe notar que esta expresión solamente es válida si la línea es suficientemente extensa, de manera que la disminución es esencialmente logarítmica; esto se puede constatar, observando que en papel semi-logarítmico se obtiene una recta para la curva de disminución.

Quando la línea, en lugar de ser extensa termina por una junta aislada que se situa dentro del rango de efectos mejorables de la unidad, entonces las ecuaciones tienen una forma distinta. El cambio de potencial en cada punto es dado por:

$$\Delta E_x = \Delta E_1 \cos h \alpha L,$$

siendo ΔE_1 el cambio de potencial en un punto cualquiera situado a una distancia L del extremo de la línea, ΔE_1 es -

la variación de potencial en este extremo, x es la constante de disminución ya definida, y esto se refiere a coseno hiperbólico, Deberá observarse que el potencial está referido aquí como una función, no del potencial en el origen, sino en la extremidad; eso es una forma no solamente más sencilla, pero también más útil en muchos casos. Una expresión más complicada permite calcular el potencial y la corriente referidos a sus valores en el origen:

Existen muchas otras formas posibles de expresar estas relaciones; las dadas son, de una manera general, las más útiles.

Cuando una línea uniforme de gran extensión tiene dos unidades en operación, sin existir ninguna junta aislada entre ellas, entonces la distribución de potencial y corriente entre ellas sigue las expresiones anteriormente dadas para una línea terminada. El punto en este caso no es una extremidad de la línea, sino el punto intermedio entre las dos unidades, el punto donde la variación del potencial es un mínimo, y la corriente en la línea es cero.

Es interesante notar que la forma de la curva de potencial en este caso es de una categoría o sea, la curva correspondiente a una cadena perfecta suspendida entre dos puntos; estas pueden estar a la misma elevación, o en elevaciones distintas.

En el diseño de la protección catódica, el método usual de cálculo de la curva de variación de potencial entre las dos unidades (real o presupuesto) consiste en trazar las dos curvas de disminución logarítmicas aquellas que obedezca a la primera ecuación dada para las dos unidades separadamente, y en seguida sumar aritméticamente los cambios de potencial, trazando la curva combinada. El resultado final es el mismo; de esta manera fueron derivadas matemáticamente las ecuaciones anteriores.

Estas ecuaciones hacen posible resolver el problema de diseño de un sistema de protección catódica, para una línea extensa de manera racional. ®

El procedimiento por etapas es como sigue.

(1) Hacer una serie de medidas de diferen--

cias de potencial entre la tubería y el suelo muchos puntos de la línea; en estos puntos ya están instaladas los terminales para las pruebas. Durante esta operación, verificar si las etiquetas de protección instaladas en los cruces están en corto circuito con la línea. Cada una de las lecturas es conocida como potencial "estático" o natural.

(2) En puntos seleccionados en la línea -- (normalmente donde sería recomendada la instalación de un rectificador), instalar una fuente temporal de energía y una causa anódica, y drenar una corriente interrumpida de la línea.

(3) Mientras la corriente interrumpida es ta siendo drenada, proceden a una lectura en los puntos donde se sacaron los potenciales estáticos, y en cada uno hacer la lectura con la corriente ligada y desligada.

Estas lecturas se hacen en los puntos de drenaje, los más alejados posibles del origen, pero donde si es aún posible realizar la lectura.

(4) Si el paso (3) no cubre toda la línea,

repetirse las operaciones en tantos puntos adicional como sea necesario.

(5) Al mismo tiempo (o en el tiempo más conveniente) investigar lo posible localización para los rectificadores; hacer lecturas de la resistividad del suelo y observar la localización de líneas de fuerza.

Es necesario también, considerar los posibles problemas legales de derechos de propiedad para las instalaciones.

Los cinco pasos descritos completan el trabajo de campo. Se procede, entonces a derivar el sistema en la oficina, seguido los pasos que se describen a continuación.

(6) Para cada una de las pruebas realizadas en (3) y (4), trazar la curva mostrando el valor de ΔE (potencial en la corriente conectada menos potencial en la corriente desconectada en cada punto) como una función de localización a lo largo de la línea. Si es conveniente, estos pueden ser todos incluidos en un solo diagrama. Actualmente es buena practica dibujar esta curva en el campo,

según el trabajo progresa, para estar seguros que la línea -
esta completamente cubierta.

(7) Hacer una selección preliminar de un jue-
go posible de rectificadores de lugares. Tomando en cuenta
la actividad de poder, los lugares donde la resistencia de -
la tierra es baja y por las condiciones de unidad de la tie-
rra juntas. Este primer paso envuelve juicio y experiencia a
un gran grado.

(8) Planear en una diagrama similar a esos -
que se describieron en el paso (6), los efectos predichos -
de cada una de estas unidades por separado. El potencial en
cada punto de desagüe puede ser predicho de los resultados
obtenidos en las diferentes pruebas, y los declives de la -
atenuación de las curvas son las mismas como en las pruebas.

(9) Combinar los valores de ΔE en cada punto,
usando tanto como sean lo suficientemente largos para ser im-
portantes (usualmente únicamente las dos unidades adyacentes
serán envueltas) entonces en cada punto donde un potencial -
estático. Obtenido, agregue a este la suma de los valores de
 ΔE . El resultado será, en cada punto de la línea, el va-

lor predicho del potencial el cual será dado por el juego -
imaginario de unidades seleccionadas en el paso (7). Notese
que ninguna cuenta ha sido tomada de los efectos de la pola-
rización. Esto resultará en un potencial más alto que el --
predicho por los medios descritos; esto puede ser admitido
para alguna extensión observando las diferencias, en las di-
ferentes pruebas, entre el potencial apagado y la estática;
esta diferencia se debe a la polarización.

(10) En este conjunto de unidades imagina--
rias, no se da un potencial de por menos 0.85 Volts en
cada punto, entonces hay que hacer otra selección y repe-
tir el paso (7) a través del (10). Aún si esto sucede, hay
la posibilidad que alguna otra combinación hará la misma -
cosa a un costo menor. Aquí la experiencia y juicio frecuen-
temente ahorrarán mucho tiempo y esfuerzo. Brevemente, el -
proceso completo puede ser descrito como sigue:

(1) Una serie de pruebas determina el efecto
de cualquier número de sistemas protectores posibles, junto
con sus costos. De este juego los más económicos son escoji-
dos. Este es todo el trabajo de oficina, el cual es mucho -
más caro que en el campo de trabajo.

Extensas líneas de tubería bien recubiertas son casi las únicas estructuras cuya protección puede ser planeada en esta manera. Estructuras lisas, tales como tanques de agua interiores, o grandes estructuras de acero en aguas de mar, están planeadas en una base de densidad de corriente, la corriente requerida es cerca de 20 ma/m². Esto puede ser prolongado a otras resistividades por la regla; para cada aumento 10 veces en resistividad, hay una disminución 10 veces en corriente requerida y viceversa. Entonces tendremos aproximadamente

100,000	ohms-cm	requiere	5	miliampers por metro cuadrado
10,000			10	
1,000			20	
100			40	
10			80	

Esto indicará 55 miliampers por metro cuadrado para el agua de mar (aproximadamente 30 ohms por cm). Esto es aproximadamente correcto una vez que la polarización se ha obtenido; pero puede requerirse dentro como dos veces este valor o sea 100 miliampers por metro cuadrado aseguran la polarización un tiempo bastante razonable. Después todas las necesidades de corriente disminuirán por un

período de años; después de 10 años una estructura cuya protección ha sido mantenida continuamente puede necesitar tan poco como 20 miliampers por metro cuadrado o tal vez menos, este descanso en la corriente no ocurre a menudo en aguas nuevas.

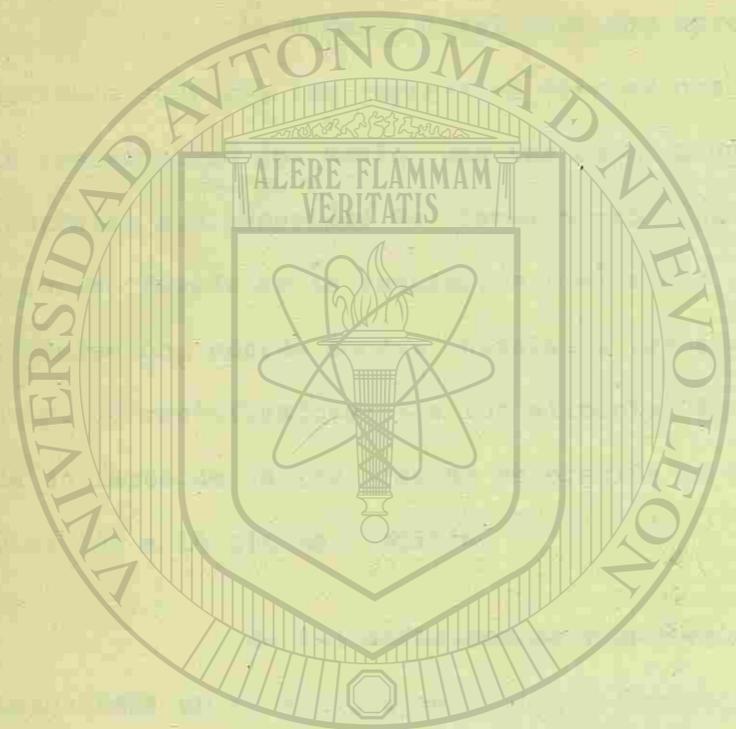
Instalaciones de tubería complejas, tales como sistemas de distribución municipales deben de sectionarse por medio de aislamientos en las puntas, las secciones pueden entonces ser protegidas mediante instalaciones de ánodos galvánicos, con poco peligro de interferencia para otros sistemas. Pruebas sencillas pueden seguirse para determinar la corriente requerida; las secciones serán tan cortas que no habrá efectos de atenuación apreciable.

Instalaciones mucho más complejas como las que se encuentran en refineries y plantas similares, requieren un tratamiento diferente. Aquí el objeto es realmente proteger todo dentro de los límites de la planta; tuberías, cable, conductos eléctricos, metal reforzado, cable de tierra fondos de tanques y todos los demás materiales que están en contacto con el suelo.

La distribución de corriente, así como la -
demanda total de corriente es el verdadero problema.

La demanda total debe ser aproximadamente -
estimada conforme los registros; esto es complementado por
la resistividad del suelo una vez catalogada en el área -
completa; sin necesidad de llevar a cabo una prueba de co-
rriente. Basado en la estimación preliminar se efectúa una
instalación, usando ánodos instalados permanentemente y un
juego de rectificadores que los alimente. Entonces después
de un lapso de varias semanas se efectúa un estudio de pola-
rización a la planta completa.

De las deficiencias visibles en protección
demostrada en el estudio se instalan ánodos y rectificado
res adicionales que se requieran. Este proceso se repite -
hasta que sigue una protección adecuada. Este método puede
ser descrito no como "de prueba y error" sino como de prue-
ba y de éxito parcial, ningún daño ocurre por la instala-
ción de un sistema que no sea suficientemente grande, pue-
den hacerse las pruebas de corriente requeridas para el --
resto del sistema en tal caso.



Universidad de Nuevo León
Departamento de Extensión Universitaria
Sección Editorial
Imprenta Universitaria

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



