



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



REMOCION ELECTROLITICA DE
SILICE EN AGUAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

GUILLERMINA FLORES BONILLA

ASESOR: M. en C. LUIS CEDERO CAERO

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1983



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	pag
Introducción	4
Capítulo 1. Generalidades.	
1.1 Silice.....	8
1.2 Consecuencias de la presencia de silice en el agua..	9
1.3 Tratamiento de agua para sistemas de enfriamiento..	10
1.4 Métodos convencionales de remoción de la silice....	16
1.4.1 Métodos por adsorción.....	17
1.4.1.1 Por hidróxido de aluminio.....	17
1.4.1.2 Por hidróxido férrico.....	17
1.4.1.3 Por cal sodada y magnesia en frío.....	18
1.4.1.4 Por cal sodada y magnesia en caliente..	21
1.4.2 Otros métodos de remoción.....	23
1.4.2.1 Por destilación.....	23
1.4.2.2 Por intercambio iónico.....	24
1.5 Tratamiento electrolítico.....	27
1.5.1 Remoción de fenoles.....	28
1.5.2 Recuperación y remoción de metales.....	29
1.5.3 Remoción de cianuros.....	29
1.5.4 Tratamiento electrolítico de efluentes.....	30
domésticos.	
Capítulo 2. Trabajo experimental.	
2.1 Equipo electrolítico.....	32
2.2 Experimentos preliminares.....	33
2.3 Experimentos propios del proyecto.....	33
2.3.1 Agua de alimentación.....	33
2.3.2 Proceso continuo.....	34
2.3.3 Proceso en lotes.....	35
2.4 Experimentos para determinar el mecanismo de remoción	
2.4.1 Experiencia 1.....	36
2.4.1 Experiencia 2.....	36

2.5	Análisis de muestras.....	37
2.5.1	Medición de pH.....	37
2.5.2	Medición de conductividad.....	37
2.5.3	Técnica de medición de sílice.....	37
2.5.4	Técnica de medición de hierro.....	38
2.5.5	Técnica de medición de aluminio.....	39
2.5.6	Determinación de presencia de sílice.....	39

Capítulo 3. Resultados experimentales y análisis de ellos.

3.1	Resultados preliminares de remoción de sílice.....	41
3.2	Observaciones.....	42
3.3	Reacciones que se llevan a cabo durante el tratamiento.....	42
3.4	Remoción de sílice en lotes con electrodos de hierro y aluminio.....	44
3.5	Remoción de sílice en continuo con electrodos de hierro y aluminio.....	46
3.6	Mecanismo de remoción.....	48
3.7	Otras consideraciones del tratamiento.....	51

Conclusiones	58
--------------------	----

Apéndice A. Datos experimentales.....	62
---------------------------------------	----

Apéndice B. Diagramas de solubilidad.....	74
---	----

Apéndice C. Estimación de costos.....	79
---------------------------------------	----

Bibliografía	80
--------------------	----

INTRODUCCION

INTRODUCCION

La sílice, es una sal que se encuentra en todas las aguas naturales y puede estar presente en cantidades que varían de 1 ppm (mg/l) o menos hasta más de 100. En las torres de enfriamiento, debido a la evaporación, las sales contenidas en el agua tienden a concentrarse; si la concentración alcanza valores mayores de 100 ppm, la sílice (SiO_2) puede reaccionar con magnesio o calcio para formar depósitos de silicatos de magnesio o calcio insolubles. Estos depósitos o incrustaciones se forman en la superficie por la que pasa el fluido y pueden interferir con la transferencia de calor y el flujo continuo, disminuyendo la eficiencia del sistema.

Con base en lo anterior y en virtud de que el costo del agua es cada vez mayor, se han desarrollado diversos métodos para remover la sílice y otras impurezas, con la finalidad de reutilizarla.

En este trabajo de investigación experimental, se exponen los resultados de la capacidad del tratamiento electrolítico, como una nueva alternativa, para remover sílice del agua de purgas de torres de enfriamiento.

OBJETIVOS.

Los objetivos a cumplir son los siguientes:

- 1) Evaluar la capacidad del tratamiento electrolítico para remover sílice.

- 2) Determinar condiciones de operación óptimas para la remoción de sílice en aguas de recirculación de torres de enfriamiento.
- 3) Proponer un mecanismo por el cual se lleve a cabo la remoción.

En el capítulo 1 se citan las consecuencias que puede ocasionar la sílice en el agua, los métodos de remoción convencionales que existen, el daño que ocasiona en las torres de enfriamiento y por último una descripción del tratamiento electrolítico. En el capítulo 2 se desarrolla el procedimiento que se llevó a cabo durante la experimentación, así como los materiales, métodos y técnicas de medición. En el capítulo 3 se expondrán los resultados obtenidos durante el tratamiento así como su discusión, donde se da respuesta a los objetivos propuestos y finalmente se presentan las conclusiones del estudio.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

GENERALIDADES

A continuación se cita una breve descripción de la sílice, así como también los problemas que causa en las aguas industriales, los métodos convencionales que existen para removerla y por último se explica en que consiste el tratamiento electrolítico.

1.1 SILICE.

La sílice (SiO_2) es por mucho el principal componente de la corteza terrestre, constituye el 70 % de ésta, ya sea pura o combinada con otros elementos, es un constituyente principal del granito, feldepasto, arcilla y buena parte de otros minerales, se le encuentra prácticamente en todas las aguas naturales y puede estar presente en cantidades que van desde 1 ppm o menos hasta más de 100. Lo anterior se refiere al contenido de sílice soluble (H_4SiO_4) y no a la sílice que pueda estar presente como materia suspendida. La sílice suspendida (SiO_2) puede ser removida del agua por coagulación y filtración, pero estos procesos tienen un efecto pequeño o ninguno en la reducción de sílice soluble.

Los silicatos sirven como inhibidores anódicos, ya que forman una delgada película protectora sobre la primera capa de corrosión producida sobre la superficie del metal en el interior de las tuberías. La reacción que ocurre en las áreas anódicas da como resultado la formación de películas de óxido de fierro-silicatos. La concentración de sílice necesaria para ser un inhibidor de la corrosión, esta en el rango de 8 a 40 ppm. Los silicatos también se

usan en muchos procesos de coagulación para el ablandamiento de aguas de calderas.

1.2 CONSECUENCIAS DEL SILICE EN EL AGUA

Las sustancias que forman lodos (depósitos no adherentes) e incrustaciones (depósitos adherentes) son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice.

La sílice es particularmente dañina en las modernas calderas de alta presión, en donde presenta pronunciadas tendencias a depositarse. Si hay calcio presente, el depósito formado puede ser de silicato de calcio; si hay alumina soluble, el depósito es un aluminosilicato, y bajo otras condiciones los depósitos pueden consistir casi completamente de sílice. Esto, sin embargo, no agota todas las posibles combinaciones, ya que la sílice de por sí, puede presentarse en diversos compuestos, como silicatos dobles con alúmina o hierro y varias bases. Estos depósitos de sílice usualmente son muy duros, vidriados, adherentes, difíciles de remover y ocasionan que disminuya el área de flujo y la transferencia de calor. La sílice es frecuentemente arrastrada por el vapor, formando depósitos en el recalentador y en los álabes de las turbinas. Mientras que esta acción se atribuye a arrastre mecánico, hay otra explicación que se ha propuesto, y es que, la sílice es soluble hasta cierto punto en vapor de alta presión. Por lo que en calderas operadas a 600 psi o más, frecuentemente se hace necesario un tratamiento de agua para eliminar la sílice. Esto se efectúa no solamente para prevenir los depósitos de sílice en la caldera, sino también para evitarlos en los

álabes de las turbinas, ya que estos pueden presentarse aunque no haya depósitos serios en la caldera.

En calderas de baja y moderada presión, los depósitos de sílice pueden evitarse manteniendo un pequeño exceso de fosfatos y una razón de alcalinidad a sílice de cuando menos 1:1 en las purgas de las calderas.

Las incrustaciones pueden existir no sólo en las calderas de vapor sino también en equipo que maneja agua de enfriamiento, como condensadores, torres de enfriamiento, máquinas de combustión interna y otros equipos enfriados por agua. Más aún, los depósitos no se forman en una capa de grueso uniforme sobre el área de transferencia de calor. Más bien el depósito se forma rápida y consecuentemente de mayor grueso, en puntos en que la transferencia de calor es mayor. A medida que los depósitos aumentan en grosor, estas diferencias de temperatura aumentan, hasta que finalmente son tan grandes que el metal falla por sobrecalentamiento.

Frecuentemente la madera utilizada en la construcción de las torres de enfriamiento es seriamente dañada por la acción de las sales concentradas que se depositan sobre ella debido a la evaporación y al crecimiento de hongos. Cuando ocurre tal acción, la resistencia de la estructura puede llegar a debilitarse tanto que se requiera reemplazarla. Por lo tanto, un acondicionamiento adecuado del agua de recirculación y una selección apropiada del material de construcción de las torres disminuirá grandemente la velocidad del ataque destructivo químico y biológico sobre las torres.

Usar agua para enfriamiento con alto contenido de sílice puede conducir también a la formación de depósitos de sílica y estos son la

causa de un número de condiciones de operación indeseables. Algunas de éstas como ya se mencionó son: 1) irregularidades en la transferencia de calor, 2) cierre inesperado de los equipos, por lo tanto, acortamiento de la vida de los equipos, 3) incremento en los costos de bombeo, 4) corrosión del equipo, 5) desarrollo de inhibidores de corrosión débiles y 6) productos de baja calidad debido a la ineffectividad de enfriamiento.

Puesto que no se conocen efectos fisiológicos negativos del silicio en el agua, no existen límites de tolerancia ni valores de orientación para el agua potable. Se ha propuesto incluso un contenido de unas 10 ppm de sílice para la formación de capas protectoras anticorrosivas de SiO_2 en las tuberías de agua potable.

En muchas aguas de proceso, la sílice, hasta donde se conoce tiene usualmente poco o ningún efecto dañino en los productos. En el caso de ciertos productos celulósicos, sin embargo, un alto contenido de sílice en el agua de proceso puede aumentar el contenido de cenizas del producto final. También se ha dicho que un alto contenido de sílice puede dar al papel características de estañado.

Tipos de depósitos de la sílice:

Los depósitos de sílice no combinada, por ejemplo el cuarzo y cristobalita, se forman debido a la alteración hidrotérmica de silicatos sólidos o por cristalización directa de la sílice disuelta. El cuarzo es uno de los minerales más duros pero en los depósitos formados por el agua el tamaño del cristal es pequeño, de manera que este depósito no tiene la extrema dureza del mineral natural. La

singular propiedad que tiene este material de disolverse en vapor de alta temperatura, permite su cristalización como un sólido, cuando se reduce la temperatura. La cristobalita es otra forma de sílice cristalina que se encuentra en los depósitos de turbinas de vapor. También se puede encontrar sílice no combinada como componente de las incrustaciones silíceas de las calderas.

La presencia de sílice libre en los depósitos de los intercambiadores de calor se debe al depósito de arena o tierra suspendida en el agua de enfriamiento. Las propiedades de estos depósitos dependen en gran parte de la sustancia que forma la matriz sobre la que se fijan los granos individuales de sílice.

Los silicatos de elementos catiónicos individuales, se clasifican como silicatos simples. Tanto el silicato de sodio como el de magnesio, cuando se forman hidrotérmicamente, contienen agua de hidratación. La composición de los sólidos depende de la temperatura y de la presión, así como de las concentraciones relativas de los iones disueltos que participan en la reacción.

Los silicatos hidratados de magnesio, serpentina ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), talco ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y sepiolita ($2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), son compuestos suaves, más bien amorfos y su detección por medios instrumentales no siempre tiene éxito. Es más frecuente que formen parte de lodos suaves que de capas duras. Se producen por alteración y cristalización de un complejo de absorción de sílice disuelta en hidróxido de magnesio. La serpentina se forma en muy diversas condiciones y por esta razón es la más común de las tres formas.

Al igual que los silicatos de magnesio, los silicatos hidratados de calcio, girolita ($2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), xenolita ($5\text{CaO} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y

fosaguita ($5\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), son poco cristalinos, sin embargo, al contrario de aquellos son duros, resistentes y sumamente aislantes. La forma más común es la xenolita.

Los silicatos anhidros simples, fayalita ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), olivino ($2(\text{MgFe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) y forsterita ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), por lo común son productos de deshidratación a alta temperatura de las correspondientes formas hidratadas. La winemita ($2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$) es una de las pocas formas de silicatos simples anhidros que se forman hidrotérmicamente.

Los silicatos de sodio, Na_2SiO_3 y beta $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, son algo solubles en vapor de alta temperatura y, por lo tanto, son componentes, por ejemplo, de los depósitos de los álabes de las turbinas. Su solubilidad en agua es apreciable, de manera que pueden eliminarse lavando internamente la turbina con vapor húmedo.

Los silicatos compuestos por más de un elemento catiónico se clasifican como silicatos complejos. Estos compuestos formados hidrotérmicamente a menudo se cristalizan en ambientes donde hay una entrada alta de calor y casi siempre son hidratados. En las regiones que reciben un elevado flujo de calor, se eleva notablemente la concentración de sales que contienen silicato de sodio presentes, por ejemplo, en la caldera. En estas zonas existen condiciones favorables al desarrollo de reacciones entre los óxidos de aluminio, hierro y calcio, para formar los silicatos sódicos complejos correspondientes. Los depósitos de silicatos sódicos complejos no se corrigen fácilmente mediante el tratamiento de agua, ya que pueden formarse sin que haya dureza presente. Todos son muy duros y adherentes y resisten la disolución mediante los procedimientos ordinarios de

limpieza con ácidos. Se pueden formar sobre las superficies que generan vapor o por reacción con el silicato de sodio y los óxidos de hierro acumulados, como es el caso de la acmita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$).

La analcita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es el análogo de aluminio más común y puede estar presente en los lodos al igual que en los depósitos. La natrolita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la noselita ($5\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{SO}_3$) se presenta con menos frecuencia que la analcita. También se ha encontrado acmita en los álabes de las turbinas, lo cual sugiere que los componentes de la reacción pueden ser solubles en vapor.

La concrenita ($4\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{CO}_2 \cdot 9\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) se forma cuando hay lodo de calcio en un líquido reaccionante concentrado en silicato y aluminato de sodio. La pectolita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) es una incrustación de calderas que se produce en condiciones libres de aluminio.

Debido a la reacción compleja que puede ocurrir cuando hay sílice en el agua, el uso o supresión de compuestos silicosos deberán ser evaluados y controlados a base de una amplia experiencia

1.3 TRATAMIENTO DE AGUA PARA SISTEMAS DE ENFRÍAMIENTO.

Antes de seleccionar el tratamiento para acondicionar el agua de enfriamiento recirculada, deben considerarse varios factores, uno de ellos es la calidad del agua de entrada. Si la calidad del agua cruda es aceptable, tales incrustaciones pueden ser evitadas limitando la sílica en el agua de recirculación a un máximo de 100-150ppm (como SiO_2). En algunos casos, el contenido de sílica en el agua cruda de suministro puede ser un factor limitante para determinar el número de

ciclos de concentración que pueden ser mantenidos en el sistema de agua de enfriamiento.

El criterio de calidad para las aguas de enfriamiento es, por lo general, más amplia, es decir, menos específico que para las aguas de proceso o las destinadas a calderas. El contenido de sílice en el agua de enfriamiento no es tan crítico y para una operación óptima se requerirá un análisis menos sensible, aunque con suficiente precisión en ambos sistemas. Generalmente se prescribe para las aguas de enfriamiento que no sean capaces de originar incrustaciones o lodos en los equipos de proceso o auxiliares, o bien, proporcionar apoyo a organismos acuáticos en los conductos, tanques y otros equipos de los sistemas de enfriamiento.

Las aguas de enfriamiento se pueden conservar mediante recirculación, se puede evitar que las sales y residuos insolubles se acumulen hasta niveles indeseables si se recurre al bombeo o purgado continuo (el líquido que se descarga de las torres de enfriamiento con frecuencia se denomina agua de purga).

Los tratamientos químicos para aguas de enfriamiento son de dos tipos: internos y externos. Los tratamientos externos para el agua de repuesto a una torre de enfriamiento son raros ya que son muy caros, sobre todo cuando se manejan flujos de agua muy elevados.

Entre las operaciones que involucran un tratamiento externo se cuentan la clarificación, ésta es básicamente para remover toda la materia suspendida; la filtración para eliminar impurezas y color; la suavización para remover del agua a la dureza de calcio y magnesio principalmente; la desmineralización para quitar a todos los aniones y cationes entre ellos además la sílice.

Con estos tratamientos externos se logra acondicionar el agua antes de entrar a la torre para que no ocasione ninguna clase de problema con excepción del crecimiento bacteriológico el que se controla dentro de la torre. Sin embargo, al manejar grandes flujos de agua es necesaria la instalación de equipos sumamente grandes para hacer estos tipos de tratamiento, razón por la cual no se trata casi nunca el agua de esta forma.

Por otro lado es más económico tratar el agua dentro de la torre con productos químicos que sirvan para evitar que el agua ocasione problemas.

1.4. MEDIOS CONVENCIONALES DE REMOCION DE SILICE.

Se ha realizado una extensa investigación para determinar formas y medios de controlar los depósitos de sílice, pero hasta el presente, no ha sido desarrollado un procedimiento de control totalmente adecuado. La destilación o el paso a través de intercambiadores aniónicos fuertemente básicos remueven la sílice. Sin embargo, es más común su adsorción sobre precipitados acuosos formados: 1) de hidróxido de aluminio, 2) hidróxido férrico, 3) hidróxido de magnesio, 4) por proceso de ablandamiento cal sodada y magnesio en frío y 5) por ablandamiento de cal sodada y magnesio en caliente.

1.4.1. METODOS POR ADSORCION.

1.4.1.1 Remoción de sílice por hidróxido de aluminio.

La mayor parte de los precipitados formados en el ablandamiento o en la clarificación del agua, adsorberán algo de sílice, especialmente los compuestos de elementos alcalino-térreos y metales. De éstos el carbonato de calcio es el menos efectivo, y los hidróxidos formados de hierro, magnesio y aluminio son los más eficientes. Sólo se han empleado comercialmente, hasta cierto grado, compuestos férricos y de magnesio. Sin embargo, Lindsay y Ryznan¹ descubrieron que el hidróxido de aluminio, precipitado del aluminato de sodio a un pH de 8.3 a 8.7, es capaz de reducir la sílice desde más de 6 ppm a menos de 2 ppm. pero siendo excesiva la dosis requerida. Subsecuentemente se propuso el proceso de preparación electrolítica de hidróxido de aluminio a partir de un ánodo de aluminio para el tratamiento de remoción de sílice².

1.4.1.2 Eliminación de sílice por hidróxido férrico.

En la eliminación de sílice por este método, usualmente se emplea sulfato férrico con cal. a un pH óptimo alrededor de 9.0, para formar hidróxido férrico:



La dosificación requerida depende del contenido de sílice en el agua y la cantidad de ella que desee eliminarse, pero en general la dosificación es alta, de 3 a 20 ppm de sulfato férrico por cada ppm

de sílice eliminada. Esto aumenta el contenido de sulfatos del agua y cuando el agua se ablanda por procesos de precipitación, aumentará el contenido de sólidos totales, de aquí que este proceso de eliminar sílice se haya casi abandonado. Sin embargo, existen aplicaciones específicas en las que resulta conveniente sobre el proceso que utiliza magnesio.

1.4.1.3 Eliminación de sílice por el proceso de cal sodada y magnesia en frío.

La remoción es mucho menos eficiente y adaptable en ablandamiento por el proceso en frío, que en suavización por el proceso en caliente. A 10°C, la remoción de cada ppm de sílice por arriba de 15 ppm requiere la precipitación de aproximadamente 30 ppm de dureza y de magnesio, y esta baja eficiencia se ve aún más disminuida conforme se reduce la sílice bajo este nivel. A 21.1°C, la relación es de 1 ppm de sílice removida por cerca de 6 a 7 ppm de dureza de magnesio reducida, y la eficiencia aumenta rápidamente si la temperatura sube.

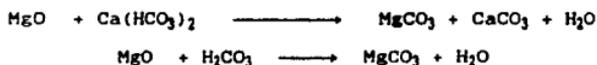
Cuando la dureza natural de magnesio en el agua cruda que precipita como hidróxido de magnesio, no es suficiente para reducir la sílice, se puede adicionar sulfato de magnesio soluble, cal dolomítica u óxido de magnesio.

El sulfato de magnesio es relativamente ineficiente a causa de su costo y del incremento en el contenido de sulfatos del agua.

Se puede obtener óxido de magnesio como compuesto preparado para tratamiento de aguas, o como ingrediente de la cal dolomítica hidratada cuya composición está generalmente en la relación de 32% de

MgO a 62% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Si se agrega óxido de magnesio a agua fría en un medio alcalino, éste no se disolverá. Ya que el hidróxido de calcio de la cal dolomítica produce un pH alto, el óxido de magnesio asociado permanece inerte.

Para disolver el óxido de magnesio, es necesario que el pH sea inferior que el que prevalece durante la precipitación del hidróxido de magnesio y esto requiere un tanque de disolución por separado. La alcalinidad de bicarbonatos, o el CO_2 del agua cruda, disolverán el óxido de magnesio de acuerdo con las siguientes reacciones:



Si el agua natural no disuelve suficiente magnesio para remover la sílice necesaria, deberá agregarse CO_2 de un generador, o de gases de combustión. El tanque de disolución deberá proporcionar una retención de 1 hora preferentemente³.

El óxido de magnesio preparado con magnesita calcinada o de otras fuentes, puede ser agregado directamente al agua cruda en el tanque de disolución y reaccionará en 20 o 30 min. La cal dolomítica no puede ser agregada así. Se agrega directamente al tanque suavizador, en donde sirve para enriquecer el contenido de magnesio de los lodos que se sedimentan en la zona concentrada. Parte de estos lodos se recircula al tanque de disolución y el remanente se desvía al drenaje, con objeto de seguir removiendo la sílice que venga con el agua cruda.

El hidróxido de magnesio, precipitado de la dureza de magnesio (magnesio técnico), es el agente de remoción más efectivo. Los óxidos

de magnesio procedentes de diversas fuentes, si pueden ser hidratados, siguen en efectividad.

Es imposible hacer predicciones precisas sobre la cantidad de magnesio iónico que debe ser precipitado de una corriente de agua en particular para producir una remoción específica de sílice. Sin embargo, las experiencias de los investigadores y las observaciones en muchas plantas, se refleja en las curvas de la figura 1.1 para magnesio iónico.

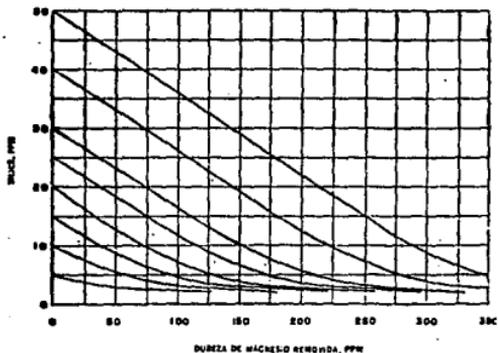


Fig. 1.1 Sílice removida por precipitación de magnesio a 21.1°C (Powell, Acondicionamiento de aguas para la industria, pág. 139).

Por ejemplo si la concentración de sílice es de 30 ppm, la precipitación de 150 ppm de dureza de magnesio reducirán la sílice en proporción directa a 10 ppm aproximadamente. Por abajo de 2 ppm las curvas se hacen rectas, sin embargo los resultados en este limite, pueden variar ampliamente dependiendo de la recirculación y de otros factores. Con fines de diseño pueden emplearse estas curvas para evaluar las condiciones adecuadas de dureza de magnesio en el agua cruda y el grado de magnitud de las adiciones de magnesio requeridas.

1.4.1.4 Eliminación de sílice por el proceso de cal sodada y magnesia en caliente.

Este proceso es llevado a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Debido a estas elevadas temperaturas, los procesos en caliente usualmente se limitan al tratamiento de aguas para calderas. Las reacciones en el proceso en caliente se efectúan cientos de veces más aprisa que en los procesos cal sodada en frío. También los precipitados formados a estas temperaturas son mayores y más pesados, y puesto que el agua caliente es menos viscosa, el asentamiento toma lugar más rápidamente, de manera que en estos procesos no es necesario usar coagulantes. Los procesos en caliente también difieren de los procesos en frío en que no es necesario añadir cal para que exista bióxido de carbono libre en el agua cruda, ya que este se desprende por calentamiento del agua antes de que se añadan los reactivos.

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

Las sustancias químicas usadas son cal hidratada y soda ash. En lugar de emplear cal hidratada se puede usar cal viva y se apaga antes de usarse. Cuando se requiere para la eliminación de sílice, pueden usarse también cal dolomítica hidratada v/o magnesia activa-13.

El equipo usado, consiste de los siguientes cuatro elementos: (1) dosificador, (2) calentador primario, (3) tanque de asentamiento, (4)

filtros. Además se puede usar un desaerador como parte integral del tanque de asentamiento o como una unidad separada.

En el tipo convencional de ablandador de cal sodada en caliente, los lodos que se forman por precipitación se separan rápidamente del agua y se colectan en el fondo del ablandador, del cual se purgan periódica y continuamente al drenaje. Cuando al tipo convencional se alimenta cal dolomítica o magnesia el contenido de esta última, que es prácticamente insoluble, se asienta rápidamente con los lodos no lográndose un prolongado e íntimo contacto que es necesario para la eliminación de la sílice. Por lo que con el tipo de ablandador convencional, es necesario contar con un sistema de recirculación de lodos para la eliminación eficiente de la sílice.

La remoción de sílice por magnesia se ha descrito como un fenómeno de adsorción, pero es posible que esté involucrado un fenómeno químico con la producción de silicato de magnesio. Las curvas de la fig. 1.2 pueden usarse para determinar la cantidad de dureza de magnesio que debe precipitarse para reducir la sílice desde cualquier valor dado, hasta el valor residual deseado. En la práctica, el efecto del magnesio iónico presente en el agua deberá considerarse primero y calcularse después la deficiencia de dureza de magnesio. La dosis de cal hidratada requerida para ablandar el agua se calcula, y este requerimiento puede satisfacerse usando cal dolomítica. Si existe deficiencia puede agregarse óxido de magnesio.

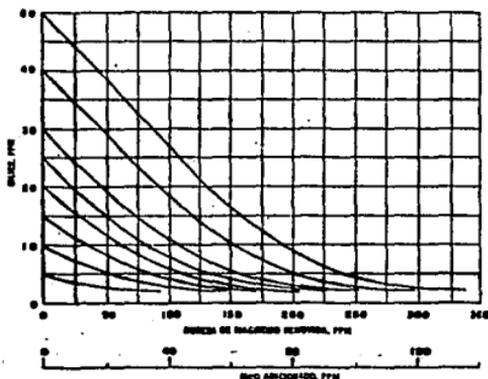


Fig. 1.2 Silice removida por precipitación de magnesio y adición de MgO en el proceso de suavización en caliente (Powell, Acondicionamiento de aguas para la industria, pág. 177).

1.4.2 OTROS METODOS DE REMOCION.

1.4.2.1 Remoción de sílice por destilación.

Las ventajas de la destilación es que remueve casi completamente no sólo la dureza, sino todas las otras sustancias minerales presentes en el agua cruda. Sus principales desventajas son su alto costo inicial y altos costos de operación, de manera que la destilación esta casi confinada por entero a plantas que trabajan con vapor de alta presión, y en donde el retorno de condensados constituye más del 95% del agua de alimentación de las calderas. En tales plantas, los evaporadores o alambiques, como usualmente se les llama, se operan con vapor degradado, lo que usualmente reduce los costos de operación. El agua destilada a una forma muy limitada, se usa también

en ciertos procesos industriales. pero en tales casos los costos de operación son mucho más altos.

1.4.2.2 Resoción de sílice por intercambio iónico.

Ciertas sustancias insolubles poseen la capacidad de intercambiar los iones enlazados en su estructura molecular con otros iones dentro del agua. Los iones intercambiados se liberan por un proceso de regeneración de la resina de intercambio. Dependiendo de la naturaleza de esta resina pueden intercambiarse iones de carga negativa o positiva. Existe una gran variedad de materiales sólidos que poseen esta propiedad reversible. Una diferencia que distingue a los procesos de intercambio de iones de la precipitación, es que en los primeros sólo se producen como desecho soluciones, en tanto que en los segundos se producen tanto líquidos como sólidos. Esta importante diferencia puede ser un factor decisivo en la elección del proceso adecuado. La eliminación de lodos puede hacer que éste sea poco económico en comparación con el intercambio iónico. Por otra parte, la eliminación del agua de desecho en un proceso de intercambio de iones puede constituir un problema.

Los cationes se remueven por un intercambiador catiónico ciclo hidrógeno, y los aniones en un intercambiador aniónico. El efluente del proceso de intercambio catiónico ciclo hidrógeno, lleva ácidos formados de los aniones presentes en el agua. Los ácidos que pueden estar presentes son sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl), y si se encuentran nitritos, el (HNO_2). Puede estar presente un ácido

debilmente ionizado, como el ácido carbonico (H_2CO_3) y ácido silícico (H_4SiO_4).

Los dos tipos principales de intercambiadores aniónicos que pueden usarse en los procesos de desmineralización, se pueden clasificar como:

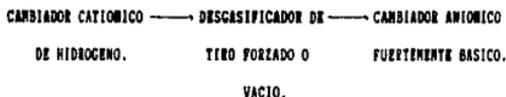
A) intercambiadores aniónicos débilmente básicos

B) Intercambiadores aniónicos fuertemente básicos.

En el primer tipo a medida que los ácidos débiles se eliminan en el intercambiador aniónico, el efluente contiene la misma cantidad de sílice que el agua cruda, otro tanto sucede con el bióxido de carbono correspondiente formado en el intercambio catiónico ciclo hidrógeno, además de su contenido original.

Los intercambiadores aniónicos fuertemente básicos difieren de los débilmente básicos en que remueven tanto los ácidos ionizados como los que no lo están.

En la remoción de sílice por intercambio iónico el primer paso es el tratamiento de intercambio catiónico de hidrógeno, el efluente de este paso, conteniendo los ácidos de los aniones originalmente presentes en el agua cruda, se hace pasar a continuación a un lecho cambiador de aniones, en el que éstos son removidos. La figura 1.3 ilustra un sistema de desionización, para alimentación de calderas, diseñado para remover sílice, de acuerdo con el siguiente ciclo:



ácido es suficientemente fuerte para ser removido con absoluta eficiencia por los cambiadores débilmente básicos. Se instaló una serie de sistemas de este tipo que dieron buenos resultados, pero el proceso ya no es comparable.

1.5 TRATAMIENTO ELECTROLITICO.

Actualmente, los problemas respecto a la contaminación de aguas se han agravado debido a la descarga continua de efluentes industriales a los drenajes. Por tanto, es necesario buscar opciones económicas y efectivas para solucionarlos. Hasta hoy, en nuestro país se han aplicado los sistemas convencionales (separadores API, de placas, lodos activados, lagunas de oxidación, químicos y otros), los cuales presentan algunas limitaciones, tales como: la necesidad de pretratamiento químico, la formación excesiva de lodos provenientes de los tratamientos químicos y biológicos, las grandes áreas que ocupan algunos sistemas, los costos y otras más.

En algunos países como Rusia, E.U.A., Canadá, Alemania y otros, se ha desarrollado y aplicado a nivel industrial otro tipo de tratamiento de efluentes que ha sido llamado "tratamiento electrolítico" (descubierto por Leeds en 1888). El tratamiento consiste en pasar una corriente eléctrica continua a través de electrodos de fierro, aluminio, cobre o grafito, sumergidos en el efluente a tratar. Durante este proceso se producen algunas reacciones electroquímicas, procesos importantes de electrocoagulación y electroflotación, y además se lleva a cabo la electrólisis del agua con la consecuente

formación de pequeñas burbujas de hidrógeno y oxígeno con tamaño medio de 100 micrones.

Las burbujas de gas se adhieren a las partículas suspendidas y las arrastran a la superficie de la solución, donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. Debido al contacto del efluente con los electrodos, se tiene un efecto de neutralización de las cargas de la materia suspendida causada por la transferencia de cargas y por la formación de iones libres que se producen por la disolución anódica del electrodo, este efecto provoca la rotura de las emulsiones y una mejor y más rápida electrofloculación de las partículas.

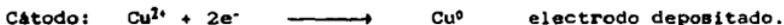
Las aplicaciones más importantes del proceso electrolítico son: recuperación y remoción de metales, producción de compuestos inorgánicos (principalmente cloro y sodio), síntesis de compuestos orgánicos y electroflotación para depuración de efluentes industriales y domésticos.

1.5.1 REMOCION DE FENOLES:

El proceso consiste en elevar la temperatura del efluente hasta 70-75 grados centígrados y pasarlo a través de la celda electrolítica con electrodos de grafito donde se aplica un potencial entre 2.3 y 2.8 volts; se han removido hasta 2.5g de fenol/l con un consumo de 15.8 kWh/m³ de efluente. Sin embargo, las condiciones de operación deben ser controladas estrictamente, ya que, debido a la presencia de NaCl en el efluente, se forma cloro libre que puede reaccionar con los fenoles, produciendo compuestos altamente tóxicos.

1.5.2 RECUPERACION Y REMOCION DE METALES:

Existen algunos tipos de efluentes, en los que el contenido de metales pesados es alto. Con el tratamiento electrolítico los iones del metal viajan hacia el cátodo donde sufren una reducción y quedan depositados (electrodeposición), haciendo posible su remoción y su posterior recuperación. Un ejemplo de este tipo de efluente lo tenemos en las aguas ácidas que contienen hasta 80 g de cobre/l, por lo que no pueden ser descargadas a los cuerpos receptores. El ion cobre de la solución queda electrodepositado en el cátodo en forma metálica:



Las celdas electrolíticas trabajan con 2 volts y con una densidad de corriente entre 40 y 150 amperes/m² y con una eficiencia hasta del 100%, si se trabaja en condiciones adecuadas.

1.5.3 REMOCION DE CIANUROS:

Los cianuros sufren una oxidación hasta CO₂ y N₂, por lo que son eliminados de los efluentes:



como la concentración de los iones cianatos en la solución aumenta, éstos son otra vez oxidados en el ánodo, y el producto final son carbonatos y nitrógeno gaseoso



En el cátodo toma lugar, debido a la descarga de H^+ en la solución la generación de hidrógeno gaseoso.

La electrólisis debe ser llevada a cabo a temperaturas cercanas al punto de ebullición del efluente. Otros detalles del proceso y sus costos se encuentran reportados⁴ y se ha encontrado que este proceso es más económico que los métodos químicos convencionales.

1.5.4 TRATAMIENTO ELECTROLITICO DE EFLUENTES DOMESTICOS:

Con este proceso se han tratado efluentes domésticos y se ha eliminado la materia suspendida hasta en un 90%, removiéndose la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) hasta en un 70%, los fosfatos en un 95%, además de que este método, en comparación con el sistema biológico, tiene las ventajas de ser más económico; la capacidad de lodos generados es hasta tres veces menor, el área de las instalaciones es menor y el tiempo de residencia es de 30 minutos a diferencia del biológico, el cual tiene tiempos de 5 a 10 horas.

CAPITULO 2

TRABAJO EXPERIMENTAL

TRABAJO EXPERIMENTAL.

En este capítulo, se explica la forma en la que se realizó la experimentación, describiendo el equipo, materiales, método de tratamiento y técnicas de medición.

Se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- A. Diseño de equipo electrolítico.
- B. Experimentos preliminares.
- C. Experimentos propios del proyecto.
- D. Experimentos para determinar el mecanismo de remoción.

Cabe señalar que el presente trabajo representa, la primera fase de un trabajo más amplio, que pretende un escalamiento a nivel de planta piloto, del tratamiento electrolítico para aguas de recirculación de torres de enfriamiento.

2.1 EQUIPO ELECTROLITICO.

El reactor electrolítico se construyó de acrílico en forma rectangular, con una capacidad total de 20 litros (15 cm x 15 cm x 89 cm).

Los electrodos (ánodo y cátodo), se colocaron en posición horizontal en el fondo del reactor separados 1 cm entre sí. Los materiales utilizados fueron placas de aluminio o fierro de 14 cm por lado y 0.5 cm de espesor. El ánodo colocado en la parte superior tenía 79 perforaciones de 0.7 cm de diámetro cada una, distribuidas homogéneamente para permitir el paso de las burbujas liberadas en el

cátodo. Este a su vez fue perforado en el centro con un barreno de 2 cm de diámetro para permitir la salida del efluente tratado. El área neta de los electrodos fue de 165.5 cm² para el ánodo y 192.8 cm² para el cátodo.

La energía necesaria fue proporcionada por una fuente de poder a través de cables conectados a los electrodos.

2.2 EXPERIMENTOS PRELIMINARES.

Estas pruebas se realizaron con aguas residuales de la refinería de Salamanca, Gto., con la finalidad de conocer si el tratamiento electrolítico era capaz de remover sílice.

Se efectuaron dos experimentos; uno con electrodos de fierro y otro con electrodos de aluminio, se llevo acabo la electrólisis en lotes (proceso que se detalla más adelante) con una intensidad de corriente de un ampere (densidad de corriente de 50 A/m²), y un tiempo de tratamiento de 90 min. Se tomaron muestras cada 15 min y se les determinó sílice después de sedimentarlas y decantarlas.

2.3 EXPERIMENTOS PROPIOS DEL PROYECTO.

2.3.1 Agua de alimentación.

El agua de alimentación, que se trató electrolíticamente en proceso continuo y por lotes (batch), se tomó de la purga de la torre de enfriamiento EF de la refinería Miguel M. Amor de Salamanca, Gto.

Las condiciones de la misma se enuncian a continuación:

- Concentración inicial de sílice: aproximadamente 125 ppm.
- Temperatura: Ambiente. (Aproximadamente 20°C)
- No se añadió ningún reactivo químico.
- Se agitó la muestra antes de cada experimento.

2.3.2 Proceso continuo.

La figura 2.1 muestra el diagrama de flujo usado para el proceso en continuo:

- 1.- AGUA A TRATAR
- 2.- BOMBA DE ALIMENTACION
- 3.- REACTOR ELECTROLITICO
- 4.- DISPOSITIVO DE SOBREALIMENTACION
- 5.- DISTRIBUIDOR
- 6.- FUENTE DE PODER
- 7.- ELECTRODOS
- 8.- TOMA DE MUESTRA
- 9.- SEDIMENTADOR
- 10.- AGUA TRATADA

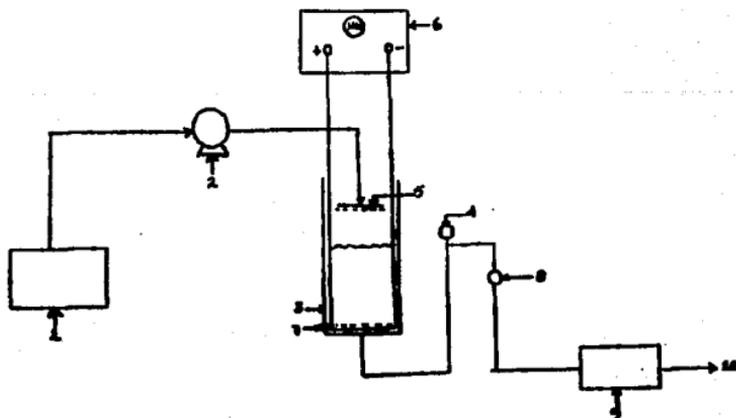


Fig. 2.1 Proceso continuo.

En cada corrida experimental se reguló el flujo de alimentación, por medio de la bomba dosificadora (2) con el objeto de obtener un tiempo de residencia promedio (preestablecido) en el reactor electrolítico (3). El volumen de operación fue de 6.5 litros y estaba controlado por un dispositivo de derrame (4) calibrado a dicho nivel. El flujo de entrada pasaba primero por un distribuidor (5), para evitar cortos circuitos y canalizaciones dentro del reactor. Se aplicó una densidad de corriente fija (6) a un par de electrodos (7) de material determinado (aluminio o fierro). Se llevó a cabo la electrólisis y después de la estabilización del proceso, se tomó la muestra (8), se dejó sedimentar (9) y se realizó su análisis. Cabe destacar que durante las corridas, el reactor no tuvo agitación artificial salvo la promovida apenas por el movimiento de ascensión de las burbujas producidas durante la electrólisis y la del flujo mismo. Las variables manejadas fueron la densidad de corriente, el tiempo de residencia y el material de los electrodos.

2.3.3. Proceso en lotes.

En esta serie de experimentos se llenó el reactor, hasta un volumen de 6.5 litros, aplicándosele una densidad de corriente a un tipo de electrodos y tomándose la muestra a diferentes tiempos de tratamiento. Las variables a controlar fueron exactamente las mismas que en proceso continuo.

2.4 EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR EL MECANISMO DE REMOCION.

Para determinar el mecanismo de remoción de sílice se efectuaron las siguientes experiencias:

2.4.1 Experiencia 1.

Se preparó una solución de ácido ortosilícico en agua destilada con una concentración similar a la del agua de las torres de enfriamiento, es decir 123 ppm, y se cargó al reactor, llevándose a cabo el tratamiento electrolítico en lotes a una densidad de corriente de 60 A/m^2 , y un volumen de operación de 6.5 litros, cuantificándose después de 120 minutos la concentración de sílice removida.

2.4.2 Experiencia 2.

Una solución similar a la de la experiencia 1 fue tratada electrolíticamente en lotes; con la diferencia de que el pH de la misma se llevo hasta el valor de 1.0 y el tiempo de operación fue de 60 minutos. También se cuantificó en este caso la sílice removida.

Cabe mencionar que estos experimentos están ligados entre si, y la razón de ello se explica en el capítulo 3 (Hipótesis de remoción de sílice).

2.5 ANALISIS DE MUESTRAS.

Las muestras obtenidas en cada una de las corridas experimentales, se dejaron sedimentar durante 24 horas, y se decantaron antes de determinarles el pH, conductividad, el contenido de sílice, fierro ó aluminio según fuera el caso, empleando los siguientes aparatos y/o técnicas analíticas:

2.5.1 Medición de pH.

Equipo: pH-metro marca Corning modelo 7 escala de 0 a 14 subdivisiones de 0.1.

2.5.2 Medición de conductividad.

Equipo: Conductímetro marca Hach Conductivity/ TDS meter. Lectura en micromhos.

2.5.3 Medición de sílice.

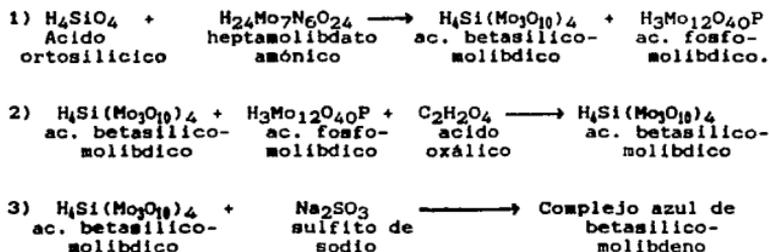
Equipo de análisis: Spectroquant art. no. 14794-1.MERCK.

Método: Colorimetría del ácido betasilicomolibdico reducido (azul de betasilicomolibdeno).

Reacción del color: El silicio hidrosoluble (reaccionable) se presenta como ácido ortosilícico H_4SiO_4 , y reacciona a un pH de 1.2 a

1.7 con heptamolibdato amónico para dar ácido beta silicomolibdico $H_4Si(Mo_3O_{10})$ amarillo. El ácido fosfomolibdico que igualmente se forma es destruido selectivamente mediante ácido oxálico. La adición de sulfito de sodio Na_2SO_3 , provoca la reacción de reducción del ácido betasilicomolibdico amarillo para dar azul de beta silicomolibdeno. La intensidad de color azul es proporcional a la concentración de sílice.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo son las siguientes:



2.5.4 Medición de hierro.

Equipo de análisis: Spectroquant art. 14761.

Método: Reacción de hierro (II) con ferrospectral en tampón de tioglicolato con formación de un complejo de color violeta.

Reacción de color: Las reacciones conocidas de color de hierro (II), con 2,2'-bipiridina (complejo rojo carmín) y 1,10 fenantrolina (complejo anaranjado) forman parte de los métodos de determinación de hierro con compuestos aromáticos que contienen el grupo alfa. alfa'-diimina $-N=C-N=N-$. En relación con esto, ferrospectral, (ácido 3-(2-piridil)-5,6-bis(4-fenilsulfónico)-1,2,4-triazina, sal disódica)

con una longitud de onda de 565 nm muestra valores especialmente ventajosos ya que en con esta longitud se forma un complejo violeta azulado y en este rango el ojo muestra la máxima sensibilidad. El hierro reacciona con ferrospectral sólo en la forma iónica divalente. Eso se consigue añadiendo el reactivo Fe-AN que contiene tioglicolato amónico, el cual mineraliza complejos de hierro débiles, reduce el hierro (III) y al mismo tiempo sirve como tampón o amortiguador.

2.5.5 Medición de aluminio.

El aluminio se determinó mediante absorción atómica en la División de química analítica del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.5.6 Determinación de presencia de sílice en los hidróxidos.

Esta cuantificación se realizó por difracción de rayos X en la División de química analítica del Instituto Mexicano del Petróleo.

CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE ELLOS.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE ELLOS.

En este capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos de la remoción de sílice por tratamiento electrolítico, en proceso continuo y por lotes, usando electrodos de fierro o aluminio a diferentes densidades de corriente y tiempos de tratamiento, así como también se analiza el posible mecanismo por el cual se lleva a cabo la remoción.

3.1 RESULTADOS PRELIMINARES DE REMOCION DE SILICE.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del tratamiento electrolítico de aguas residuales, con electrodos de fierro y aluminio a una densidad de corriente de 50 A/m^2 y un tiempo de tratamiento de 90 min.

TIEMPO (min)	ELECTRODOS DE ALUMINIO	ELECTRODOS DE FIERRO
	SILICE RESIDUAL (ppm)	SILICE RESIDUAL (ppm)
0	61.8	61.8
15	61.1	61.6
30	55.0	57.3
45	40.3	55.1
60	34.9	48.8
75	34.5	35.2
90	28.4	30.5

Con estos datos, se pudo comprobar que el tratamiento electrolítico, es un método que sirve para remover sílice, ya que se observa que hubo una remoción, bajo estas condiciones, de más del 50% para ambos casos.

3.2 OBSERVACIONES.

Estas observaciones son las mismas en todos los experimentos de remoción electrolítica, salvo que se indique lo contrario.

Con el paso de la corriente eléctrica, se llevó a cabo la electrólisis del agua, observándose la producción de burbujas de hidrógeno.

El agua empezó a tomar una coloración blanca, cuando se usaron electrodos de aluminio; y una coloración café al principio y posteriormente verde, para electrodos de fierro, esta coloración es debida en ambos casos a la formación de flóculos, (Hidróxido de fierro y aluminio).

Conforme transcurrió el tiempo, se produjo mayor cantidad de flóculos, hasta llegar a un punto en que éstos fueron arrastrados hacia la superficie por las burbujas de gas, quedando una solución clara.

Cabe mencionar que se le determinó el pH y la conductividad a cada corrida experimental, obteniéndose que el pH tenía una variación de 6.94-8.66 y la conductividad de aproximadamente 600 micromhos. Los datos de todas las corridas se muestran en el apéndice A.

3.3 REACCIONES QUE SE LLEVAN A CABO DURANTE EL TRATAMIENTO.

Tomando en cuenta que el pH del agua fue de 6.94-8.66 y el voltaje fue siempre mayor a 2 V, las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:

ELECTRODOS DE FIERRO:

En el cátodo se lleva a cabo la electrólisis de agua:



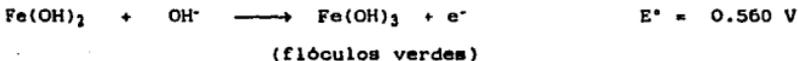
en el ánodo:



en la solución:

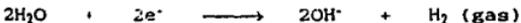


Si la concentración de hidróxido ferroso es excesiva, entonces la siguiente reacción se efectúa:



ELECTRODOS DE ALUMINIO:

En el cátodo se lleva a cabo la electrólisis de agua:



en el ánodo:



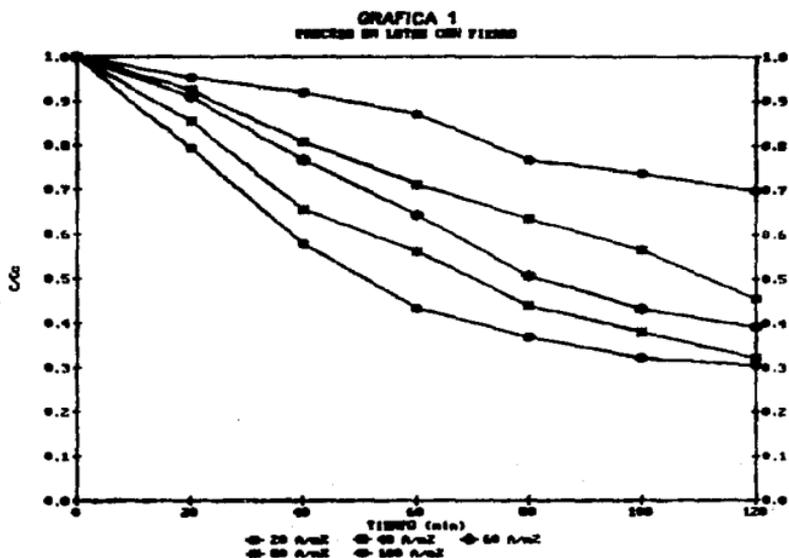
en la solución:



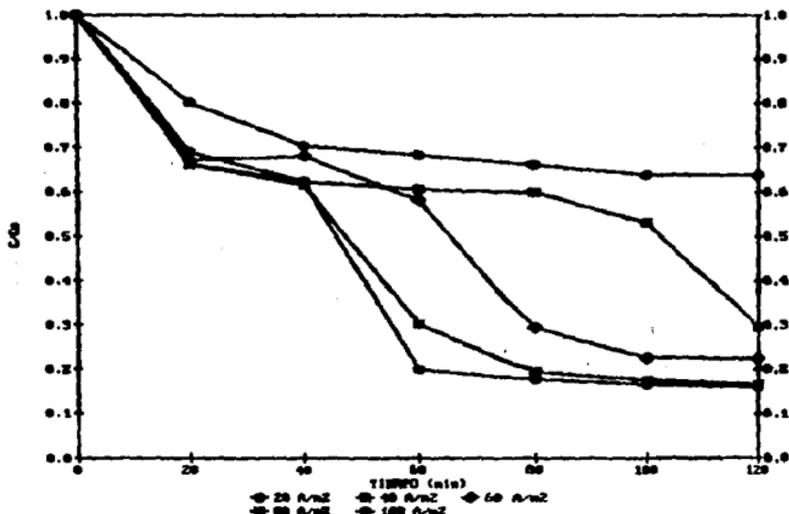
La manera de predecir, que efectivamente se formarían floculos, es mediante las gráficas de zonas de predominio del aluminio y el fierro, las cuales se muestran en el apéndice B.

3.4 REMOCION DE SILICE EN LOTES CON ELECTRODOS DE FIERRO Y ALUMINIO.

En las siguientes páginas se presentan los resultados del proceso por lotes: en la gráfica 1 usando electrodos de fierro y en la gráfica 2 usando electrodos de aluminio.



GRAFICA 2
PROCESO DE LOTES CON ALUMINIO



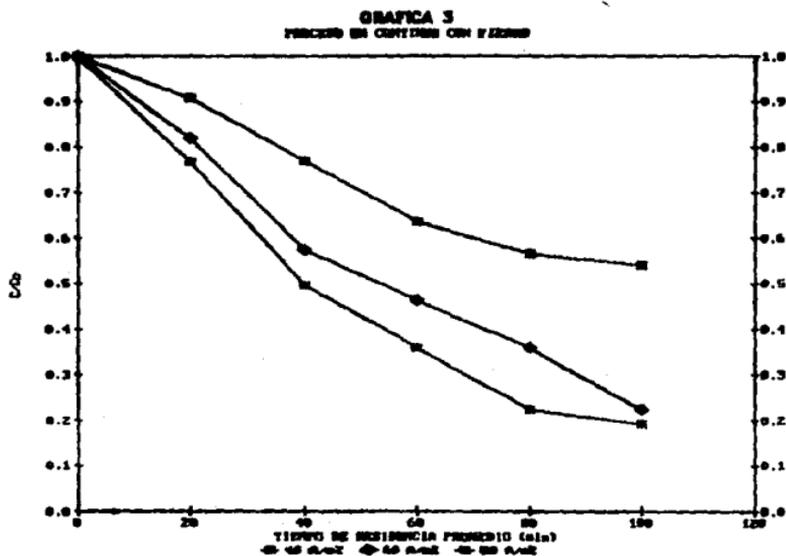
Analizando ambos casos, a mayor densidad de corriente y mayor tiempo de tratamiento, existe una mejor remoción, y esto es debido a que con estas condiciones la formación de flóculos es más grande. La eficiencia de remoción es mayor usando electrodos de aluminio.

La forma de los gráficos sugeriría la posibilidad de que el mecanismo por el cual se elimina la sílice es diferente en los dos casos, ya que las curvas con electrodos de aluminio parecen estar compuestas de dos etapas mientras que las de hierro de una sola etapa, y además no existe una disminución brusca de sílice en este último caso. Sin embargo, esta diferencia podría deberse a que quizás los gráficos de hierro sólo llegaron a la primera etapa de las de aluminio, por lo

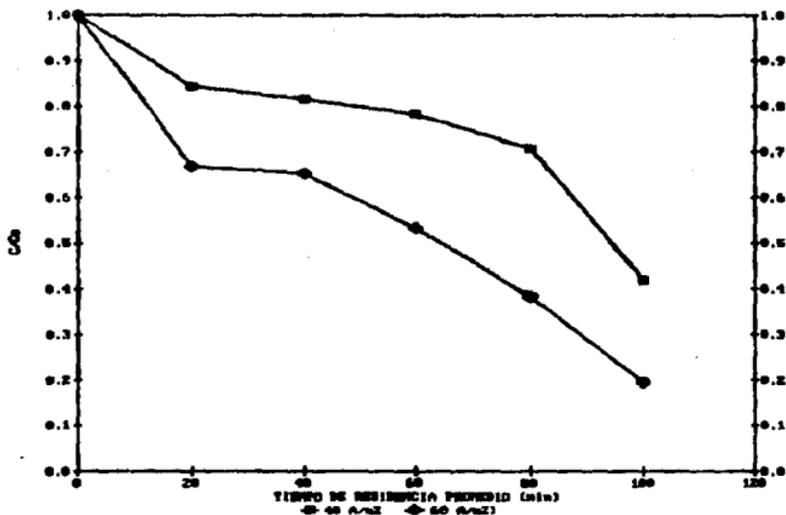
que para comprobar esto, se tendría que dejar el tratamiento para cada corrida de fierro por más tiempo.

3.5 REDUCCION DE SILICE EN CONTINUO CON ELECTRODOS DE FIERRO Y ALUMINIO.

En las gráficas 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos en el proceso continuo, usando electrodos de fierro y electrodos de aluminio, respectivamente.



GRAFICA 4
 PROCESO EN CONTINUO CON ALUMINIO



En este tipo de proceso también se observa que a mayor densidad de corriente y mayor tiempo de tratamiento, existe una mayor remoción de sílice y la forma de las curvas tanto para electrodos de fierro como para electrodos de aluminio, son similares a las curvas por lotes. Usando electrodos de aluminio es mayor la remoción.

Comparando ahora, electrodos de fierro, en lotes y en continuo (Gráfica 1 y 3) se observa que el fierro en continuo remueve más la sílice que por lotes, al igual que sucede con los electrodos de aluminio (gráfica 2 y 4); el hecho de que la remoción sea mayor en proceso continuo se puede deber a que se disminuyen ciertas resistencias a los procesos difusionales, debido a la turbulencia que

se origina en este tipo de flujo, ya que no sólo hay agitación por las burbujas de gas producidas por la electrólisis, como en el caso por lotes, sino que ahora también existe agitación por la entrada y salida del efluente.

De este análisis se puede concluir que las condiciones más óptimas para la remoción son:

Electrodos de aluminio en proceso continuo con un tiempo de tratamiento mayor o igual a 80 minutos y una densidad de corriente no menor de 60 A/m².

3.6 MECANISMO DE REMOCIÓN DE SILICE.

Después de saber que es lo que se tenía en la solución se realizaron algunos experimentos para saber por que mecanismo se llevaba a cabo la remoción.

Se tenían tres hipótesis del mecanismo:

- a) Que fuera por reacción con algunas impurezas del agua como carbonatos, sulfatos, etc.
- b) Que fuera por adsorción y/o reacción sobre los flóculos formados, de aluminio o fierro.
- c) Que fuera por reacción con los iones de fierro o aluminio que se desprenden de los electrodos.

Para analizar la hipótesis a) se realizó la experiencia 1, descrita en el capítulo 2, obteniéndose los siguientes resultados:

ELECTRODOS DE FIERRO ELECTRODOS DE ALUMINIO

TIEMPO DE TRATAMIENTO	SILICE RESIDUAL	SILICE RESIDUAL
(min)	(ppm)	(ppm)
0	123.3	123.3
120	80.4	54.3

Se observó que la concentración de sílice disminuyó en un 33.98% y en un 55.96%, para electrodos de fierro y aluminio respectivamente, sin embargo, si se comparan estos porcentajes con la gráfica 1 y 2 (60.89% y 77.57%), se nota que existe una diferencia, ya que se logra mejor remoción con otras componentes presentes en el agua. Esto se puede deber a que, o bien la sílice reacciona con impurezas además de los hidróxidos, o que las impurezas le dan alcalinidad a la solución logrando con esto mayor formación de flóculos y por consiguiente mayor remoción. Esta hipótesis no se pudo comprobar. Para saber si el mecanismo era por adsorción sobre los flóculos o por reacción con el Fe^{3+} o con Al^{3+} , se llevó a cabo la experiencia 2, (Capítulo 2), para evitar la formación de flóculos y tener sólo en la solución iones de fierro y de aluminio. Los resultados fueron los siguientes:

ELECTRODOS DE FIERRO ELECTRODOS DE ALUMINIO

TIEMPO DE TRATAMIENTO	SILICE RESIDUAL	SILICE RESIDUAL
(min)	(ppm)	(ppm)
0	130.9	130.9
60	130.9	130.7

De la tabla anterior se nota que no hubo una disminución en la concentración de sílice lo cual significa que no hubo reacción con los iones libres; por lo tanto el proceso se lleva a cabo por adsorción y/o reacción sobre los flóculos de hidróxido de fierro o aluminio y la presencia de impurezas promueve una mejora en la remoción.

Ahora por último pudiera ser que el sílice no sólo se adsorbiera sobre los flóculos sino que reaccionara con ellos, para esto se analizaron los flóculos de las corridas anteriores, por difracción de rayos X; primero, para comprobar que realmente los flóculos tuvieran en su estructura a la sílice, lo cual fue confirmado ya que en los flóculos, tanto de fierro como de aluminio se detectó la presencia de sílice; y en segundo, para saber si la sílice reaccionaba o sólo se adhería ; pero en estas pruebas sólo se obtuvieron espectros amorfos.

Sin embargo, en trabajos anteriores se ha demostrado que los procesos de remoción de sílice por hidróxido férrico, de aluminio y de magnesio tienen algunas similitudes y contrastes que deberán observarse:

- 1) Conforme disminuye la concentración de sílice, la eficiencia del proceso desciende bruscamente, requiriéndose cantidades cada vez mayores de hidróxidos por cada ppm de sílice removida adicionalmente.
- 2) Existe un intervalo óptimo de pH para cada proceso.
- 3) Para una serie de experiencias llevadas a cabo a temperatura constante, si se traza la gráfica de sílice removida por unidad de reactivo contra la sílice residual sobre una escala logarítmica doble, la gráfica resulta ser una línea recta que coincide con la

isoterma de adsorción de Freundlich. Esto demuestra que la remoción ocurre por adsorción⁵.

En todas las investigaciones publicadas hasta la fecha sobre remoción de sílice, se ha encontrado que la adsorción ocurre en la forma hidratada del agente removedor y que los hidróxidos precipitados in situ son mucho más efectivos, que los hidróxidos preparados externamente. Sin embargo, el contacto prolongado con lodos que no están todavía saturados de sílice pueden efectuar una remoción adicional.

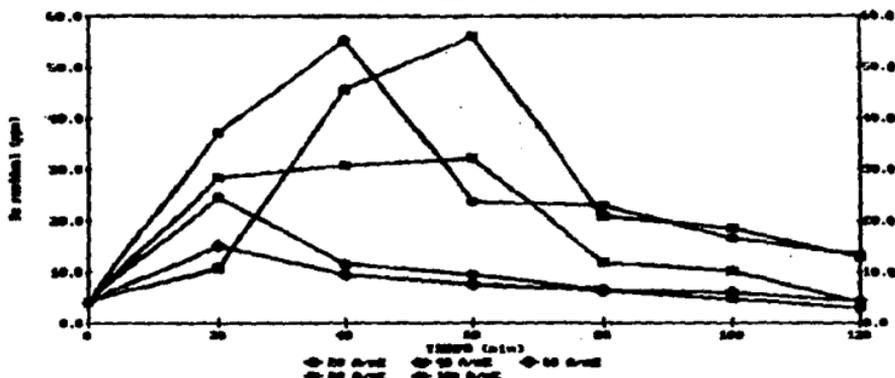
5) Las reacciones de remoción son rápidas y ocurren en un tiempo mucho menor que los periodos de retención usualmente suministrados en ablandamiento de aguas.

3.7 OTRAS CONSIDERACIONES DEL TRATAMIENTO ELECTROLITICO.

Un problema que podría presentar este tipo de tratamiento son los compuestos de fierro y aluminio que se forman, ya que estos en grandes cantidades pueden ser perjudiciales para los equipos, especialmente los de fierro, por este motivo se determino para cada corrida, con electrodos de fierro, su concentración residual dando los resultados que se muestran en la gráfica 5.

En base a esta figura se obtiene que la concentración de fierro residual es inversamente proporcional a la densidad de corriente, y que con respecto al tiempo de tratamiento, a medida que este va aumentando existe mayor presencia de fierro libre hasta llegar a un punto en que la concentración es máxima y comienza a disminuir.

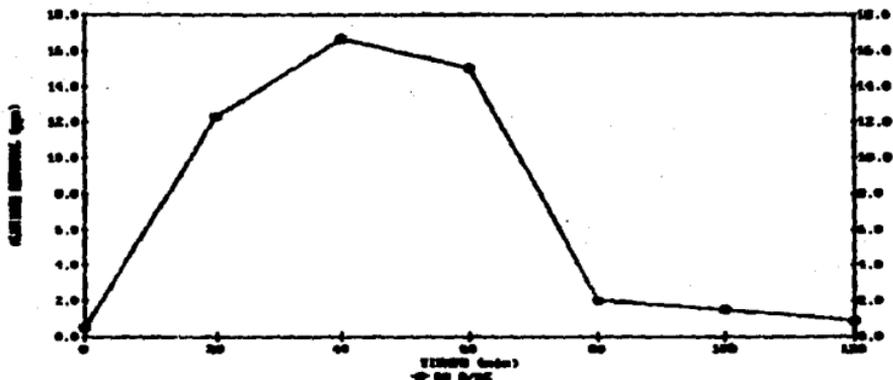
**GRAFICA 5. FIERRO RESIDUAL
EN PROCESO POR LOTES**



La explicación a estas curvas es que a menor densidad de corriente y menor tiempo de tratamiento existe una concentración menor de fierro y por lo tanto sólo existe en la solución hidróxido ferroso, que no es tan buen floculante como el hidróxido férrico, por lo tanto, queda en la solución un alto contenido de fierro libre. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo la cantidad de hidróxido ferroso va siendo excesiva y se va convirtiendo a hidróxido férrico, en el punto en que la conversión ha sido total, la floculación empieza a ser mejor y así de esta manera la concentración de fierro residual en la solución empieza a disminuir.

El aluminio que no es tan perjudicial como el fierro, se mandó analizar y la concentración residual para los diferentes tiempos de una corrida se muestran en la gráfica 6.

**GRAFICA 6. ALUMINIO RESIDUAL
EN PROCESO FDS LAYES**

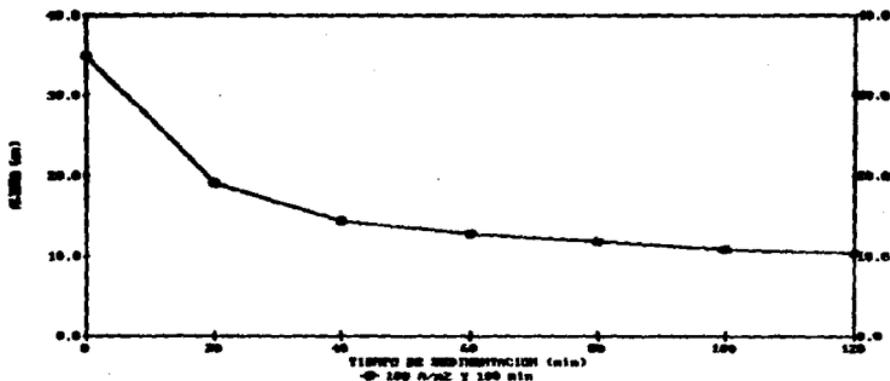


También se observó que a mayor densidad de corriente y tiempo de tratamiento se formaban mayor cantidad de flóculos y sedimentaban mejor, quedando por lo tanto, en el sobrenadante, una concentración menor de aluminio. No fue posible determinar el aluminio a diferentes densidades de corriente, debido a que éste se determinó por absorción atómica, equipo con el que no se contaba en el laboratorio.

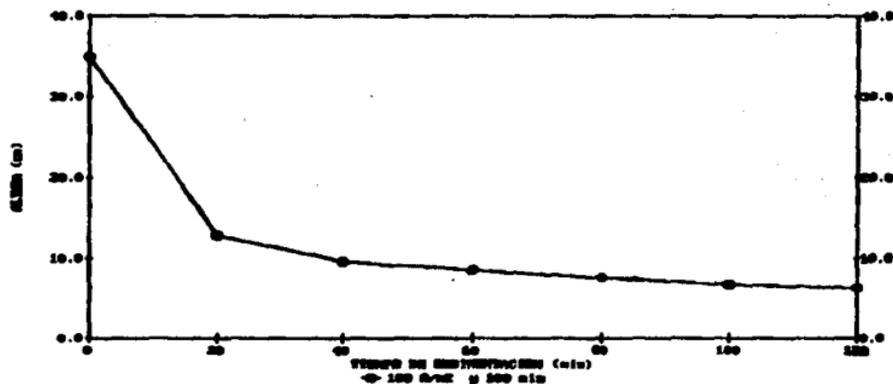
A continuación se muestran las gráficas de sedimentación de fierro y aluminio, que se obtuvieron con la finalidad de saber en cuanto tiempo se logra la sedimentación en una planta piloto, las gráficas se obtuvieron con flóculos generados a una densidad de corriente de 100 A/m² y un tiempo de tratamiento de 100 min; se tomó la muestra en estas condiciones porque es cuando se forma una cantidad

considerable de flóculos, esta muestra se colocó en una probeta de 1000 ml y se fue tomando la altura a diferentes tiempos de sedimentación (gráfica 7 sedimentación de fierro y gráfica 8 sedimentación de aluminio). Se observó que sedimenta mejor el aluminio.

GRAFICA 7. SEDIMENTACION DE FIERRO
EN FONDOS CUBIROS



**GRAFICA 8. SEDIMENTACION DE ALUMINIO
EN PROCESO POR LATERAL**



Para mostrar la efectividad del tratamiento electrolítico en otro tipo de sustancias, a una corrida se le realizó la caracterización del agua a la entrada y después del tratamiento dando los siguientes resultados.

	Antes del tratamiento	Después del tratamiento con electrodos de fierro a 50A/m ² tiempo: 120 min. 3.3 V.
pH	7.44	7.3
Sílice	119.7 ppm	30.9 ppm
Fosfatos	mayor que 6 ppm	1.5 ppm
Fierro	12.2 ppm	4.8 ppm
Fenoles	menor que 0.5 ppm	menor que 0.5 ppm
Cromo	menor que 0.05 ppm	menor que 0.05 ppm
sulfuros	menor que 10 ppm	menor que 10 ppm

Estas mediciones nos demuestran que el tratamiento electrolítico efectivamente sirve para remover varios contaminantes del agua.

De este análisis se puede concluir que las condiciones óptimas para la remoción de sílice por tratamiento electrolítico, son: usando electrodos de aluminio en proceso continuo con un tiempo de tratamiento mayor de 80 minutos y una densidad de corriente no menor de 60 A/m^2 , estas condiciones se toman como las más adecuadas debido a que se tiene una mayor remoción y además porque el aluminio es menos perjudicial para los equipos, como ya se mencionó, y por último porque la concentración residual de aluminio es menor. El mecanismo se lleva a cabo por adsorción sobre los flóculos recién formados de hidróxido de aluminio y quizá también por reacción o adsorción con algunas impurezas del agua.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

El tratamiento electrolítico es capaz de remover sílice del agua de retorno de torres de enfriamiento, y las condiciones más adecuadas, a nivel laboratorio, para llevar a cabo tal remoción son:

Usando electrodos de aluminio en proceso continuo a una densidad de corriente no menor de 60 A/m^2 y un tiempo de tratamiento mayor a 80 min.

El mecanismo por el cual se efectúa la remoción es por adsorción sobre los hidróxidos en forma de flóculos y la presencia de impurezas promueve aun más la remoción.

La ventaja que tiene el tratamiento electrolítico, para remover sílice de aguas en torres de enfriamiento, sobre los métodos convencionales, es que no solo se remueve sílice, sino también otros tipos de impurezas como los fosfatos y carbonatos y no es específico para torres de enfriamiento ya que también se puede usar para cualquier otro equipo de sistemas de enfriamiento.

Otra ventaja que tiene este método es que se necesitan tiempos de tratamiento cortos, áreas de instalación pequeñas, y no se requiere un pretratamiento.

Entre las desventajas que se encuentran con este tratamiento, es que no es capaz, en una sola etapa, de remover sílice a los niveles deseables para usarse en calderas; además se tienen que dejar sedimentar los flóculos o bien remover mecánicamente la capa de espuma que se encuentra en la superficie y esto representa pérdida de tiempo. El fierro y aluminio si no se limitan sus concentraciones residuales podrían ser muy dañinos para los equipos.

Cabe mencionar que se deben hacer otras experimentaciones, variando el tipo de material de los electrodos, el pH, la temperatura, el tiempo de tratamiento, el espacio entre los electrodos, y se podrían obtener los parámetros para la isoterma de Freundlich, así como también la cantidad de hidróxidos requeridos por cantidad de sílice removida.

APPENDICES

APENDICE A
DATOS EXPERIMENTALES

APENDICE A

DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran los datos obtenidos para cada una de las corridas experimentales, mencionándose en cada caso las condiciones de operación:

PROCESO EN LOTES CON ELECTRODOS DE FIERRO.

Voltaje= 2.4 V
Amperaje= 0.4 A

Densidad= 20 A/m²

Tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	6.98	4500
20	0.9526	7.18	4500
40	0.9203	7.27	4500
60	0.8714	7.28	4500
80	0.7686	7.16	4500
100	0.7369	7.11	4500
120	0.6993	7.09	4500

Voltaje= 3.8 V

Amperaje= 0.8 A

Densidad= 40 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	6.97	4200
20	0.9257	7.34	4200
40	0.8095	7.18	4200
60	0.7132	7.13	4100
80	0.6352	7.16	4100
100	0.5669	7.31	4100
120	0.4556	7.31	4100

Voltaje= 4.5 V

Amperaje= 1.2 A

Densidad= 60 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.20	4300
20	0.9116	7.38	4300
40	0.7677	7.52	4300
60	0.6435	7.54	4300
80	0.5074	7.76	4300
100	0.4328	8.32	4300
120	0.3916	8.66	4300

Voltaje= 5.1 V

Amperaje= 1.6 A

Densidad= 80 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.40	4200
20	0.8569	7.46	4200
40	0.6551	7.44	4200
60	0.5635	7.53	4200
80	0.4403	8.08	4100
100	0.3815	8.47	4100
120	0.3233	8.13	4100

Voltaje= 6 V

Amperaje= 2 A

Densidad= 100 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.48	4200
20	0.7938	7.57	4200
40	0.5799	7.74	4200
60	0.4343	8.17	4200
80	0.3689	8.62	4200
100	0.3232	8.93	4100
120	0.3054	8.40	4100

PROCESO EN LOTES CON ELECTRODOS DE ALUMINIO.

Voltaje= 2.2 V

Amperaje= 0.4 A

Densidad= 20 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.00	4700
20	0.8028	7.02	4700
40	0.7035	7.00	4700
60	0.6840	7.02	4700
80	0.6616	6.99	4700
100	0.6385	7.01	4500
120	0.6385	7.05	4500

Voltaje= 3 V

Amperaje= 0.8 A

Densidad= 40 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.42	4500
20	0.6628	7.17	4500
40	0.6239	7.17	4500
60	0.6066	7.17	4300
80	0.5987	7.18	4200
100	0.5324	7.26	4100
120	0.2961	7.49	4150

Voltaje= 3.7 V

Amperaje= 1.2 A

Densidad= 60 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	6.95	4500
20	0.9500	6.97	4500
40	0.9423	7.00	4500
60	0.9892	7.11	4300
80	0.7680	7.22	4200
100	0.2450	7.52	4150
120	0.1835	7.63	4150

Voltaje= 4.4 V

Amperaje= 1.6 A

Densidad= 80 A/m²

tiempo C/Co (min)	C/Co pH	pH Conductividad	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.17	4500
20	0.6632	7.19	4500
40	0.6170	7.34	4500
60	0.3030	7.47	4300
80	0.1926	7.62	4200
100	0.1746	7.71	4150
120	0.1660	7.77	4150

Voltaje= 4.8 V

Amperaje= 2 A

Densidad= 100 A/m²

tiempo (min)	C/Co	pH	Conductividad (micromhos)
0	1.0000	7.47	4500
20	0.6907	7.23	4500
40	0.6223	7.29	4400
60	0.1982	7.68	4300
80	0.1762	7.79	4200
100	0.1656	7.87	4100
120	0.1599	8.08	4150

PROCESO EN CONTINUO CON ELECTRODOS DE FIERRO.

Voltaje promedio= 4.5 V

Amperaje= 0.8 A

Densidad= 40 A/m²

tiempo de residencia prom.(min)	C/Co	pH	Conductividad promedio (micromhos) promedio
0	1.0000	7.40	4500
20	0.9072	7.31	4500
40	0.7689	7.29	4500
60	0.6341	7.25	4500
80	0.5652	7.34	4500
100	0.5391	7.75	4450

Voltaje Promedio= 6.4 V

Amperaje= 1.2 A

Densidad= 60 A/m²

tiempo de residencia prom.(min)	C/Co	pH promedio	Conductividad (micromhos) promedio
0	1.0000	7.40	4500
20	0.8190	7.39	4500
40	0.5720	7.33	4450
60	0.4620	7.33	4400
80	0.3579	7.34	4350
100	0.2231	8.17	4300

Voltaje Promedio= 8.2 V

Amperaje= 1.6 A

Densidad= 80 A/m²

tiempo de residencia prom.(min)	C. Co	pH promedio	Conductividad (micromhos) promedio
0	1.0000	7.50	4500
20	0.7664	7.28	4500
40	0.4951	7.67	4500
60	0.3580	7.88	4450
80	0.2230	8.00	4400
100	0.1905	7.31	4400

PROCESO CONTINUO CON ELECTRODOS DE ALUMINIO

Voltaje promedio= 3.2 V

Amperaje= 0.8 A

Densidad= 40 A/m²

tiempo de residencia prom.(min)	C/Co	pH promedio	Conductividad (micromhos) promedio
0	1.0000	7.25	4500
20	0.8431	7.00	4500
40	0.8160	7.08	4500
60	0.7810	6.94	4500
80	0.7069	7.03	4450
100	0.4191	7.03	4400

Voltaje Promedio= 4 V

Amperaje= 1.2 A

Densidad= 60 A/m²

tiempo de residencia prom.(min)	C/Co	pH promedio	Conductividad (micromhos) promedio
0	1.0000	7.20	4500
20	0.6680	7.20	4500
40	0.6517	7.21	4500
60	0.5320	7.21	4500
80	0.3820	7.13	4450
100	0.1947	7.20	4400

FIERRO RESIDUAL EN PROCESO POR LOTES.

Densidad	20 A/m ²	40 A/m ²	60 A/m ²	80 A/m ²	100 A/m ²
Tiempo	Fierro	Fierro	Fierro	Fierro	Fierro
(min)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
0	3.9	4.2	4.0	4.0	4.1
20	37.3	10.7	15.0	28.4	24.5
40	55.3	45.7	9.3	30.8	11.4
60	23.6	56.1	7.4	32.1	9.3
80	22.9	20.9	6.3	11.8	6.2
100	16.5	18.4	5.8	10.1	4.6
120	13.4	12.8	4.3	4.0	2.8

ALUMINIO RESIDUAL EN PROCESO POR LOTES.

Densidad 100 A/m ²	
Tiempo	Aluminio
(min)	(ppm)
0	0.5
20	12.3
40	16.7
60	15.0
80	2.0
100	1.5
120	0.9

DATOS DE SEDIMENTACION PARA UNA DENSIDAD DE CORRIENTE
DE 100 A/m² Y UN TIEMPO DE TRATAMIENTO DE 100 min.
USANDO UNA PROBETA DE 1000 ml.

SEDIMENTACION DE ALUMINIO

SEDIMENTACION DE FIERRO

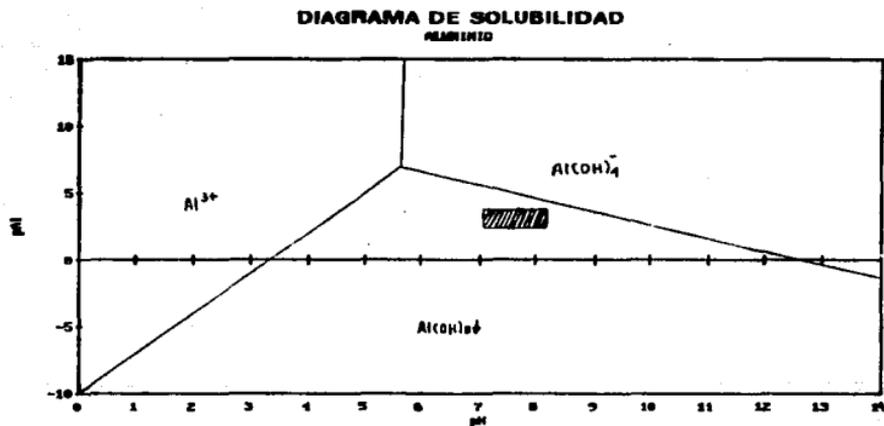
Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (cm)
0	35.0	35.0
20	12.9	19.1
40	9.6	14.4
60	8.4	12.8
80	7.5	11.8
100	6.7	10.9
120	6.3	10.3

APENDICE B

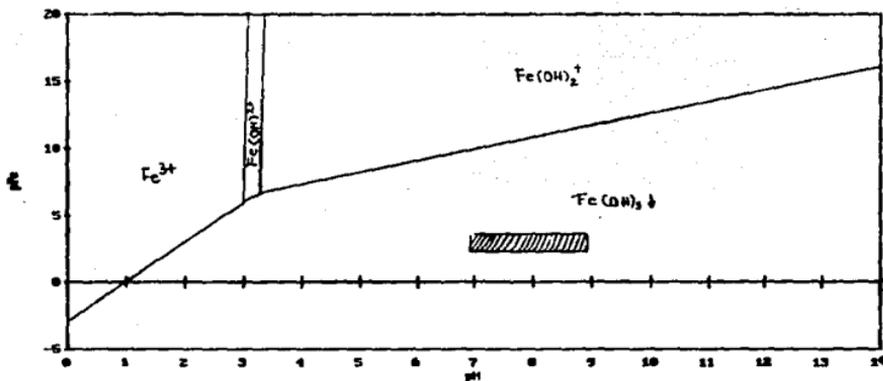
DIAGRAMAS DE SOLUBILIDAD.

APENDICE B

A continuación se muestran las gráficas de solubilidad para el aluminio y el hierro, en función del pH.



**DIAGRAMA DE SOLUBILIDAD
FIERRO**



Para saber si realmente se forman flóculos durante el tratamiento, es necesario conocer la concentración de Fe³⁺ y Al³⁺ así como el pH de trabajo.

Para calcular las cantidades en gramos de los iones se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad en gramos del ión} = \frac{\text{PM} \cdot I \cdot t}{n \cdot F}$$

donde: PM= Peso molecular (g/mol)

I= Intensidad de corriente (C/s)

t= Tiempo (s)

n= Número de electrones intercambiados (adimensional)

F= Constante de Faraday (96500 C)

PM Fe³⁺ = 55.85

PM Al³⁺ = 27.98

Los resultados obtenidos en proceso por lotes fueron los siguientes:

Cantidad de aluminio en gramos

Densidad (A/m^2)	20	40	60	80	100
Tiempo (min)					
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.0447	0.0895	0.1342	0.1789	0.2236
40	0.0894	0.1789	0.2684	0.3578	0.4473
60	0.1342	0.2684	0.4026	0.5367	0.6708
80	0.1789	0.3578	0.5367	0.7156	0.8946
100	0.2236	0.4473	0.6709	0.8946	1.1182
120	0.2684	0.5367	0.8051	1.0735	1.3418

Cantidad de hierro en gramos

Densidad (A/m^2)	20	40	60	80	100
Tiempo (min)					
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20	0.0920	0.1840	0.2760	0.3680	0.4600
40	0.1840	0.3680	0.5520	0.7360	0.9200
60	0.2760	0.5520	0.8280	1.1040	1.3800
80	0.3680	0.7360	1.1040	1.4720	1.8400
100	0.4600	0.9200	1.3800	1.8400	2.3000
120	0.5520	1.1040	1.6560	2.2080	2.7600

De los datos anteriores y haciendo las conversiones pertinentes se llega a que la concentración de cada uno de los iones, y el pH en solución es:

:Al: $a_{\text{Al}^{3+}} = 2.5488 \cdot 10^{-4}$ $p_{\text{Al}} = 3.5936$

:Al: $a_{\text{Al}(\text{OH})_3} = 7.6512 \cdot 10^{-3}$ $p_{\text{Al}} = 2.1162$

$p_{\text{H}}^{\text{Al}^{3+}} = 6.95$

$p_{\text{H}}^{\text{Al}(\text{OH})_3} = 8.06$

:Fe: $a_{\text{Fe}^{3+}} = 2.5342 \cdot 10^{-4}$ $p_{\text{Fe}} = 3.5961$

:Fe: $a_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 7.6027 \cdot 10^{-3}$ $p_{\text{Fe}} = 2.1190$

$p_{\text{H}}^{\text{Fe}^{3+}} = 6.97$

$p_{\text{H}}^{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 8.93$

Localizando los puntos de operación en las gráficas de solubilidad anteriores se observa que en todo momento los iones precipitaban en forma de los flóculos correspondientes.

APENDICE C

ESTIMACION DE COSTOS.

APENDICE C

COSTO

Costos de la energía requerida en el tratamiento electrolítico para proceso en continuo, usando electrodos de aluminio con una densidad de corriente de 60 A/m² y un tiempo de tratamiento de 80 min, con un voltaje de 4 V.

$$\text{WATTS} = \text{VA} = 4 \times 1.2 = 4.8 \text{ VA} = 4.8 \text{ J/s} = 4.8 \text{ watts}$$

$$\text{ENERGIA} = 4.8 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times 80 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 23040 \text{ J}$$

$$\text{COSTO} = 23040 \text{ J} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3600000 \text{ J}} = \frac{\$ 133.00}{1 \text{ kWh}} = \$ 0.8512$$

$$\text{COSTO POR METRO CUBICO} = \frac{\$ 0.8512}{6.5 \text{ l}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = \$ 130.95/\text{m}^3$$

Si esto se compara con otros procesos como el tratamiento con ozono, método que remueve aproximadamente el 69% de sílice (a nivel industrial) y que requiere de la generación del gas a través de dos electrodos, el costo de la energía requerida para la generación de ozono reportado por Echols y Mayne⁶ es de \$ 24.96/m³ de agua tratada.

Es importante resaltar que la comparación no es del todo aplicable dado que para ello sería necesario considerar aspectos de la operación, tales como volumen del agua de reposición, la purga y el tiempo de tratamiento. Sin embargo se da este dato como una mera referencia.

BIBLIOGRAFIA.

- American Water Work Association. "WATER QUALITY AND TREATMENT" Cuarta edición, Mc. Graw Hill, U. S. A. 1990.
- ASTM. "MANUAL DE AGUA PARA USOS INDUSTRIALES". Tercera edición Editorial Limusa, México 1982.
- ASTM, "WATER QUALITY CRITERIA". Publicado por American Society for Testing and Materials, U.S.A., 1967.
- Beecher J.S. "COOLING WATER TROUBLES AND TREATMENT". Part. 1. Plant Engineering Library, New York, U.S.A., 1979.
- Camp. R. Thomas and Meserve L. Robert. "WATER AND ITS IMPURITIES" Segunda edición, Dowden Hutchinson Ross, Inc. U.S.A. 1974.
- Cooling Tower Manual. "LIQUID EFFLUENT. POLLUTION CONTROL". Cap. 7. Cooling Tower Institute, Houston, Texas, December, 1976.
- Cooling Tower Manual. "WATER CHEMISTRY AND TREATMENTS". Cap 6. Cooling Tower Institute, Houston, Texas, January, 1981.
- Collins A. & Fisher Lillie. "SILICATE REACTIONS". A review united states department of the interior. National technical information service. Office of Saline water. Research and Development Progress. Report # 307, primera parte, 1969.
- Echols J.T. & Mayne S.T. "COOLING-WATER CLEANUP BY OZONE". Chemical Engineering, U.S.A. May 1990
- Hammer J. Mark. "WATER AND WASTEWATER TECHNOLOGY". Segunda edición, John Wiley & Sons, U.S.A. 1986.
- Hardenbergh W. A. y Rodie Edward B. "INGENIERIA SANITARIA". Cuarta edición, Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1975.
- Hilleboe E. Herman, "MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS". Editorial Limusa, S.A., México, 1987.

- Lawrence Walter & Weedle Clark. "RECLIMED WASTE WATER FOR COOLING TOWER MAKEUP. VOLUMEN 35. Proceedings of the American Power Conference. 1973.
- Maron y Frutton. "FUNDAMENTOS DE FISICOQUIMICA". Editorial Limusa, S.A de C.V.. México, 1968.
- Martínez D. Sergio A., " TRATAMIENTO ELETROLITICO DE EFLUENTES DE REFINERIA DE PETROLEO". Tesis de doutorado. Universidad Estadual de Campinas, Brasil, 1991.
- Martínez D. Sergio. "TRATAMIENTO ELECTROLITICO DE EFLUENTES". Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. Vol. XXII, Núm. 2. Abril-Junio de 1990.
- Martínez D. Sergio. " TRATAMIENTO ELECTROLITICO DE EFLUENTES INDUSTRIALES". Revista del Instituto Mexicano del Petróleo. Vol. XXII, Núm. 3. Julio-Septiembre de 1990.
- Maskewfair Gordon. "INGENIERIA SANITARIA Y DE AGUAS INDUSTRIALES" Ediciones ciencia y técnica S.A., México 1987.
- Nordell Eskel. "TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS" Compañía Editorial Continental S. A., México 1975.
- Powell Sheppard T. "ACONDICIONAMIENTO DE AGUAS PARA LA INDUSTRIA" Editorial Limusa, México 1979.
- Fürshel. "TRATADO GENERAL DEL AGUA Y SU DISTRIBUCION". Tomo III. Editorial Urmo, S.A. España. 1976.
- Silverstein Ronald & Curtis Spencer. "COOLING WATER. A REPRINT FROM CHEMICAL ENGINEERING". Mc. Graw Hill, New York, U.S.A., 1971.
- Summers Donald. "MANUAL DE QUIMICA". Segunda edición, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1983.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- 1 Powell Sheppard T., Acondicionamiento de aguas para la industria, p.135.
- 2 Powell Sheppard T., Acondicionamiento de aguas para la industria, p. 135.
- 3 Powell Sheppard T., Acondicionamiento de aguas para la industria, p. 138.
- 4 Martínez D. Sergio, Tratamiento eletrolitico de efluentes de refinería de petróleo, p. 18.
- 5 Powell Sheppard T., Acondicionamiento de aguas para la industria, p. 136.
- 6 Echols & Mayne, Cooling-water cleanup by ozone, p. 167.