



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

***AUTOMATIZACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN Y PURGA DE UN ABLANDADOR  
DEL TIPO CAL- INTERCAMBIO IÓNICO A ELEVADAS TEMPERATURAS***

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

IVONEE SUSSETH GODINEZ MIRANDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICO

Guatemala, agosto de 1999.



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

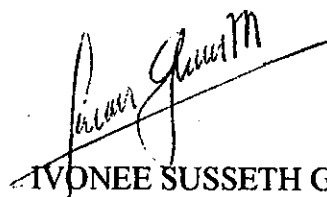
Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

***AUTOMATIZACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN Y PURGA DE UN ABLANDADOR  
DEL TIPO CAL- INTERCAMBIO IÓNICO A ELEVADAS TEMPERATURAS***

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería

Química con fecha

17 de julio de 1997.



IVONEE SUSSETH GODINEZ MIRANDA.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL PRIMERO	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL SEGUNDO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL TERCERO	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL CUARTO	Br. Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán
VOCAL QUINTO	Br. Mauricio Grajeda Mariscal
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinoza Smith
EXAMINADOR	Ing. Oscar René Rosal Higueros
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, 15 de Abril de 1999.

Señor Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Universidad de San Carlos  
Ing. Otto R. de León  
Su despacho

Respetable Ing. De León:

Por este medio me dirijo a usted para solicitarle la aprobación del trabajo de tesis que desarrollara la Srta. estudiante Ivonee Susseth Godínez Miranda. El tema desarrollado por la Srta. Godínez consiste en

**AUTOMATIZACION DE LA ALIMENTACIÓN Y PURGA DE UN ABLANDADOR DEL TIPO CAL- INTERCAMBIO IONICO A ALTAS TEMPERATURAS**

Conjuntamente con la Srta. Godínez he revisado el proyecto de automatización desarrollado y es un estudio serio por lo que me permito manifestarle que tanto la Srta. Godínez como mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la tesis antes mencionada.

Sin otro particular, se despide de usted.

Atentamente,



Ing. Mecánico Electricista Rodolfo Samayoa.  
Asesor de Tesis  
Colegiado No. 3078



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 5 de agosto de 1,999.

Ingeniero  
Otto Raúl de León de Paz  
Director Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

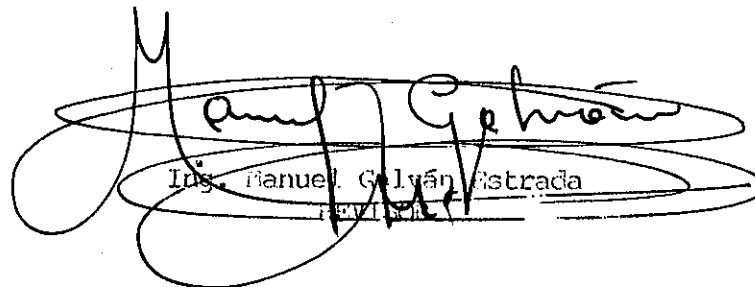
Estimado Ingeniero de León.

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el Informe Final de Tesis de la Estudiante **Ivonee Susseth Godinez Miranda**, titulado: **AUTOMATIZACION DE LA ALIMENTACION Y PURGA DE UN ABLANDADOR DEL TIPO CAL-INTERCAMBIO IONICO A ELEVADAS TEMPERATURAS**. Dejo constancia de aprobación del respectivo trabajo.

Sin otro particular y agradeciéndole la atención que se sirva dar a la presente, le saluda.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

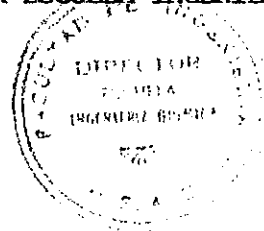
  
Ing. Manuel Galván Estrada



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química; Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de tesis de la estudiante IVONEE SUSSETH GODINEZ MIRANDA, titulado: **AUTOMATIZACION DE LA ALIMENTACION Y PURGA DE UN ABLANDADOR DEL TIPO CAL-INTERCAMBIO IONICO A ELEVADAS TEMPERATURAS**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Otto Raúl de León de Paz  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 4 de agosto de 1,999.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **AUTOMATIZACION DE LA ALIMENTACION Y PURGA DE UN ABLANDADOR DEL TIPO CAL-INTERCAMBIO A ELEVADAS TEMPERATURAS** de la estudiante **IVONEE SUSSETH GODINEZ MIRANDA**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios  
DECANO



Guatemala, 4 de agosto de 1,999.

## **DEDICATORIA**

**A::**

**DIOS**

Por permitir que cumplamos nuestros sueños.

**LA VIRGEN MARÍA**

Que intercede siempre por nosotros ante su Hijo.

**MIS QUERIDOS PADRES**

**FRATERO GODÍNEZ Y ANGELITA  
MIRANDA DE GODÍNEZ**

Muchas gracias por su amor, paciencia, esfuerzo y los consejos que siempre me brindan.

**MIS HERMANOS**

**CARLOS Y MERY**

Por estar siempre conmigo incondicionalmente en cualquier momento.

**MIS ABUELITOS**

**JUAN JOSÉ GODÍNEZ CIFUENTES  
Y A LA MEMORIA DE MI QUERIDA  
ABUELITA MARÍA FUENTES DE GODÍNEZ.  
SALOMÓN MIRANDA Y AURA DE MIRANDA  
(Q.E.P.D.)**

**MIS TIOS Y PRIMOS EN ESPECIAL A LA FAMILIA GODÍNEZ OCHOA.**  
Por su apoyo y cariño.

**MI TÍA VIOLETA RUÍZ (Q.E.P.D.)**

Por su vida que estuvo llena de cariño, amistad y enseñanzas para todos los que tuvimos la oportunidad de conocerla.

**MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS.**



## ÍNDICE GENERAL

LISTA DE ILUSTRACIONES .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN .....	IX
INTRODUCCIÓN .....	X
ANTECEDENTES .....	XII
1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....	1
1.1 Tanque dosificador .....	1
1.2 Tanque sedimentador .....	1
1.3 Filtros .....	2
1.4 Unidades de intercambio iónico .....	2
1.5 Equipo y cristalería para la realización de los análisis químicos	3
2 MATERIALES .....	4
2.1 Hidróxido de calcio .....	4
2.2 Óxido de magnesio .....	4
2.3 Intercambiadores iónicos sintéticos .....	5
2.4 Cloruro de sodio .....	5
3 CONTAMINANTES DEL AGUA .....	7
3.1 Componentes primarios .....	7
3.2 Componentes transitorios .....	8

4.	OPERACIONES UNITARIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA...	9
4.1	Coagulación y floculación.....	9
4.2	Separación sólidos/líquidos.....	10
4.3	Precipitación .....	12
4.4	Adsorción .....	14
4.5	Desgacificación .....	15
5.	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS QUÍMICAS PARA EL CONTROL DE LOS PARÁMETROS DEL AGUA BLANDA .....	16
5.1	Notación de pH .....	16
5.2	Dureza total .....	16
5.3	Alcalinidades P, M y OH .....	17
5.4	Sílice .....	17
6	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	19
7.	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR Y EN LAS UNIDADES DE INTERCAMBIO IÓNICO CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL .....	22
7.1	Tanque sedimentador .....	22
7.1.1	Variación de la dureza .....	22
7.1.2	Variación de la alcalinidad .....	22
7.1.3	Variación de sílice .....	23
7.1.4	Variación de pH .....	23
7.2	Unidades de intercambio iónico .....	23
7.2.1	Variación de la dureza .....	23

<b>8</b>	<b>DISEÑO PARA AUTOMATIZAR LA PURGA Y LA ALIMENTACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR.....</b>	<b>24</b>
8.1	Objetivos de la automatización .....	25
8.2	Funcionamiento .....	25
8.3	Instalación y consideraciones .....	28
8.4	Costo estimado de la automatización del proyecto.....	34
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR Y EN LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL CONTROLADA .....</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>39</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>41</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>43</b>
	<b>APÉNDICE</b>	
1	Especificaciones y alimentación del tanque sedimentador .....	44
2	Equipo .....	48

3	Parámetros fisicoquímicos en el tanque sedimentador.....	55
4	Gráficas de resultados .....	58
5	Pruebas para el control de los parámetros del agua blanda .....	69

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

No.	TÍTULO	Pág.
1	Etapas del asentamiento de las partículas	11
2	Diagrama de instalación del sistema de purga y dosificación automática	27
3	Diagrama de control: módulo de entrada digital	32
4	Diagrama de control: módulo de salida digital	33
5	Alimentación de cal y magnesia por consumo de agua	47
6	Proceso de cal e intercambio iónico en ciclo sódico	48
7	Tanque sedimentador	49
8	Tanque dosificador	50
9	Unidad intercambiadora de iones	51
10	Ensamble interno del filtro de antracita	52
11	Conecciones para chequeo del nivel de cama de lodo	53
12	Escape del condensado contacto directo	54
13	Dureza del agua en función del tiempo	59
14	Alcalinidad OH en función del tiempo	60
15	pH en función del tiempo (Alimentación manual)	61
16	Sílice en función del tiempo (Alimentación manual)	62
17	Dureza del agua en función del tiempo	63
18	Dureza del agua en función del tiempo	64
19	Alcalinidad OH en función del tiempo	65
20	pH en función del tiempo	66
21	Sílice en función del tiempo	67

22	Dureza del agua en función del tiempo	68
----	---------------------------------------	----

### TABLAS

No.	TÍTULO	Pág.
I	Tipos de conexión de cables en diferentes conexiones	31
II	Costo estimado de la automatización del sistema	34
III – IV	Alimentación de cal y magnesia por consumo de agua	46

## GLOSARIO

<b>Ablandamiento</b>	Remoción de la dureza (calcio y magnesio) del agua.
<b>Adsorción</b>	Es la adhesión de una capa de moléculas o partículas coloidales a la superficie de un sólido, que generalmente es poroso.
<b>Alcalinidad</b>	Por definición la alcalinidad total (alcalinidad M) es aquella que reaccionará con ácido mientras que el pH de la muestra se reduce hasta el punto final del anaranjado de metilo (a un pH de aproximadamente 4.2). La alcalinidad F, existe arriba de pH 8.2 y es la que reacciona con ácido mientras que el pH de la muestra se reduce a 8.2.
<b>Automatización</b>	Arte y técnica de procesamiento en que el control y operación humano son mínimos. Todo el campo de investigación centrado en el diseño, desarrollo, aplicación y métodos para hacer procesos o máquinas de activamiento automático o automovimiento.
<b>Cal</b>	Producto químico común para el tratamiento de agua. Se mezcla con el agua para producir cal apagada, o hidratada, $\text{Ca(OH)}_2$ .
<b>Catión</b>	Ión cargado positivamente que resulta de la disociación de moléculas en solución.
<b>Coagulación</b>	Neutralización de las cargas de la materia coloidal (se considera a veces como floculación).
<b>Coloides</b>	Materia de muy fino tamaño de partícula, por lo general en el intervalo de $1\text{E}-5$ a $1\text{E}-7$ cm de diámetro.
<b>Condensado</b>	Agua obtenida por evaporación y condensación subsecuente.

<b>Dureza temporal</b>	O dureza de carbonato, es la dureza en el agua causada por bicarbonato y carbonato de calcio y magnesio.
<b>Filtración</b>	Proceso de separación de sólidos de un líquido por medio de una sustancia porosa a través de la cual pasa solamente líquido.
<b>Floculación</b>	Proceso de aglomeración de las partículas coaguladas para formar flóculos sedimentables, por lo general de naturaleza gelatinosa.
<b>Incrustación</b>	Precipitado que se forma sobre las superficies en contacto con el agua como resultado de un cambio físico o químico.
<b>Instalación de</b>	Son instalaciones eléctricas conteniendo medios de servicio para la transformación, acumulación, conducción, distribución y consumo de energía eléctrica con la finalidad de desarrollar un trabajo (mecánico, generación de calor y luz ).
<b>Instalación eléctrica</b>	Es la totalidad de los medios de servicio eléctricos interconectivos en un lugar determinado.
<b>PH</b>	Manera de expresar la concentración de ión H con términos de potencias de diez, el logaritmo negativo de la concentración de ión hidrógeno.
<b>Precipitado</b>	Producto insoluble de una reacción; en una reacción química en medio acuoso por lo general, es un compuesto cristalino que crece en tamaño para volverse sedimentable.
<b>Sedimentación</b>	Asentamiento por gravedad de las partículas sólidas en un sistema líquido.
<b>Vulcanización</b>	Proceso para mejorar la calidad del caucho (dureza y resistencia a los cambios de temperatura) calentándolo con azufre (aproximadamente 150 °C). Para que la reacción sea más rápida se utilizan aceleradores. Algunos compuestos de azufre también se utilizan en la vulcanización.



## RESUMEN

Esta tesis consiste en la automatización en lazo abierto, de la dosificación de productos químicos para el ablandamiento del agua de alimentación en una caldera acuotubular con una potencia de 600 Hp. De esta forma el sistema mantendrá un control preciso del flujo continuo y proporcional de los productos químicos a la unidad ablandadora, para un rango de 150,000 kg/día de agua tratada. La automatización se implementará mediante un controlador lógico programable (SCL 500).

Con el sistema automatizado se prescindirá de la dosificación manual de productos químicos y purga estableciéndose condiciones óptimas de operación en el tanque de sedimentación.

La adición de químicos, hidróxido de calcio y óxido de magnesio, para el tratamiento del agua, es controlada mediante el simple análisis de alcalinidad y sílice del agua tratada.

El presente trabajo describe el funcionamiento y operación de un ablandador del tipo cal-intercambio iónico a altas temperaturas, ubicado en la planta de neumáticos GINSA. Se incluye la descripción de los análisis y parámetros requeridos por el proceso y presenta una alternativa para mantener parámetros constantes en la operación del ablandador con sus respectivas ventajas técnicas y económicas.

## INTRODUCCIÓN

El agua es utilizada en la industria en la generación de vapor para potencia o calentamiento.

Las aguas naturales contienen gran variedad de compuestos minerales, en su mayoría sales de calcio y magnesio causantes de la dureza del agua. Para los procesos de generación de vapor, se necesita eliminar estas sustancias para obtener agua blanda. El agua de la planta proviene de dos pozos con un contenido de sílice de 100 ppm y que consigue reducirse a 5.0 ppm por el proceso de ablandamiento del tipo cal-intercambio iónico a altas temperaturas. Los sólidos totales disueltos (cationes + SiO<sub>2</sub>) están en el rango de 210 ppm. El contenido de calcio y magnesio es de 90 ppm el cual logra reducirse hasta un rango de 0.0 a 5.0 ppm como carbonato de calcio.

De este modo la incrustación no ocurrirá, debido a las condiciones alcalinas del agua de la caldera. La incrustación cuando ocurre, conduce a pérdidas de eficiencia y al deterioro del equipo, implicando reparaciones costosas.

En este proceso es esencial que la alimentación de los productos químicos sea precisa y confiable. Al automatizar el sistema de dosificado de productos químicos, se puede obtener agua blanda que cumpla con los requerimientos de la caldera en condiciones estables.

Las sales disueltas en las aguas naturales dan como resultado la incrustación y la corrosión de los equipos de intercambio de calor. Esto conduce a pérdidas de eficiencia, al deterioro y en ocasiones a la destrucción total de los mismos, por lo que el siguiente

proyecto tiene como función proporcionar un diseño para la automatización de la adición de productos químicos, en un proceso de ablandamiento a temperaturas elevadas (en un rango de 215° y 230° F), mediante la verificación de parámetros fisicoquímicos del efluente tratado.

La automatización propuesta se logrará mediante la instalación de un controlador lógico programable, también pueden ejecutarse de esta manera, tareas de maniobra y mando en el sistema de alimentación química; para una dosificación constante y uniforme logrando tener condiciones estables de operación.

Por razones de normalización de equipo que opera en la planta se seleccionó el controlador lógico programable SCL 500 de ALLEN BRADLEY, que es el más pequeño de la familia de este tipo de controladores y que tiene un costo de US\$2000.00.

Por medio de la automatización del proceso de aplicación de producto químico, será factible mantener la dosificación constante en un rango de 150,000 kg/día de agua y obtener agua blanda según norma (0.0 – 5.0 ppm de dureza y 5 ppm de sílice) y evitar así el riesgo de incrustaciones en una caldera acuotubular de 600 Hp de potencia.

Al automatizar la purga de lodos del tanque sedimentador, se logrará mantener estable el nivel de la cama de lodos, logrando así que el efluente del tanque sedimentador sea lo más claro posible, disminuyendo el lavado frecuente de los filtros de antracita, aumentando la vida útil de estos. Y a la vez se evitará que se bote una cantidad mayor de lodos, lo cual desajusta el nivel deseado de cama de lodos (que es entre los puntos de toma de muestras No.4 y No. 5 del tanque sedimentador), y que repercute en agua blanda con una dureza y sílice fuera de norma.

## ANTECEDENTES

En el tesario de la Facultad de Ingeniería y en el Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (ICAITI) se encontró la siguiente literatura:

- Acondicionamiento de aguas para la industria.
- Agua: su calidad y tratamiento.
- Tratamiento del agua para la industria y otros usos.
- Evaluación de resinas orgánicas, ácido/base en el tratamiento de agua con alto contenido de sílice y dureza, por intercambio iónico.
- Automatización en el control de sólidos disueltos, residuales químicos y régimen de purga en calderas pirotubulares.
- Manual del Ingeniero Químico.
- Diseño, optimización e instalación de un sistema de distribución de agua tratada para una industria de bebidas gaseosas.

Para llevar a cabo el ablandamiento de agua existen varios tratamientos, entre ellos están: El de resinas orgánicas e inorgánicas, el de ósmosis inversa y por el uso de productos químicos. De este último hay cuatro disposiciones: cal – soda (frío o caliente), cal – yeso (frío o caliente), cal – zeolitas (frío o caliente) y cal – soda:fosfato (solamente caliente).

# I DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

## 1.1 Tanque dosificador

Consiste en un recipiente cilíndrico vertical de 37 plg (0.94 m) de diámetro por 45 plg (1.14 m) de altura y una capacidad aproximada de 163 gal (0.617 m<sup>3</sup>). Está constituido de lámina de hierro negro de 1/8 plg (3.18E-3 m) de espesor y cuenta con conexiones por bridas a la bomba de alimentación de lechada de cal y magnesia y drenajes con sus respectivas válvulas. Adicionalmente cuenta con una válvula manual en la parte superior que permite agregar agua a la solución, figura No. 8.

## 1.2 Tanque sedimentador

Es un cilindro con un cono invertido al final, figura No. 11. Este tanque tiene compartimentos separados para pasar al desareador el agua tratada y el condensado. Este condensado está libre de aceite y de agua contaminada. El vapor, para desaerear el condensado y el agua tratada, entra a través de una simple tubería en la caja de vapor la cual tiene una división vertical separando el condensado y el agua tratada en la parte baja de la caja de vapor.

La concentración de gases no condensables, como oxígeno y dióxido de carbono, es evitado paulatinamente por la continua remoción de una parte substancial de vapor y gases no condensables del compartimento de calentamiento. Estos gases son removidos a través de un escape de condensado el cual condensa el vapor y permite la descarga de gases no condensables a la atmósfera sin la pérdida de mucho calor, figura No. 12.

Una vez desaereado el condensado va directamente a la caldera. El agua tratada desaereada suple la alimentación de la caldera solamente después de que todo el condensado disponible ya ha sido usado.

Las funciones de este tanque son las de proveer el tiempo necesario para que se efectúen las reacciones químicas para el ablandamiento, proveer agua para el lavado de los filtros, facilita la remoción del lodo de precipitados y clarifica el agua a la vez que recupera el agua de lavado de los tanques clarificadores.

Para controlar el nivel de agua en el ablandador, hay una válvula, la cual automáticamente mantiene en el nivel adecuado el agua.

### **1.3 Filtros**

El ablandamiento produce turbidez en el agua, esta turbidez es eliminada por medio de filtros de antracita, mineral de una variedad muy dura. Son filtros verticales de 42 plg (1.1 m) de diámetro y 52 plg (1.32 m) de altura. La concha está diseñada para una presión mínima de operación de 50 psi ( $3.44E5 \text{ N/m}^2$ ), con capacidad de 29 galones/minuto ( $1.83E-3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), figura No.10. Tiene incorporado un indicador de flujo de agua de lavado para indicar la proporción de agua de lavado. La frecuencia de la operación de lavado sobre los filtros debe ser controlado en base al descenso de la presión.

### **1.4 Unidades de intercambio iónico**

Consiste en tres simples recipientes cilíndricos verticales de 40 plg (1.02 m) de diámetro por 26 plg (0.66 m) de altura y una capacidad aproximada de 92 galones ( $0.35 \text{ m}^3$ ), cada uno consta de una armazón de concreto que soporta al lecho intercambiador de iones provisto de tuberías y válvulas que permiten las operaciones de ablandamiento,

enjuagado figura No. 9. Este sistema emplea un tanque de plástico para saturar la solución de salmuera y cuantificarla para ser aplicada al lecho intercambiador de iones.

### **1.5 Equipo y cristalería para la realización de los análisis químicos**

Están disponibles con todas las soluciones y equipos para determinados análisis químicos del agua. Los reactivos químicos especificados, son estandarizados y preparados por un laboratorio externo. En los métodos de titulación, el laboratorio usual de vidrio es el requerido. Para los métodos de color, es más rápido y conveniente el uso de un comparador de color. Se debe mantener el equipo y la cristalería todo el tiempo limpio y ordenado para obtener resultados confiables.

Todas las pipetas y probetas graduadas deben ser cuidadosamente lavadas antes de usarlas, preferiblemente con agua de la que se va a analizar. Las cápsulas en donde se realizará la titulación debe ser lavada con agua destilada.

# 1. MATERIALES

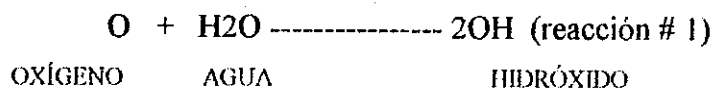
## 2.1 Hidróxido de calcio

Nombre común:	cal (lechada)
Fórmula:	Ca(OH) <sub>2</sub>
Peso equivalente:	40
pH al 1 %:	12
Disponibilidad:	Terrón como CaO Polvo 93 – 95% Lodo 15 – 20%

Sólido blanco que se disuelve escasamente con el agua para dar el álcali conocido como agua de cal. Normalmente usada en plantas de tratamiento de agua. La cal hidratada, debe ser blanca, seca, polvo fino y libre de terrones. El agua es tratada hidróxido de calcio para reducir químicamente la dureza.

## 1.2 Óxido de magnesio

Sólido blanco que aparece naturalmente como el mineral periclase. Se prepara calentando magnesio en oxígeno o por descomposición de hidróxido, carbonato (MgCO<sub>3</sub> magnesita calcinada) o nitrato de magnesio. Es débilmente básico por la atracción que ejercen los iones óxidos sobre los protones de las moléculas de agua:





El agua es tratada, además, con óxido de magnesio para reducir por adsorción la concentración de sílice y para precipitar los carbonatos formados por la reacción de hidróxido de calcio.

### **2.3 Intercambiadores iónicos orgánicos sintéticos**

Material sólido, el cual acepta los iones indeseables del agua cruda y cede un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en el intercambiador de iones. Son estructuras en forma de esqueleto que poseen muchos sitios para intercambio iónico. El esqueleto de plástico insoluble es un ión de enorme tamaño cargado eléctricamente para retener iones de carga opuesta. La estructura de plástico es porosa y permeable. Tienen forma de granos de un tamaño de 20 a 40 mallas. Son de materiales plásticos sintéticos, como copolímeros de estireno y divinil benzeno. Son insolubles y su vida útil es de cinco a diez años.

### **2.4 Cloruro de sodio**

Sal común, NaCl. Sólido blanco que se encuentra en el agua de mar y en salmueras naturales. El compuesto se disuelve en agua con la absorción de calor, cambiando muy poco su solubilidad con la temperatura.

### 3. CONTAMINANTES DEL AGUA

Los materiales solubles en agua están distribuidos en cinco categorías:

Componentes primarios (en más de 5 ppm)

Componentes secundarios (en más de 0.1 ppm)

Componentes terciarios (en más de 0.01 ppm)

Componentes a nivel de trazas ( en menos de 0.01 ppm).

Componentes transitorios.

#### 3.1 Componentes primarios

##### 3.1.1 Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ : Peso molecular = 61)

Este ión es el componente alcalino principal de casi todas las fuentes de agua. Se encuentra en el rango 5 – 500 ppm como carbonato de calcio. El control de alcalinidad es importante en el agua concentrada de las calderas y en el agua de enfriamiento en los sistemas de enfriamiento por evaporación. Se reduce la alcalinidad mediante el ablandamiento con cal o mediante la adición directa de ácido.

##### 3.1.2 Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ : peso atómico = 40; grupo IIA, metal alcalinotérreo)

Es el componente principal de la dureza en el agua y generalmente se encuentra en el rango 5 – 500 ppm como carbonato de calcio, 2-200 ppm como calcio. La dureza de calcio puede reducirse hasta un nivel de 35 ppm de carbonato de calcio mediante ablandamiento en frío con cal y hasta menos de 25 ppm de carbonato de calcio mediante ablandamiento en caliente con cal. Se reduce a menos de 1 ppm de carbonato de calcio mediante métodos de intercambio iónico.

**3.1.3. Magnesio ( $Mg^{++}$ ; peso atómico = 12.1; grupo IIA; metal alcalinotérreo).**

La dureza de magnesio del agua es, por lo general, aproximadamente una tercera parte de la dureza total, siendo las dos terceras partes restantes dureza de calcio. Su concentración varía entre 10 – 50 ppm. Debe eliminarse junto con el calcio cuando se requiere agua blanda para alimentación de calderas o para otros procesos. Se elimina mediante el ablandamiento con cal en caliente a 1 – 2 ppm de carbonato de calcio.

**3.1.4 Sílice ( $SiO_2$ : peso molecular = 60; óxido de silicio, grupo IV, no metal).**

Se encuentra en agua dulce en un rango de 1-100 ppm. La sílice se considera coloidal debido a que su reacción con adsorbentes como óxido de magnesio e hidróxido férrico muestra características similares a las de los coloides típicos.

Es indeseable en el agua de reposición para calderas, no sólo debido a que puede formar una incrustación en la misma caldera, sino también por que se volatiliza a altas temperaturas y se redeposita en las cuchillas de las turbinas. Los procesos de tratamiento para eliminar la sílice son: adsorción sobre precipitados de magnesio durante el proceso de ablandamiento con cal, adsorción sobre hidróxido férrico en los procesos de coagulación utilizando sales de hierro; e intercambio aniónico en los procesos de desmineralización.

## **3.2 Componentes transitorios**

### **3.2.1 Componentes del ciclo del carbono. (Carbono C; peso atómico = 12; grupo IVA, no metal)**

El gas más común que contiene carbono es el dióxido de carbono. Las aguas de pozos profundos contienen con frecuencia más de 25 ppm de dióxido de carbono y pueden estar saturadas con este gas a la presión hidrostática y temperatura del nivel del agua.

## 4. OPERACIONES UNITARIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

### 4.1. Coagulación y floculación

Estos procesos se emplean para extraer del agua los sólidos suspendidos y que su rapidez natural de asentamiento sea demasiado bajo para proporcionar clarificación efectiva. Los coloides, son partículas que se encuentran estabilizadas por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repelen a las partículas vecinas; al repelerse no forman masas mayores (flóculos) y las partículas no se asientan. La coagulación desestabiliza estos coloides al neutralizar las fuerzas que las mantiene separados.

La coagulación se logra, añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado. Estos coagulantes, cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos al juntarse son capaces de asentarse. El proceso de desestabilización es la coagulación y la etapa de formación de flóculos es la floculación.

Los coloides se hallan en agua cruda (silice) o pueden producirse en los procesos de precipitación, como el ablandamiento con cal.

Los coloides siempre necesitan coagularse para alcanzar un tamaño efectivo y una rapidez de asentamiento. Estos se clasifican en hidrofóbicos e hidrofílicos. De importancia en el tratamiento de agua es que los hidrofílicos pueden reaccionar químicamente con el coagulante usado en el proceso de tratamiento.

## 4.2 Separación sólidos/líquidos

Para extraer sólidos finos en el tratamiento de agua, es necesaria la sedimentación y la filtración, con el auxilio de un tratamiento químico.

La sedimentación es la eliminación de sólidos suspendidos en el agua por asentamiento gravitacional. Para que se efectúe la sedimentación, la velocidad del agua debe reducirse a un valor que los sólidos se asienten por gravedad si es suficientemente grande el tiempo de retención en el recipiente de sedimentación.

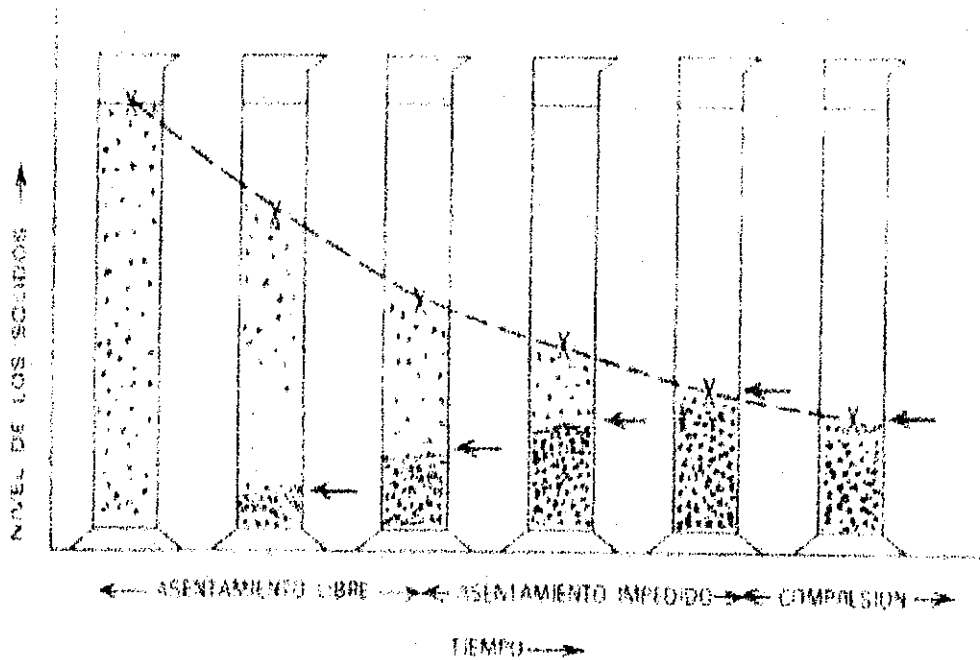
La velocidad de asentamiento de las partículas está determinada por su tamaño, forma y densidad, además de la naturaleza del líquido a través del cual se asientan. Cuando las partículas se asientan a través del líquido en caída libre, el líquido desplazado por las partículas se mueve hacia arriba y el espacio entre las partículas es tan grande que el contraflujo del agua no interpone fricción. Cuando las partículas se aproximan al fondo del recipiente y empiezan a formar una interfase líquido/sólido, disminuye su velocidad de caída libre.

Los sólidos reunidos, o lodo, se compactan lentamente (asentamiento impedido), en donde las partículas se encuentran tan juntas que la fricción producida por la velocidad del agua desplazada, interfiere con el movimiento de la partícula. Al continuar la sedimentación, las partículas llegan a una capa densa de lodo previamente establecida. El principal objetivo de la sedimentación es la obtención de agua clara en el efluente. La clarificación se emplea en la preparación de agua cruda y para el tratamiento de aguas de desecho.

Para el movimiento de una partícula rígida en un fluido existen tres fuerzas que actúan sobre los cuerpos: la gravedad que actúa hacia abajo, la fuerza de flotación que

actúa hacia arriba y la resistencia o fuerza de retardo que actúa en dirección opuesta al movimiento de la partícula.

Fig. No. 1 Etapas del asentamiento de los particulados en el agua: al principio, las partículas caen libremente en el agua. A medida que se aglomeran se restringe su velocidad de asentamiento y aumenta el volumen del lodo asentado. En las etapas finales, la compactación o compresión se vuelve muy lenta. (Ref. No. 5)



Los clarificadores por gravedad se clasifican en tres grandes tipos: sedimentación simple, unidades de contacto de sólidos y asentadores de planos inclinados. El tipo de unidades de contacto de sólidos presenta dos tipos básicos: el clarificador de recirculación de lodos y el clarificador de cama de lodo. Ambos combinan el mezclado químico, la floculación y la clarificación en una sola unidad.

La filtración en medio granular es aplicable en la eliminación de sólidos suspendidos en el intervalo de 5 – 50 ppm. Los filtros en medio granular pueden tratar sólidos suspendidos hasta 1000 ppm y producir una eliminación del 90%. La eliminación de

sólidos por filtración incluye varios mecanismos, algunos de carácter físico y otros de carácter químico. Estos mecanismos incluyen la adsorción y el colado.

La adsorción depende de las características físicas de los sólidos en suspensión y del medio filtrante. Es una función del tamaño de grano del medio filtrador y de las propiedades del floculo, como el tamaño, la resistencia al esfuerzo cortante y adhesividad. El colado, es el factor principal que determina la jornada del filtro. La característica principal del diseño de un buen filtro es reducir a un mínimo el colado, ya que produce una pérdida rápida en la presión (pérdida de presión aumenta exponencialmente con el tiempo).

De los diferentes tipos de medios de filtrado empleados para eliminar sólidos suspendidos, el más común es la arena de sílice, aunque la antracita triturada también se usa con frecuencia, figura No. 10. Se emplea un solo medio, en el recipiente del filtro se clasificará conforme al tamaño: parte superior partículas más pequeñas. Cuando el agua fluye por la arena hacia abajo, los sólidos forman un colchón en la superficie, y la filtración típica tiene lugar en las primeras pulgadas superiores del filtro. La arena se limpia lavándola hacia arriba con agua y esto clarifica al lecho hidráulicamente, manteniendo el material más fino en la parte superior.

El lecho de filtro tiene una profundidad de 24 a 30 plg (0.61 a 0.76.m), soportada sobre varias zonas de diferente gradación de la grava.

### **4.3 Precipitación**

El ablandamiento con cal, es el proceso de precipitación usado con mayor frecuencia e ilustra la importancia de las cuatro variables en la precipitación:

- |                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| 1.- Solubilidad | 2.- Carga de la partícula |
| 3.- Temperatura | 4.- Tiempo                |



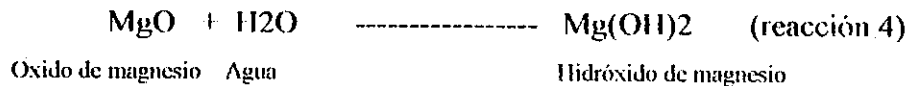


#### 4.4. Adsorción

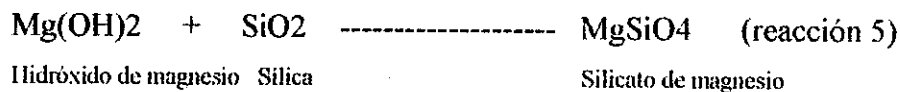
La adsorción es la adhesión física de moléculas o coloides a las superficies de un sólido, un adsorbente, sin que se lleve a cabo una reacción química. La adsorción usa un sólido adsorbente procesado especialmente para el tratamiento del agua.

Los adsorbentes pueden ser materiales en forma de polvo fino, aplicados al agua en un clarificador o antes del filtro. El adsorbente más común es el carbón activado. Una medida de la efectividad del adsorbente es el área de su superficie. Los adsorbentes son porosos y es importante el tamaño de los poros.

La sílice es removida en los procesos de ablandamiento con cal. El hidróxido de magnesio precipitado en el proceso con cal es el principal responsable de esta reacción (reacción 3). El óxido de magnesio es empleado como coagulante en este proceso de ablandamiento. El hidróxido de magnesio precipitado, se forma a partir de la reacción tres o a partir del óxido de magnesio:



Posee la propiedad de remover por adsorción la sílica que es un coloide cargado negativamente, obteniéndose silicato de magnesio:



El proceso se vuelve significativo a temperatura de 120 – 140 grados Fahrenheit, y muy efectivo a las temperaturas de ablandamiento en un proceso en caliente por encima de 220 °F (104 °C). Factores importantes son el tiempo de contacto y la densidad del lodo

adsorbente. De las variedades de recipientes de coagulación disponibles para el tratamiento del agua, aquellos que proporcionan el máximo contacto del agua que debe tratarse con el lodo denso son los que producen la mejor reducción del sílice.

#### 4.5 Desgacificación

El agua puede contener diversos gases en solución así como minerales y materia orgánica. El dióxido de carbono es uno de los gases comunes en la atmósfera.

A un pH por debajo de más o menos 4.5, todo el dióxido de carbono desuelto en el agua está presente en forma de gas; por arriba de más o menos 2.5 todo se encuentra ionizado. Otros gases comunes ionizantes son ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), ácido cianhídrico ( $HCN$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ).

La acción de las bacterias del suelo produce con frecuencia niveles altos de dióxido de carbono en las aguas de pozo, y las aguas profundas de pozo suelen carecer de oxígeno.

La temperatura es un factor importante en la solubilidad de un gas; la solubilidad disminuye al aumentar la temperatura. Un último factor importante en la solución de gases es la difusión de las moléculas de gas a través del agua. La velocidad de difusión aumenta, al aumentar la temperatura puesto que la actividad de las moléculas aumenta y la viscosidad del agua disminuye.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS QUÍMICAS PARA EL CONTROL DE LOS PARÁMETROS DEL AGUA BLANDA

En el acondicionamiento de agua industrial, es necesario que los análisis efectuados puedan gobernar el proceso de tratamiento y deben ser efectuados por personal responsable. Los resultados de los métodos de control determinan los ajustes requeridos en el tratamiento químico.

### 5.1. Notación de pH

Debido a que se trabaja con números muy pequeños en la disociación del agua en sus iones, es más conveniente sustituir una expresión en donde se trabaje con potencias de 10. Esta expresión se define como pH y la relación es:  $\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+]$ .

La concentración de ión H puede medirse con un medidor de pH. Cuando el pH desciende hasta cinco, el ión H empieza a alcanzar los niveles de ppm, y se puede determinar por titulación, utilizando el indicador orgánico correcto. La determinación del pH con un medidor de pH (o mediante un comparador colorimétrico adecuado) puede ser muy valiosos para determinar las concentraciones de iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> en el rango de pH recomendado.

### 5.2 Dureza Total

Es la solución en agua tanto de calcio como de magnesio en forma de cationes, independientemente de la naturaleza de los aniones presentes. Esto se ha expresado, en función del carbonato de calcio. Para determinar la dureza total del agua que sale de los

filtros de antracita se utiliza como indicador el negro de ericromo T en polvo; si hay dureza el indicador da un color rojo. Si no la hay, el indicador se torna azul. Se agrega un buffer a la muestra para conseguir un pH apropiado y se titula con una solución EDTA (0.02 N), hasta obtener un color azul, si es que había dureza presente.

### 5.3 Alcalinidades P, M y OH

La mayor parte de las aguas naturales contiene alcalinidad producida por el bicarbonato y tiene un pH menor de aproximadamente 8.2 – 8.4. Arriba de este pH, el dióxido de carbono deja de existir en cantidades medibles, y el ión carbonato empieza a aparecer. El agua tratada con cal tiene un pH arriba del punto final con fenolftaleína (alcalinidad P). Esta se determina titulando con ácido clorhídrico (HCl) 30N y dará un primer punto final. En el rango de pH de 8.2 – 9.6, los iones bicarbonato y carbonato existen juntos en ausencia de dióxido de carbono e iones hidróxilo medibles.

Este segundo punto final (alcalinidad M), el cual se obtiene agregando más ácido a la solución usando el indicador naranja de metilo. Al aumentar el pH arriba de 9.6, la alcalinidad OH se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Alcalinidad OH (mg/l como CaCO}_3\text{)} = 2P - M \quad (\text{ecuación \#1})$$

Si se obtiene un valor de alcalinidad OH negativo se interpreta como alcalinidad hidroxílica igual a cero.

### 5.4 Sílice

Cuando se ablanda el agua con cal, en el rango de pH de 9.5 – 10.5 el magnesio precipita como el hidróxido y el precipitado está cargado positivamente. En el mismo rango de pH, el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) precipita cargado negativamente. La sílice puede

estar presente en el sistema como un coloide cargado negativamente. Su presencia en agua tratada, se determina mediante un comparador colorimétrico.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El agua que se utilizará para la generación de vapor en la planta proviene de dos fuentes: condensado y agua tratada en el ablandador. El agua cruda es desaereada y químicamente tratada con cal y magnesia. Las cantidades calculadas de dichos productos para una producción de 154,000 kg vapor/día son de 15.72 kg/día de cal y 7.77 kg/día de magnesia apéndice 1.2. las cuales se dividen entre seis batch y se dosifican cada cuatro horas. Son mezcladas en el tanque dosificador hasta lograr una solución uniforme. La solución de productos químicos es bombeada desde el tanque de mezcla hacia la parte superior de la unidad ablandadora, donde se mezcla con aproximadamente 25,000 kg de agua cruda.

El flujo de agua entra a la unidad ablandadora a través de un rociador calentador el cual remueve una gran cantidad de oxígeno y calienta el agua más o menos 13 °F por debajo de la temperatura de vapor, se logra de esta forma que se agite suficientemente la superficie y se mezclen los productos químicos con el agua para acelerar las reacciones a alta temperatura. El vapor requerido para calentar el agua en el ablandador ingresa por la caja de vapor del desareador el cual es distribuido a través de perforaciones en la parte baja de la caja.

El desareador garantiza reducir el oxígeno a 0.005 cc/litro o menos. La presión en la cámara de vapor del calentador debe ser todo el tiempo positiva. El tanque sedimentador debe ser protegido contra una presión superior a las 15 psi (1.03E5 N/m<sup>2</sup>), lo cual se logra con una válvula de alivio en la parte superior del tanque, para permitir el escape de vapor. Esta válvula debe tener suficiente capacidad para descargar toda la cantidad de vapor disponible y debe ser ajustada para abrirse a una presión un poco debajo de la presión a la

el tanque de sedimentación está diseñado. Un flotador controla la válvula que automáticamente admite el agua que sea requerida para suplir a la caldera.

En un tiempo de retención de dos horas, ocurren la reacción y sedimentación. Las reacciones No. 2 a la No. 5 (sección 4.3) son completadas y el precipitado casi coagula antes de que el agua alcance el fondo cónico del tanque donde cambia de dirección, reduce su velocidad y vuelve hacia arriba, precipitando una capa o cama de lodo (medio filtrante) en la sección cónica del tanque sedimentador, donde la coagulación es completada.

La alimentación de cal es controlada para mantener un correcto residual de OH en el efluente del ablandador. Este residual se obtiene a partir del análisis de control de alcalinidad OH, la cual se determina con la técnica No. 1 y No. 2 del apéndice 5.

La cantidad de magnesia en la alimentación se basa en la concentración de sílice en el efluente del ablandador; esta concentración de sílice se determina con la técnica No. 4 apéndice 5.

El flujo a través del ablandador debe ser continuo y estable para poder mantener el nivel de cama de lodos requerido para completar la reacción de reducción de sílice. Esta cama de lodos es todo el sedimento que queda de cal y magnesia.

Una vez que la capa de lodo ha sido formada, su nivel debe ser ajustado para una máxima claridad del efluente. Si la operación del ablandador es intermitente, con frecuentes paros o variaciones, entonces el nivel de la cama puede ser chequeado mediante la técnica No. 5 del apéndice 5.

Por sedimentación el agua se aclara al atravesar la sección cónica del tanque, pero no lo suficiente, por lo que de aquí pasa a los filtros de antracita.



El condensado recuperado del proceso de vulcanización se regresa por medio de bombas al calentador desareador y llega a los recipientes de condensado del ablandador, debido a la alta temperatura del agua debe evitarse los agentes corrosivos pues la velocidad de corrosión será mucho mayor que la esperada en agua fría. Los principales agentes de corrosión son el dióxido de carbono y el oxígeno. El primero mencionado se produce normalmente por la descomposición de alcalinidad en la caldera y el oxígeno puede ser arrastrado dentro del sistema por las infiltraciones de aire o agua que contenga oxígeno disuelto. Debe dársele entonces un tratamiento adecuado al condensado.

El efluente filtrado, pasa a través de intercambiadores de sodio conteniendo resinas con base de estireno, los cuales remueven la dureza de calcio y magnesio de 10 ppm hasta obtener agua con una dureza total de 0.0 a 5.0 ppm. Cuando el lecho intercambiador de iones está saturado con los constituyentes de la dureza, el intercambiador se regenera con salmuera. Finalmente se obtiene agua con baja concentración de dureza, sílice y alcalinidad. Para las calderas que operan con una presión de menos de 1000 psi es esencial obtener estos valores bajos de dureza total porque limitan los sólidos suspendidos previniendo formación de depósitos.

## 7. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR Y EN LAS UNIDADES DE INTERCAMBIO IÓNICO CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL

### 7.1. Tanque sedimentador

Se realizaron análisis químicos en el efluente del tanque sedimentador, durante dos turnos de trabajo de 8 horas cada uno, con régimen de purga y alimentación manual, programado de la siguiente manera: dosificando al tanque de químicos cada cuatro horas en punto, se tomaron muestras para realizar los análisis cada hora. Los datos tabulados se presentan en el apéndice 3.2 y en las figuras de la No. 13 a la No. 16 del apéndice 4.

Inicialmente se pesan cantidades en seco de cal y magnesia, los cuales son agregados al tanque de mezclado, posteriormente inyectado al tanque sedimentador mediante una bomba dosificadora.

**7.1.1 Variación de la dureza.** En el apéndice 3.2 se observan valores de dureza que están fuera de norma (10 ppm). Dos y tres horas después de haber dosificado una carga de productos químicos se mantienen valores bajo norma.

**7.1.2 Variación de alcalinidad.** En la figura No. 14 se observa que esta disminuye en un lapso de tres horas después de haber dosificado una carga de productos químicos. La alcalinidad varía de 25 ppm a 0 ppm. Pero muchos de estos valores de cero ppm son valores negativos, los cuales indican una deficiencia de cal en el dosificado.

**7.1.3 Variación de sílice.** La concentración de sílice máximo debe ser de 10 ppm y como mínimo 5 ppm y según los resultados obtenidos las concentraciones varían entre 15 y menos de 5 ppm.

**7.1.4 Variación de pH.** Se obtienen valores entre 10 y 8.90 unidades de pH, el límite superior se mantuvo en rango, mientras que el inferior estuvo 0.8 unidades por debajo del límite inferior. Se puede observar su comportamiento en la figura No. 15 del apéndice 3.2.

## **7.2. Unidades de intercambio iónico**

**7.2.1 Variación de la dureza.** El agua requerida por la caldera debe tener una dureza de 0.0 a 2.0 ppm para prevenir adherencia de depósitos debido a las altas presiones de operación, pero se observan resultados que van desde 10 ppm a 0 ppm. Para reducir la dureza de 16 ppm del efluente del tanque sedimentador a 5 ppm en el intercambiador iónico, la capacidad de intercambio de lecho se agota, lo cual requiere que se regenere con más frecuencia el lecho, aumentando el consumo de sal.

## 8. DISEÑO PARA AUTOMATIZAR LA PURGA Y LA ALIMENTACIÓN DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR

Los resultados obtenidos de la alimentación manual, tanto del tanque sedimentador como del intercambiador iónico, demuestran que es necesario controlar los parámetros de alcalinidad, dureza y sílice; suficiente lodo debe ser removido del tanque de sedimentación para retener la parte superior de la cama de lodo en el nivel deseado, el cual es generalmente en la parte superior del cono invertido.

Conexiones de muestreo, figura No. 11. muestran la elevación de la cama de lodo. Este lodo es removido por medio de una pequeña línea de purga con una válvula reguladora, la cual es controlada manualmente; de estos constantes chequeos, se observó que algunas veces estaba por encima del nivel deseado, pasando con demasiada turbidez el agua a los filtros; otras veces se había purgado más tiempo que el requerido, ocasionando pérdidas por botar producto químico.

Por lo anterior, se presenta un diseño para automatizar la alimentación química, en donde un medidor de flujo en la línea de entrada de agua cruda controlará la operación del control de alimentación química para proporcionar los químicos de acuerdo a las variaciones en las cantidades del flujo de agua.

Un motor que opera la bomba que inyecta la alimentación a la parte superior del tanque sedimentador, también se conectará al SLC 500, al igual que el agitador del tanque de mezcla de productos químicos, y se colocaran sensores de nivel de flujo en el tanque de productos químicos y en el tanque sedimentador para cuando el nivel de agua este alto o bajo. La frecuencia y duración de la purga de lodos dependerá de que tan

rápido se formen los lodos. La frecuencia de la purga y su duración estará gobernada por el contador y el temporizador del controlador lógico.

“Los procesos se controlan con mayor precisión para dar productos más uniformes y de más alta calidad, mediante la aplicación del control automático, lo cual con frecuencia representa mayores ganancias” Ref. 4.

### **8.1 Objetivos de la automatización**

- Mantener bajo control los parámetros de agua blanda requeridos.
- Mantener estable el control de cama de lodo en el tanque sedimentador.
- Disminuir costos de operación y mantenimiento en los intercambiadores iónicos.

### **8.2 Funcionamiento**

La purga de lodo se controlará automáticamente mediante una válvula solenoide. La válvula solenoide produce una señal eléctrica proporcional al galonaje medido. Esta señal alimenta a un controlador que lo compara con un valor preestablecido. Se desenergiza la válvula solenoide la cual abre la válvula de diafragma de la purga. El temporizador de la purga operará para un período establecido después de que la válvula solenoide se desenergiza para cerrar la válvula de diafragma de la purga. El interruptor de tiempo se ajusta en el sistema y debe ser ajustado para mantener la parte superior de la cama de lodo entre los puntos de muestreo 4 y 5 de la figura No. 11.

Para que la descarga de alimentación química sea en proporción al flujo de agua cruda, se programará en el SCL 500 que la alimentación química sea proporcional a la cantidad de flujo de agua cruda que entra a la unidad ablandadora en un tiempo de cuatro horas. Se instalará un sensor de flujo en la línea de entrada de alimentación

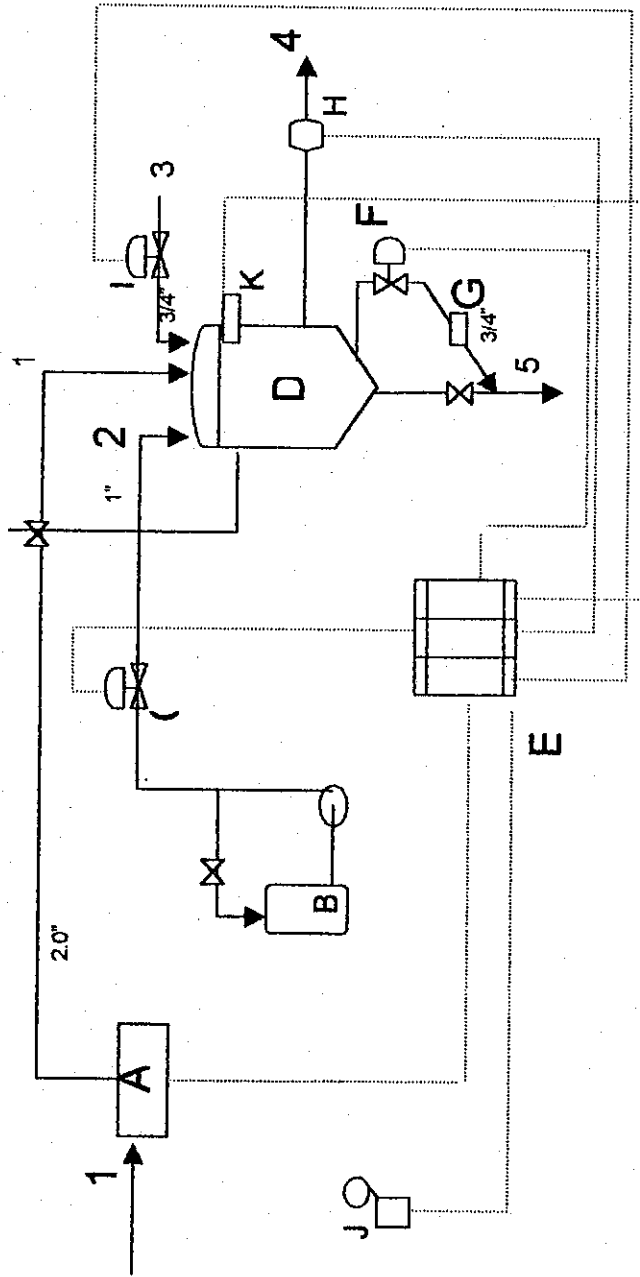
química al tanque sedimentador. Esto logrará que la alimentación química sea precisa y confiable. Se dosificará de la siguiente manera: se programa en el contador y en el temporizador del controlador que a determinada cantidad de agua cruda que ingresa al tanque sedimentador, active una válvula solenoide que permitirá que dosifique la dosis requerida por la carga en un espacio de cuatro horas.

Se instalará una válvula solenoide en la entrada de vapor al tanque sedimentador, para asegurar que las temperaturas que se desean tener en tanque para que se realicen con rapidez y en su totalidad las reacciones de ablandamiento, sean alcanzadas. Se colocará una termocupla en la parte superior del tanque para determinar la temperatura en ese ambiente el cual le informara al controlador si esta fuera del rango de temperatura establecido, y accionara la válvula solenoide, aumentando o disminuyendo la cantidad de vapor que entrara al tanque sedimentador.

Con respecto al pH del efluente que se obtiene, el cual debe de estar entre 9.7 y 10.0 unidades de pH, se instalará en la línea de salida de agua tratada a los filtros de antracita, un medidor de pH, el cual enviará una señal por medio del controlador cuando esté fuera de este rango de pH, y encenderá una alarma que hará que el operario de turno, notifique esta variación al ingeniero de planta y pueda detectar la causa del problema y hacer la corrección necesaria.

DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PURGA Y DOSIFICACIÓN AUTOMÁTICA

Figura No. 2



CORRIENTES:

1. AGUA CRUDA
2. ALIMENTACION QUIMICOS
3. VAPOR
4. AGUA TRATADA A FILTROS
5. AL DESAGÜE

ACCESORIOS:

- A. SENSOR DE FLUJO CON SEÑAL CADA 200 GLS.
- B. TANQUE DE MEZCLADO DE QUIMICOS.
- C. VALVULA PARA CONTROLAR ENTRADA QUIMICOS
- D. TANQUE SEDIMENTADOR
- E. SCL 500 F. VALVULA SOLENOIDE PARA PURGAR LODOS
- G. VALVULA NEUMÁTICA H.. MEDIDOR DE PH I. VALV. CONTROL DE VAPOR
- J.. ALARMA PH FUERA DE RANGO
- K. TERMOPAR

### 8.3 Instalación y consideraciones

La alimentación química proviene del tanque dosificador, formando una línea de tubería que lleva la alimentación desde la parte inferior del tanque a la parte superior del tanque sedimentador. Para prevenir la formación de depósitos en la bomba de químicos y en la línea de alimentación, una cantidad considerable de productos químicos debe de recircularse a través de tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$  de pulgada.

La técnica utilizada para el dosificado de productos químicos, es la técnica de control de duración del impulso. En este tipo de control, el SCL 500 gobernará el tiempo de apertura de la válvula instalada en la línea de alimentación química y que permite el paso de la mezcla al tanque sedimentador en proporción al flujo de agua cruda.

La tubería de salida de alimentación química debe ser lo más corta y directa a la bomba de químicos. Se instalarán en esta línea los siguientes accesorios:

- Válvulas solenoides. Dispositivo de dos posiciones; cuando la corriente eléctrica se aplica a la bobina, la armadura del solenoide se mueve a la posición extrema energizada, y cuando se suprime la corriente, dicha armadura retorna a la posición desenergizada por medio de un resorte. 110 V y 1" de cañería.
- Sensor de flujo de agua de 2" cañería para determinado galonaje de agua/hora. Este sensor tiene contactos que se cierran en un circuito de 12 VAC – 250 VAC cuando el sensor alcanza el número de galones establecidos. Tiene cuerpo de bronce y se monta horizontalmente. El registrador está calibrado en galones y tiene seis dígitos. El interruptor está en el rango de 10 A en adelante a 250 VAC. El flujo en galones en que los contactos se cierran para un diámetro de 1.5" y 2.0" es de 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 2000, 2500, 5000 y 10000. Unión de



tubería macho, temperatura máxima 110 °F, presión máxima 150 psi y precisión de  $\pm 1 \frac{1}{2} \%$ .

- **Un registrador de pH.** Se utilizará un transductor, el cual convierte la señal de pH a una de las señales eléctricas del SCL 500. Se medirá el pH del efluente del tanque sedimentador y emitirá una señal cuando el valor medido esté fuera del rango establecido. Se ajustara en el controlador electrónico la cantidad de productos químicos a inyectar al tanque para lograr corregir esta desviación en el pH del efluente. En la instalación del equipo de pH, se deberá tener cuidado en la instalación del cable entre el electrodo y el instrumento. Debe conectarse a tierra de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Para reducir a un mínimo las interferencias, el cable que va electrodo al transductor debe ser lo más corto posible.
  
- **Controlador lógico programable (SLC 500).** Tiene las siguientes características: Estructura modular: Un CPU 503 12 K de memoria EEPROM, una fuente de poder SLC, un módulo de 16 entradas digitales, un módulo de 16 salidas a relé y un módulo de dos entradas/dos salidas analógicas.

**Construcción y montaje:** todos los módulos son bloques pequeños, manejables y robustos. Funcionan sin necesidad de ventilador y su electrónica es inmune a las interferencias. Los módulos se enchufan en elementos de bus, donde se atornillan a prueba de vibraciones. Los elementos de bus se enganchan sobre un carril normalizado. Alimentación del controlador lógico 24 VDC y para los emisores y actuadores es de 24 / 60 V cc ó 115/230 V c. a. Para la conexión de cables, según el tipo de sección y la intensidad nominal de los aparatos, diferentes posibilidades se presentan en la tabla I.

Programación: como lenguaje de programación se utiliza el RSLOGIX 500 (programación de escalera), que tiene un extenso juego de instrucciones. Requiere una PC IBM – compatible 486/66, 8 MB RAM, 8 MB de espacio disco duro, VGA adaptador gráfico 640 – 480 o de gran resolución (800 x 600 optimal) y cualquier versión de Windows.

La purga proviene de la válvula No. 2 de la sección cónica, llevando el lodo al desagüe; en esta línea se colocarán los siguientes accesorios:

- **Válvula solenoide.** Recibirá señal del cerebro electrónico respecto de la duración de las purgas de lodo, y estará controlada proporcionalmente con respecto al flujo de entrada de agua cruda al tanque sedimentador.
- **Válvula neumática.** Recibirá señal de la válvula solenoide para purgar lodos.
- Se colocará un termopar en la parte superior del tanque sedimentador para la medición de la temperatura. El termopar estará conectado al SLC 500 y éste gobernará la válvula de entrada de vapor al tanque sedimentador. Las combinaciones más comunes para termopares son cobre/constantan, hierro/constantán, cromel/alumel y platino/rodio/platino. Y la variación de temperatura es de  $-320\text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $+2800\text{ }^{\circ}\text{F}$ , dependiendo del termopar que se escoja.

El control eléctrico deberá ser cuidadosamente instalado de acuerdo con el requerimiento local.

**TABLA I**  
**FORMAS DE CONEXIÓN DE CABLES EN LOS DISTINTOS TIPOS DE SECCIÓN**

TIPO DE SECCIÓN	FORMAS DE CONEXIÓN
L1, L2	Terminales directamente en el interruptor o barras adicionales de conexión de cables para 3 a 14 cables paralelos. Cables auxiliares de hasta 2.5 mm cuadrados en regletas de bornes.
S	Cables de hasta 500 mm cuadrados: grapas para conexión de cables sin terminales: > 50 hasta 240 mm : terminales: Cables auxiliares de hasta 2.5 mm a un contacto de separación auxiliar de 20 polos sin tornillos.
K	Hasta 35 mm cuadrados a regletas de bornes; cables auxiliares soldados, enchufables o en regletas de bornes hasta 2.5 mm cuadrados.
T1	Directamente al aparato de maniobra.
T4	Terminales con taladros para terminales en cable.
F	Directamente al aparato de maniobra; cables auxiliares eventualmente a regletas de bornes o a bornes de inserción.

### MÓDULO DE ENTRADA DIGITAL

#### *Descripción de figura No. 3*

I:2/0	Operación manual – automática
I:2/1	Señal sensor de flujo digital
I:2/2	Señal sensor nivel de agua
I:2/3	Manija arranque agitador
I:2/4	Manija arranque bomba de recirculación
I:2/5	Manija de apertura manual de válvula de lodos
I:2/6	Manija de apertura manual de válvula de alimentación de producto químico
I:2/7	Manija de apertura manual válvula de entrada de agua al tanque
I:2/8	Señal back – up motor agitador
I:2/9	Señal back – up bomba recirculación
I:2/10	Señal de sensor de nivel alto de agua
I:2/11	Señal de sensor de nivel bajo de agua

Figura No. 3

### DIAGRAMA DE CONTROL TANQUE SEDIMENTADOR

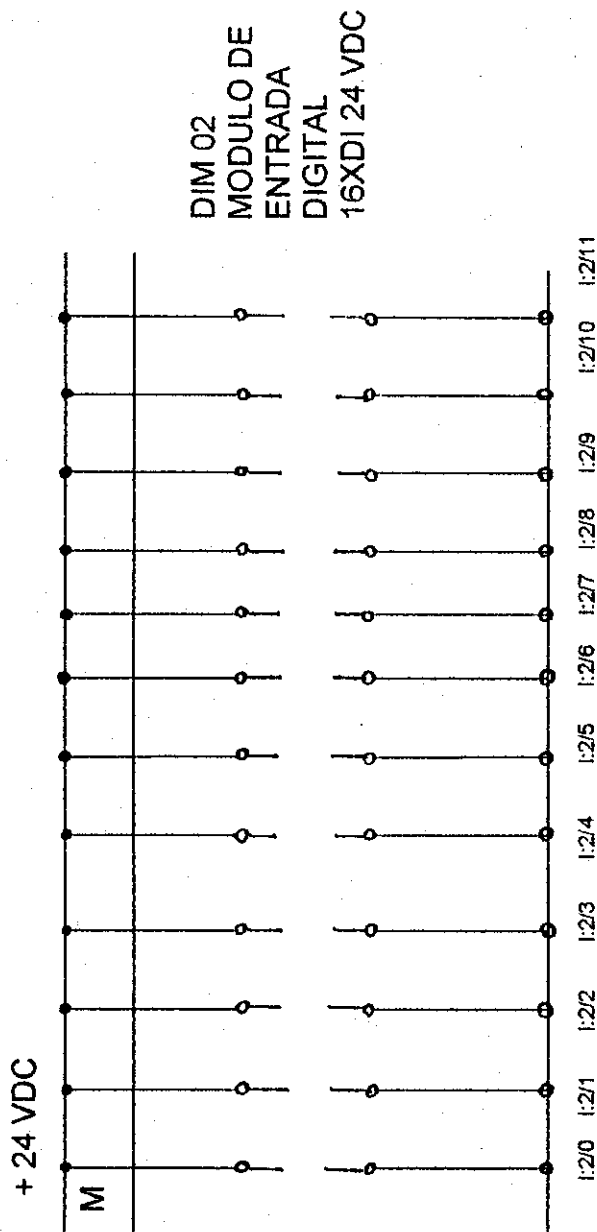
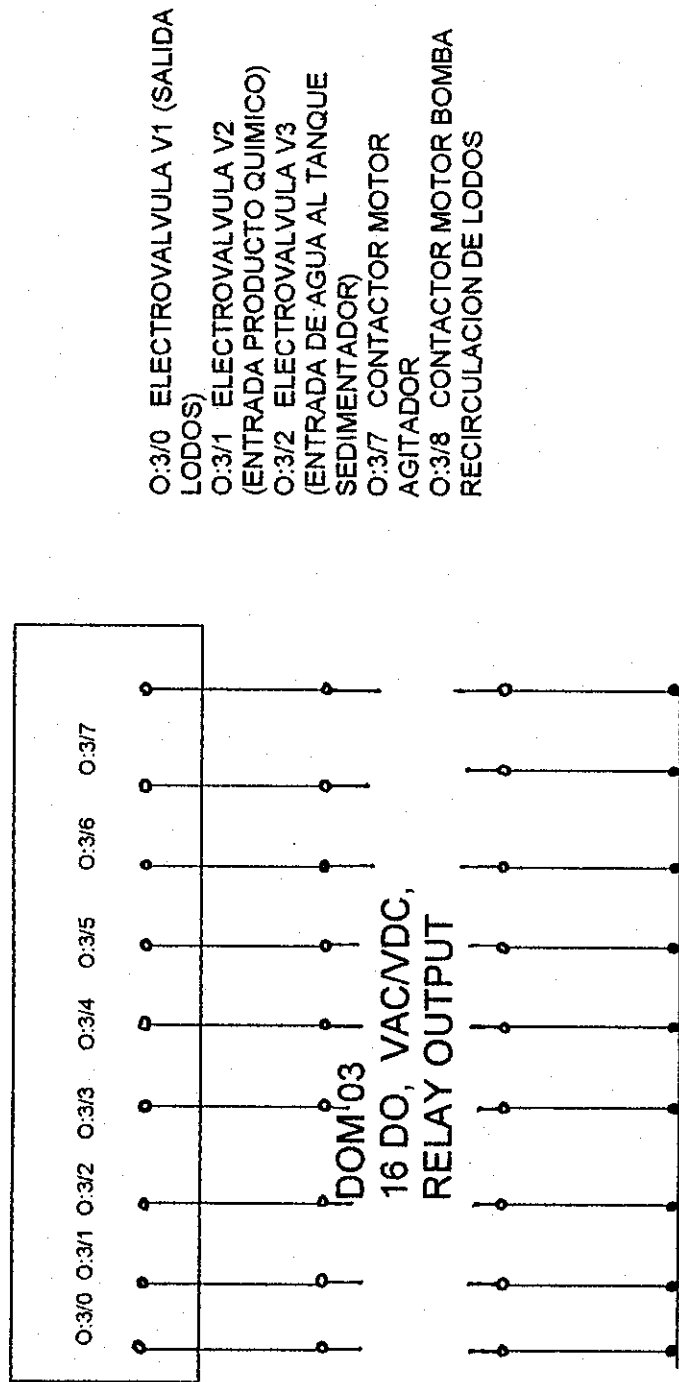


Figura No. 4  
 DIAGRAMA DE CONTROL TANQUE SEDIMENTADOR



**8.4 Costo estimado de la automatización del sistema de alimentación y purga del tanque sedimentador**

**TABLA II  
COSTO ESTIMADO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA**

<b>Gastos de proyecto directo</b>	<b>Valor US\$</b>
Precio del equipo	2,000.00
Materiales empleados para la instalación	1,400.00
Mano de obra directa	1,200.00
<b>Total de materiales y mano de obra directos</b>	<b>4,600.00</b>
<b>Gastos de proyecto indirectos</b>	
Flete, seguros, impuestos	272.00
Gastos generales de instalación	840.00
Gastos de ingeniería del contratista	510.00
<b>Total de costos indirectos del proyecto</b>	<b>1,622.00</b>
<b>Capital de módulo simple</b>	<b>6,222.00</b>
Imprevistos	933.00
<b>Capital básico total</b>	<b>7,155.00</b>

## 9 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR Y EN LOS INTERCAMBIADORES IONICOS CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL CONTROLADA

Se realizaron análisis de control del ablandador, con régimen de purga y alimentación manual controlada, simulando de esta forma, las funciones del autómata que se instalará al tanque sedimentador, programado de la siguiente forma para dos turnos de trabajo:

- Dosificando al tanque de químicos cada media hora en punto, se tomaron muestras para realizar los análisis dos veces cada hora. Los datos tabulados se presentan en el apéndice 3.3 y las figuras de la No. 18 a la No. 22 del apéndice 4.
- Según se muestra en la figura No. 18, para un periodo de dosificación manual controlada, la dureza permanece entre un rango apropiado (0 – 10 mg/l), esto desde las 15:00 horas hasta las 21:00 horas. En la gráfica de alcalinidad expresada como mg/l de carbonato de calcio, se observa como la alcalinidad se estabiliza a las 15:00 horas y permanece en el rango de 0 – 8.5 mg/l

En las unidades de intercambio iónico se obtiene agua blanda con un rango de dureza entre 0.0 y 5.0 ppm, logrando cumplir con el requerimiento de la calidad de agua de reposición a las calderas.

## 10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El caso que afecta principalmente la operación de una caldera, es referido a las sales disueltas en el agua, las cuales están en condiciones de equilibrio hasta que son perturbadas por una fuerza externa, como el calor. Al aumentar la temperatura y empezar el proceso de evaporación, disminuye el volumen de agua, siendo dicha disminución más rápida, cuanto más alta es la temperatura y la presión a que se somete el agua, perdiéndose de esta manera el equilibrio entre el agua y las sales. Esto provocará que las sales precipiten sobre una superficie caliente (tubos de la caldera), causando una incrustación. Por el tratamiento del agua de llenado, las sales del agua (calcio y magnesio) pueden reducirse de forma que la incrustación no se forma.

Una mala operación en el equipo de tratamiento puede resultar en agua de llenado dura, y entonces se formará depósitos que aíslan los tubos de la caldera, llevando estos primero a una pérdida de eficiencia y segundo a una ruptura del tubo. Si estos depósitos no son lo bastante gruesos como para causar la ruptura, hay una disminución de la superficie productiva de la caldera con el consiguiente aumento en el consumo de combustible. De aquí la necesidad de remover la incrustación por limpieza mecánica o química.

En este sistema se procesa el agua cruda del pozo combinando primero aspectos mecánicos con la mezcla de agua caliente (retorno de condensado) y con la inyección de vapor para producir una desgaseificación del agua cruda, proceso en que se elimina buena parte del oxígeno que está disuelto en el agua fría. Se adiciona luego la cal y la magnesia, las cuales reaccionan con las sales contenidas en el agua cruda, formando complejos no solubles, que al precipitar dentro del ablandador, dejan el agua procesada con



concentraciones de cal, magnesio y sílice mucho más bajas que las que tenía al ingresar al ablandador.

El efluente del ablandador pasa por lechos de antracita de diferente granulometría, en donde quedan atrapadas partículas o material precipitado que se fugan del ablandador, obteniéndose un efluente más claro y libre de precipitados.

Como se había mencionado antes, la adición de químicos para el ablandamiento del agua es controlado en base al análisis de alcalinidad y dureza del agua, por lo que se llevó a cabo la alimentación manual controlada de productos químicos, simulando de esta forma el funcionamiento del controlador lógico, requerido para la automatización de esta operación.

En las figuras No. 13 y No. 14 del apéndice 4 se observa un comportamiento no controlado de la dureza y de la alcalinidad del agua con respecto al tiempo, esta es agua que ya ha sido tratada, pero no presenta un contenido de dureza constante, esto se explica porque una dosis completa de químicos es agregada de una sola vez cada cuatro horas a la unidad ablandadora.

Entonces se tiene un exceso de químicos en el agua que entra en ese momento a la unidad, que entre las cuatro y siete horas después de haber agregado la dosis completa, ya se ha consumido toda la carga de químicos por lo que el agua que sale en este lapso de tiempo de la unidad ablandadora no cumple con la norma de dureza y alcalinidad.

En las figuras No.18 y 19 se verifica que una alimentación manual controlada aplicada cada media hora al tanque de mezcla de químicos y con un tiempo de retención del ablandador de dos horas aproximadamente, se mantiene constantes y en rango la dureza y la alcalinidad igualmente el pH y el sílice.

El ablandador se purga de tal manera que la cama de lodo esté entre los puntos 4 y 5 de la toma de muestras, ver apéndice 2.6. Esto se revisa tres veces por turno para mantener estable el control de cama de lodo.

Al automatizar la purga, se ajustará para mantener la parte superior de la cama de lodo entre los puntos ya antes mencionados. Con esto, la purga de lodo manual se haría una vez cada 24 horas, sólo para asegurarse que la válvula está operando y no se ha bloqueado con sedimentos.

El efluente del tanque sedimentador que se obtiene de la alimentación manual controlada esta en un rango de dureza de 10 a 4 ppm, la cual se reduce casi en su totalidad en los intercambiadores iónicos.

## CONCLUSIONES

- 1 Mediante la dosificación automatizada de producto químico en la alimentación y purga del tanque sedimentador, se logra mantener bajo control los parámetros de alcalinidad (0.0 – 8.5 mg/l de carbonato de calcio), dureza (10 mg/l de carbonato de calcio máximo) y sílice ( 5 mg/l de carbonato de calcio ), a la vez que se logra mantener estable el control de cama de lodo, optimizando así el funcionamiento de todo el sistema de generación de vapor.
- 2 Al automatizar el proceso de alimentación de productos químicos y purga del tanque sedimentador, se asegura una buena operación en el equipo de tratamiento de agua de llenado de la caldera.
- 3 El costo de la automatización resulta bajo, si se toma en cuenta el presupuesto asignado para mantenimiento, reparación y sustitución de piezas del equipo involucrado en la generación de vapor que se deteriora si no se controlan las condiciones de operación del proceso de ablandamiento de agua.

## RECOMENDACIONES

- 1.- Como parte esencial del programa de pretratamiento de agua, el control de pruebas de rutina debe ser establecido de tal manera que la calidad y cantidad del agua de llenado sea constantemente monitoreada; por consiguiente, el operador mantendrá información sobre el actual estado de las condiciones del agua de llenado. Con un récord continuo de los datos obtenidos, se irá formando un banco de datos, que se usará en el caso que surja alguna duda sobre algún procedimiento.
- 2.- El responsable del acondicionamiento del agua en la planta, debe incluir cualquier comentario, en el reporte diario de análisis de agua tratada, sobre operación o dificultades encontradas, cualquier duda concerniente a acondicionamiento de agua, notas sobre la condición de la caldera y otro equipo, para poder consultar con el ingeniero encargado de planta y ajustar el tiempo en la dosificación de los químicos o en la purga del ablandador, optimizándose así el proceso. Un buen reporte proporcionará datos esenciales y de gran utilidad, de lo contrario se obtendrán opiniones incorrectas que perjudicarán el proceso de tratamiento de agua.
- 3.- El operador analizará la descarga final, y si las especificaciones de la calidad de agua que se desea obtener no se cumplen, deberá notificar al ingeniero de planta para corregir el tratamiento.
- 4.- Se sugiere hacer las pruebas químicas al ablandador, dos veces cada turno de trabajo, esto es cada cuatro horas, logrando así detectar lo más pronto posible cualquier anomalía de operación en el proceso de ablandamiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. \_\_\_\_\_ **Instruction Book for Hot Lime Soda Softeners.** (1965, The Permutit Company, New York, USA)
2. R. Perry & H. Chilton. **Manual del Ingeniero Químico** (vol. VI. 5ta. ed. 2da. en español, McGraw-Hill, México, 1987)
3. Sheppard T. Powell. **Acondicionamiento de aguas para la industria.** (1ra. ed. Centro regional de ayuda técnica, México, 1966)
4. Jack M. Verrey. **Agua, su calidad y tratamiento.** (1ra. ed. Manual preparado por la American Water Work Association, México, 1968)
5. Frank N. Kemmer & Jhon McCallion. **Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.** (McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V. 1998)
6. Erik R. Sandoval. **Automatización en el control de sólidos disueltos, residuales químicos y regimen de purga en calderas pirotubulares.** (Tesis, Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1993)
7. José Adolfo Echeverría López. **Evaluación de resinas orgánicas, ácido/base en el tratamiento de agua con alto contenido de sílice y dureza, por intercambio iónico.** (Tesis, Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1993)
8. Danilo A. López R. **Acondicionamiento de agua industrial.** (Tesis, Ingeniero Mecánico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 1988)
9. BELTZ Laboratories, Inc. **Handbook of industrial water conditioning.** (Sixth edition 1962, Philadelphia 24, PA. USA)

10. **Gael D. Ulrich. Diseño y economía de los procesos de Ingeniería Química.** (Traducción de la primera edición en inglés de A GUIDE TO CHEMICAL ENGINEERING PROCESS DESIGN AND ECONOMICS, McGraw-Hill. México, 1993)
  
11. **Babcock Rusell H. Instrumentación y control en el tratamiento de aguas potables, industriales y de desecho.** ( 4ta. reimpresión 1985, editorial Limusa, México, 1971)
  
12. **Seip G.Günter Instalaciones eléctricas. Abastecimiento y distribución de energía.** ( Tomo 1. Siemens, 2da. ed.1989).

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- **Badger, W. & Banchemo, J. Introducción a la Ingeniería Química. Primera edición en español. México: McGraw-Hill, 1980.**
- 2.- **Crockford, H. & Knight, Samuel. Fundamentos de Fisicoquímica. Segunda edición. Séptima en español. México: Compañía Editorial Continental, S.A. 1975.**
- 3.- **Echeverría López, José Adolfo. Evaluación de resinas orgánicas, ácido/base en el tratamiento de agua con alto contenido de sílice y dureza, por intercambio iónico. Tesis Ingeniero Químico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1993.**
- 4.- **Geankoplis, Christie. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Segunda edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. 1995.**
- 5.- **Hamer, Philip. Industrial water treatment practice. Second edition. USA: Calgon Corporation, Inc. Pittsburg, PA.**
- 6.- **Kemmer, Frank N. & McCallion, Jhon. Manual del Agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México: McGraw-Hil Interamericana. 1998.**
- 7.- **Nordell, Eskel Water Treatment for industrial and other uses. USA: Reinhold Publishing Corporation. New York, 1951.**
- 8.- **Perry, R. & Chilton, H. Manual del Ingeniero Químico. Vol. VI. Quinta edición en inglés. Segunda en español. México: McGraw-Hill. 1987.**
- 9.- **Water Treatment Reference Manual. Goodyear 1972.**

# APÉNDICE .I

## ESPECIFICACIONES Y ALIMENTACIÓN DEL TANQUE SEDIMENTADOR

### 1.1. ESPECIFICACIONES DEL TANQUE SEDIMENTADOR

#### ABLANDAMIENTO CON CAL Y MAGNESIA A ELEVADAS TEMPERATURAS

1. Capacidad.

Agua tratada 1,803.90 galones/hora ( $1.90E-3m^3/s$ )

Condensado 451.00 galones/hora ( $4.74E-4m^3/s$ )

2. Almacenaje y tiempo de retención

Agua tratada 3,222 galones ( 12.2 m<sup>3</sup>) en un tiempo de retención de dos horas.

3. Coraza.

Presión del diseño 15 libras/pulgada cuadrada ( $1.03E5 N/m^2$ )

4. Control inicial de químicos sugerida.

Por cada 1,000 gal (3.754 m<sup>3</sup>) de agua de alimentación:

0.85 lb (0.39 kg) de cal y 0.42 lb (0.19 kg) de magnesia.



## 1.2 DOSIFICACIÓN DEL ABLANDADOR

El retorno de condensado se alimenta a través de un compartimento independiente y es el que sale hacia la caldera. Por lo tanto es imprescindible garantizar su pureza ya que no pasa por el mismo proceso de purificación que el agua cruda.

Consumo de agua: Aproximadamente 1.1 x kilogramo de vapor

El factor 1.1 representa la relación de vapor producido por kilogramo de agua de alimentación a la caldera, donde el valor 0.1 extra en el consumo de agua indica los kilos de agua que se purgan en el proceso de generación de vapor.

Cálculo del consumo de agua al día:

$$\begin{aligned} 140,000 \text{ kg/día} \times 1.1 \text{ (purga)} &= 154,000 \text{ kg/día} \times 1 \text{ lt/kg} \times 0.2647 \text{ gal/lt} \\ &= 40,686.8 \text{ galones/día} \end{aligned}$$

Dosificación sugerida por cada 1000 galones de agua (según apéndice A.1.1):

0.85 libras de cal:

$$40,686.8 \text{ gal/día} \times 0.8526 \text{ lb/1000 gal} = 34.58 \text{ lb/día} \times 1 \text{ kg/2.2 lb} = 15.72 \text{ kg/día}$$

0.42 lb de magnesia:

$$40,686.8 \text{ gal/día} \times 0.42 \text{ lb/1000 gal} = 17.98 \text{ lb/día} \times 1 \text{ kg/2.2 lb} = 7.77 \text{ kg/día}$$

La dosis que se aplicará al ablandador cada cuatro horas será:

$$\text{CAL: } 15.72 \text{ kg/día} \times 1 \text{ día/6 cargas} = 2.62 \text{ kg/carga}$$

$$\text{MAGNESIA: } 7.77 \text{ kg/día} \times 1 \text{ día/6 cargas} = 1.29 \text{ kg/carga}$$

Mezcla: 3.91 kg/carga.

De la misma forma se efectúan cálculos a diferentes volúmenes de agua que se consumen al día dependiendo de la demanda de vapor, obteniéndose los resultados de la tabla No. III.

Tabla III

ALIMENTACIÓN DE CAL Y MAGNESIA POR CONSUMO DE AGUA

X kg agua /día	Y kg químico/carga	
	CAL	MAGNESIA
100,000	1.87	0.9247
140,000	2.62	1.29
160,000	2.99	1.48

Aplicando el método de mínimos cuadrados a los datos de la tabla No. III, se linealiza la curva con las ecuaciones:

$$Y_{cal} = 53.5 E3 (X) - 152 \quad \text{Ecuación A}$$

$$Y_{magnesia} = 108.2 E3 (X) - 24 \quad \text{Ecuación B}$$

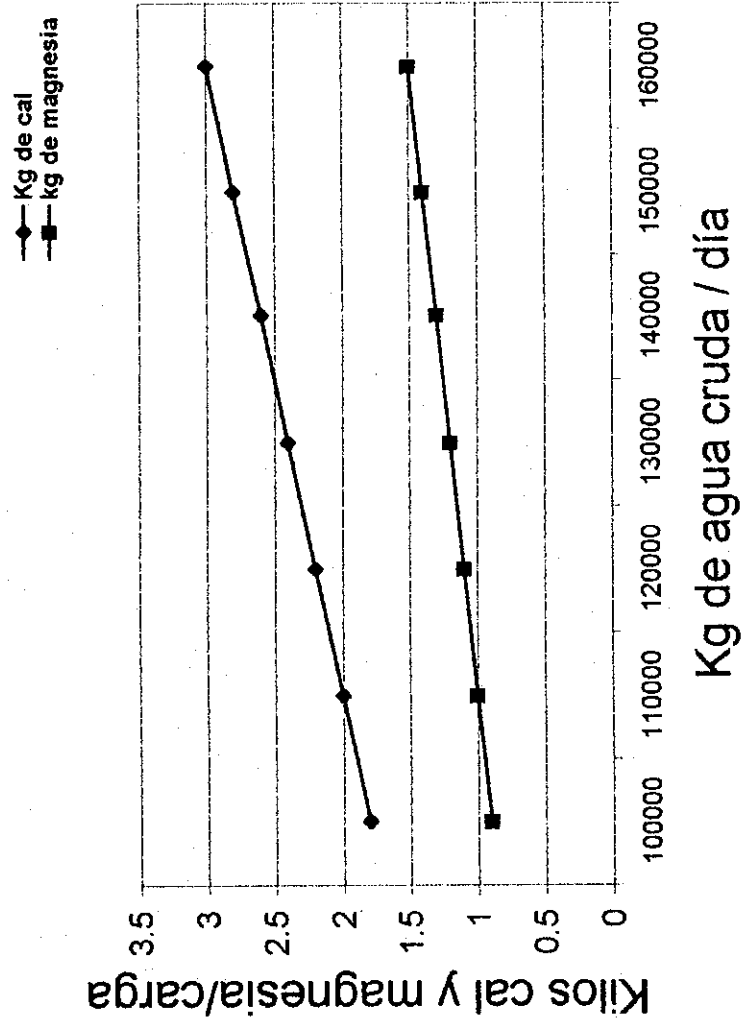
Sustituyendo diferentes cantidades de agua en las ecuaciones A y B se obtiene la tabla No. IV.

Tabla IV

ALIMENTACIÓN DE CAL Y MAGNESIA POR CONSUMO DE AGUA

kg agua/día	kg cal/carga	kg magnesia/carga
100,000	1.90	0.93
110,000	2.10	1.00
120,000	2.20	1.10
130,000	2.40	1.20
140,000	2.60	1.30
150,000	2.80	1.40
160,000	3.00	1.50

**Alimentación de cal y magnesia por consumo de agua**  
**Figura No. 5**



Agua dura con 90 ppm de dureza de calcio y magnesio y 100 ppm de sílice.  
 Una carga de producto químico según apéndice A.1.2, se dosifica cada cuatro horas.

APÉNDICE 2  
EQUIPO

Figura No. 6 PROCESO DE CAL E INTERCAMBIO IÓNICO EN CICLO SÓDICO

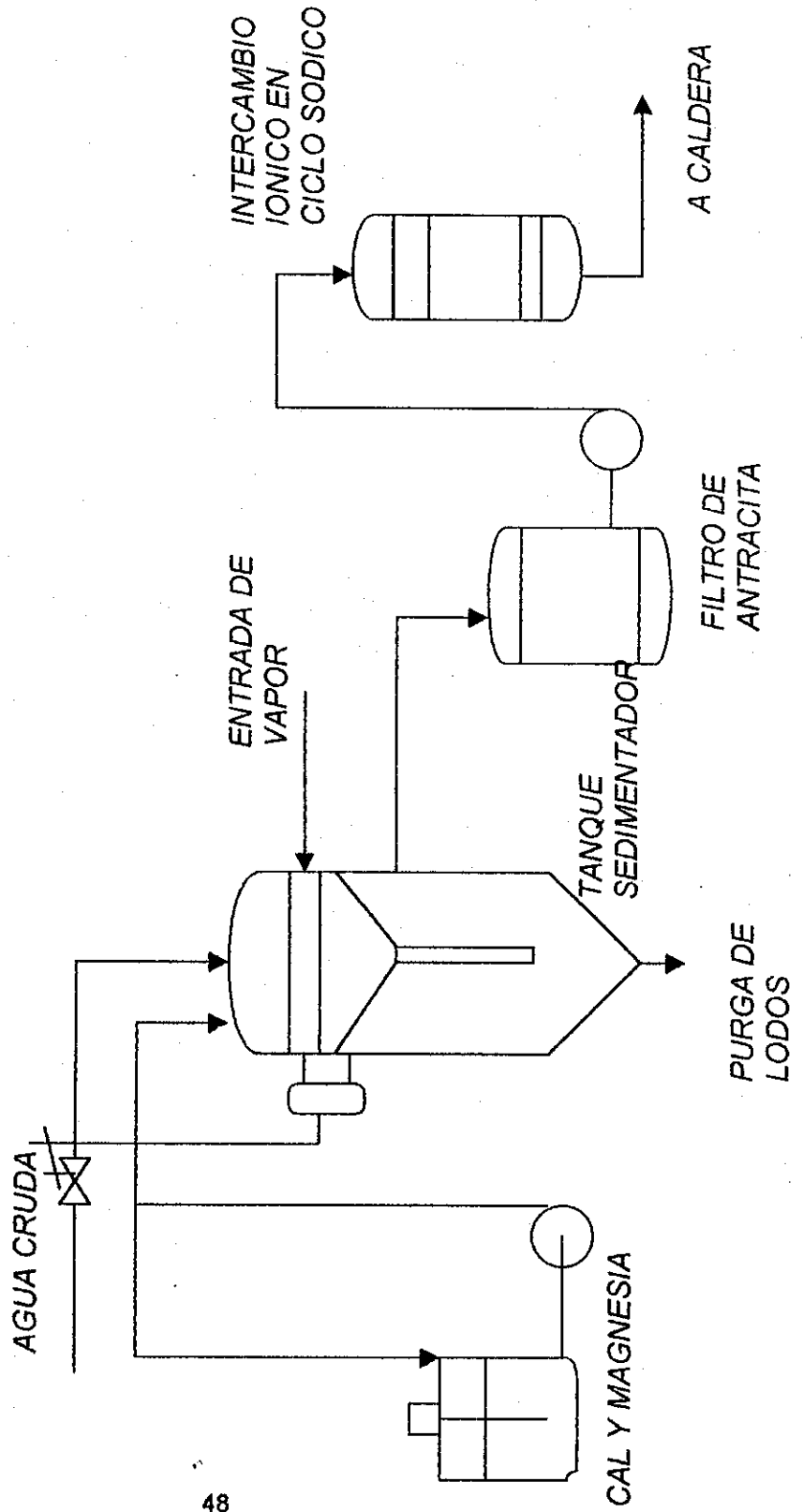


Figura No. 7 TANQUE SEDIMENTADOR

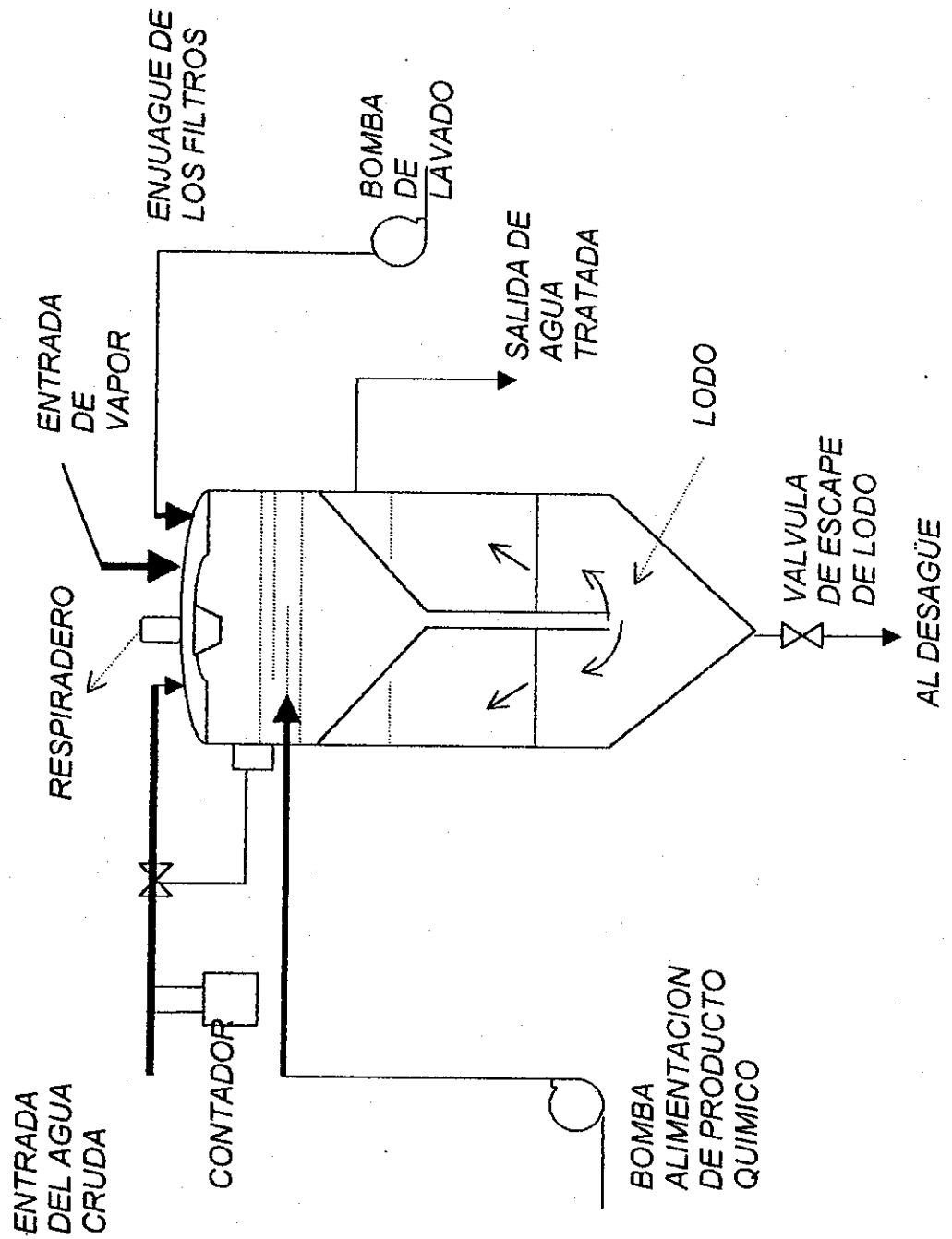
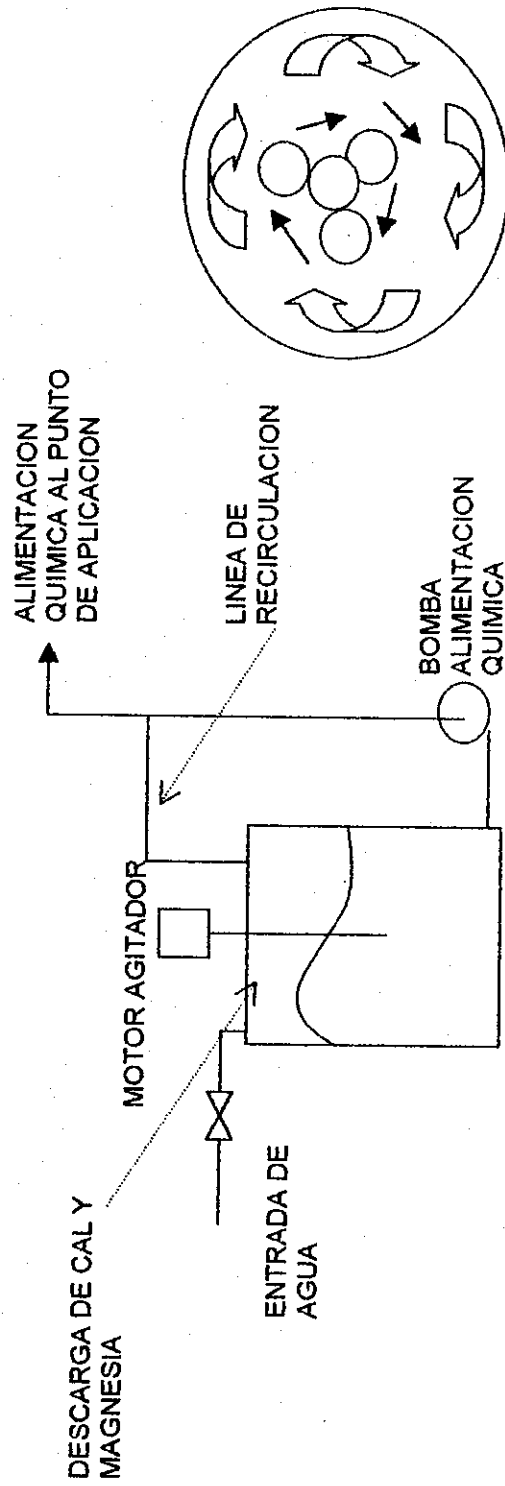


Figura No. 8 TANQUEDOSIFICADOR



AGITADOR MEZCLADOR DE HELICES.  
AGITADOR CENTRAL, VERTICAL SIN  
CORTACORRIENTES.

Figura No. 9 UNIDAD INTERCAMBIADORA DE IONES

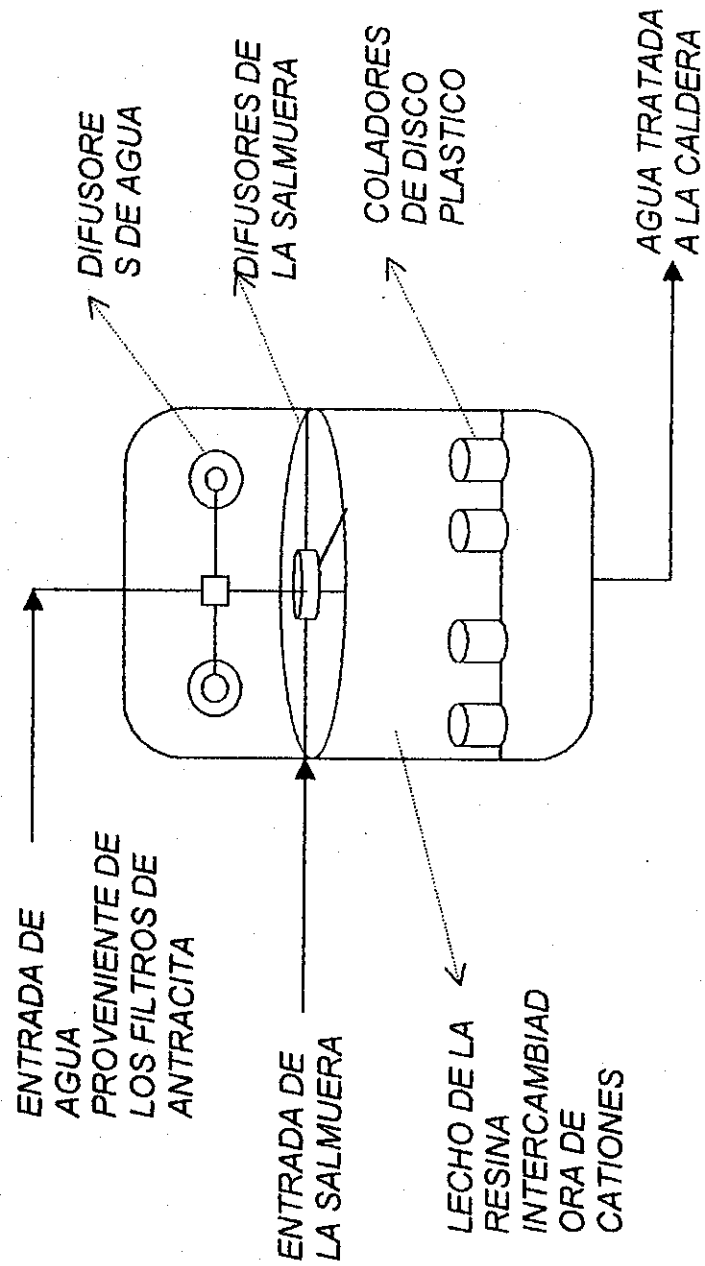


Figura No. 10 ENSAMBLE INTERNO DEL FILTRO DE ANTRACITA

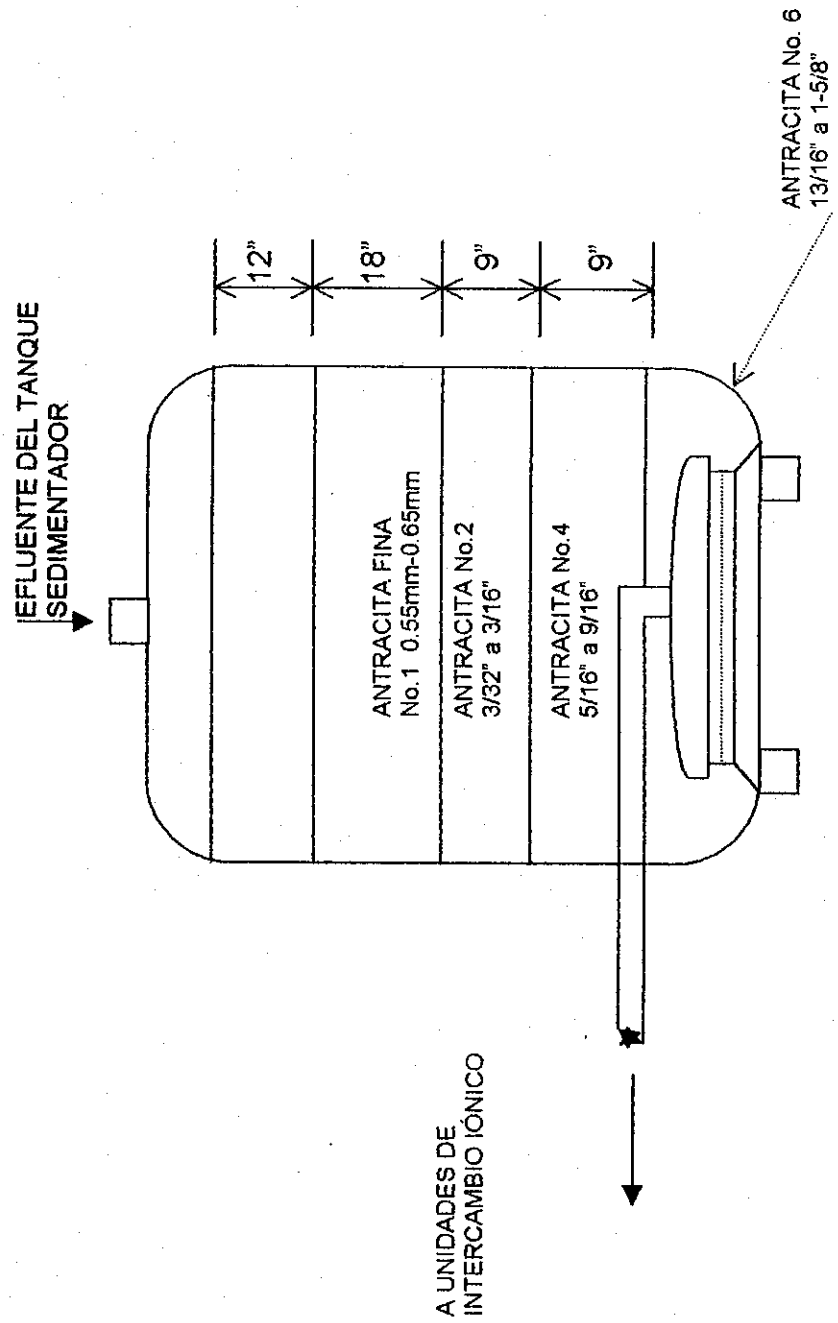
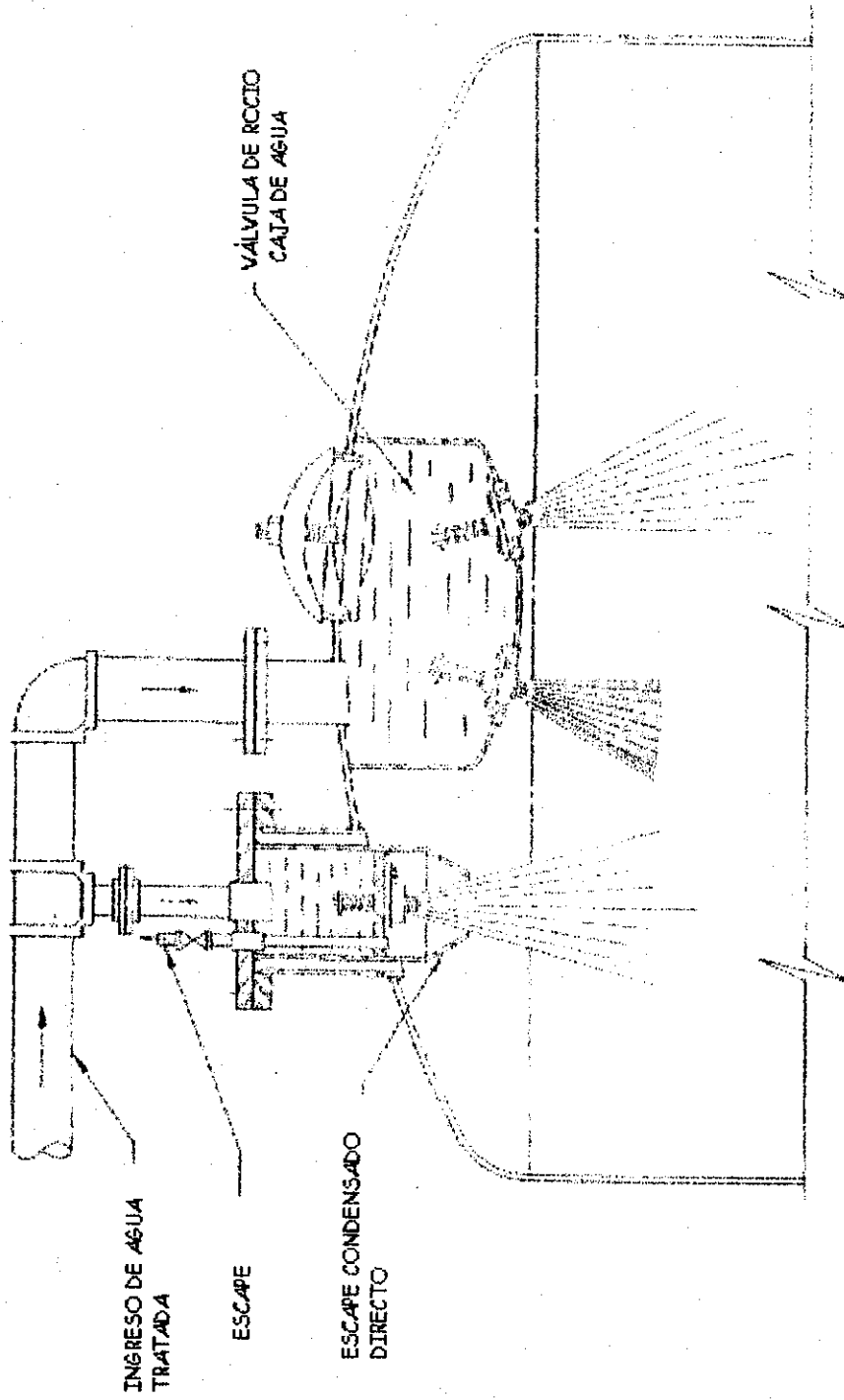






Figura No. 12 ESCAPE DEL CONDENSADO CONTACTO DIRECTO



## APÉNDICE 3. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR

### 3.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL TANQUE SEDIMENTADOR

**Producto químico:** Cal.  
**Propósito:** Control de dureza.  
**Punto de aplicación:** Dentro del ablandador.  
**Producto químico:** óxido de magnesio.  
**Propósito:** Reducción de sílice.  
**Punto de aplicación:** Dentro del ablandador.

PARÁMETRO	LÍMITES	MEDIDA CORRECTIVA
Alcalinidad OH	0.0 – 8.5 ppm	Esta diferencia gobierna la adición de cal. Si la diferencia es menor a cero entonces se tiene que incrementar la dosis de cal. Si la diferencia es mayor de 8.5 mg/l, entonces debe disminuirse la dosis de cal.
Sílica	10 ppm máximo	La reducción de sílica es controlada por la adición del reactivo óxido de magnesio. Si la sílica en el ablandador es mayor de 10 mg/l entonces la alimentación de óxido de magnesio debe ser incrementada.

**3.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL  
 ABLANDADOR TIPO CAL -INTERCAMBIO IÓNICO A ALTAS  
 TEMPERATURAS CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL**

HORA MUESTREO	SILICE (SiO <sub>2</sub> )	ALC.TOT (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 1 (CaCO <sub>3</sub> )	pH	DUREZA 2 #1 (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 2 #2 (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 2 #3 (CaCO <sub>3</sub> )
8:00 DD1	5	10	8	9.75	1.5	1	2
9:00	< 5	22	6	9.35	0	0	1
10:00	10	0 *	16	8.97	5	4	5
11:30	15	0 *	36	8.9	10	11	10
12:00 DD2	5	8.31	10	9.7	2	2	1
13:00	< 5	20	8	9.8	1.5	1.5	1
14:00	10	0 *	14	9.2	5	5	5
15:00	15	0 *	30	8.91	9	12	10
16:00 DD3	5	8.35	11	9.7	2.5	2	1.5
17:00	< 5	25.1	7	10	1	0	0
18:00	10	0 *	15	8.96	5	3	5

Silíce en unidades de color; pH en unidades de pH; alcalinidad y dureza en mg/l.

DD1 después de dosificar carga # 1 Dureza 1: Dureza del efluente del tanque sedimentador

DD2 después de dosificar carga # 2 Dureza 2: Dureza de los tanques No. 1, 2 y 3 de intercambio iónico.

DD3 después de dosificar carga # 3

\* Valores obtenidos de alcalinidad: negativos.

**3.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL  
 ABLANDADOR TIPO CAL –INTERCAMBIO IÓNICO A ALTAS  
 TEMPERATURAS CON REGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL  
 CONTROLADA**

HORA MUESTREO	SILICE (SiO <sub>2</sub> )	ALC.TOT (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 1 (CaCO <sub>3</sub> )	PH	DUREZA 2 #1 (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 2 #2 (CaCO <sub>3</sub> )	DUREZA 2 #3 (CaCO <sub>3</sub> )
9:30	10	0 *	14	9.2	5	5	5
11:30	15	0 *	36	8.9	10	9	6
12:30	10	0 *	16	8.97	5	8	10
14:00	5	0 *	12	9.7	2.5	3	4
15:00	5	0	10	9.7	2	2	1
16:00	5	2	10	9.7	2	2	0
17:00	5	5	4	9.85	0	1	1
18:00	5	0	10	9.7	2	0	1.5
19:00	5	4	4	9.75	0	0	0
20:00	5	8	8	9.75	1.5	2	2
21:00	5	20	6	9.8	0	0	0
21:30	5	0 *	12	9.7	2.5	2	1.5
22:30	15	0 *	28	8.9	9	10	10

Dureza 1: Dureza del efluente del tanque sedimentador.

Dureza 2: Dureza de los tanques No. 1, 2, y 3 de intercambio iónico.

\* Valores negativos de alcalinidad, los cuales se interpretan como cero.

## APÉNDICE 4

### GRÁFICAS DE RESULTADOS

#### GRÁFICAS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL EN:

➤ EL TANQUE SEDIMENTADOR

FIGURA No. 13 DUREZA DEL AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

FIGURA No. 14 ALCALINIDAD OH EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

FIGURA No. 15 Ph EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

FIGURA No. 16 SILICE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

➤ LAS UNIDADES DE INTERCAMBIO IÓNICO

FIGURA No. 17 DUREZA DEL AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

#### GRÁFICAS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS CON RÉGIMEN DE ALIMENTACIÓN MANUAL CONTROLADA EN:

➤ EL TANQUE SEDIMENTADOR

FIGURA No. 18 DUREZA DEL AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

FIGURA No. 19 ALCALINIDAD OH EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

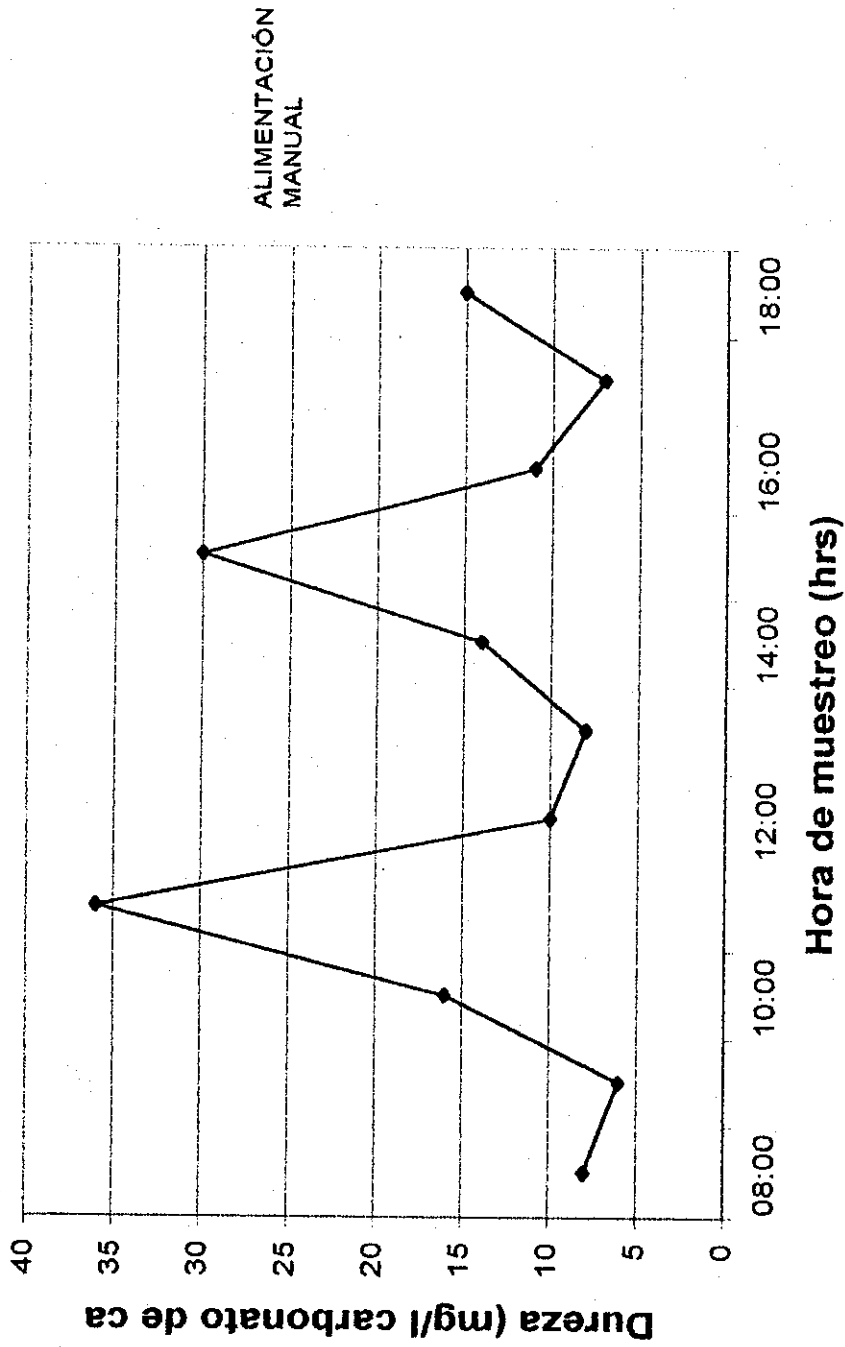
FIGURA No. 20 Ph EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

FIGURA No. 21 SILICE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

➤ LAS UNIDADES DE INTERCAMBIO IÓNICO

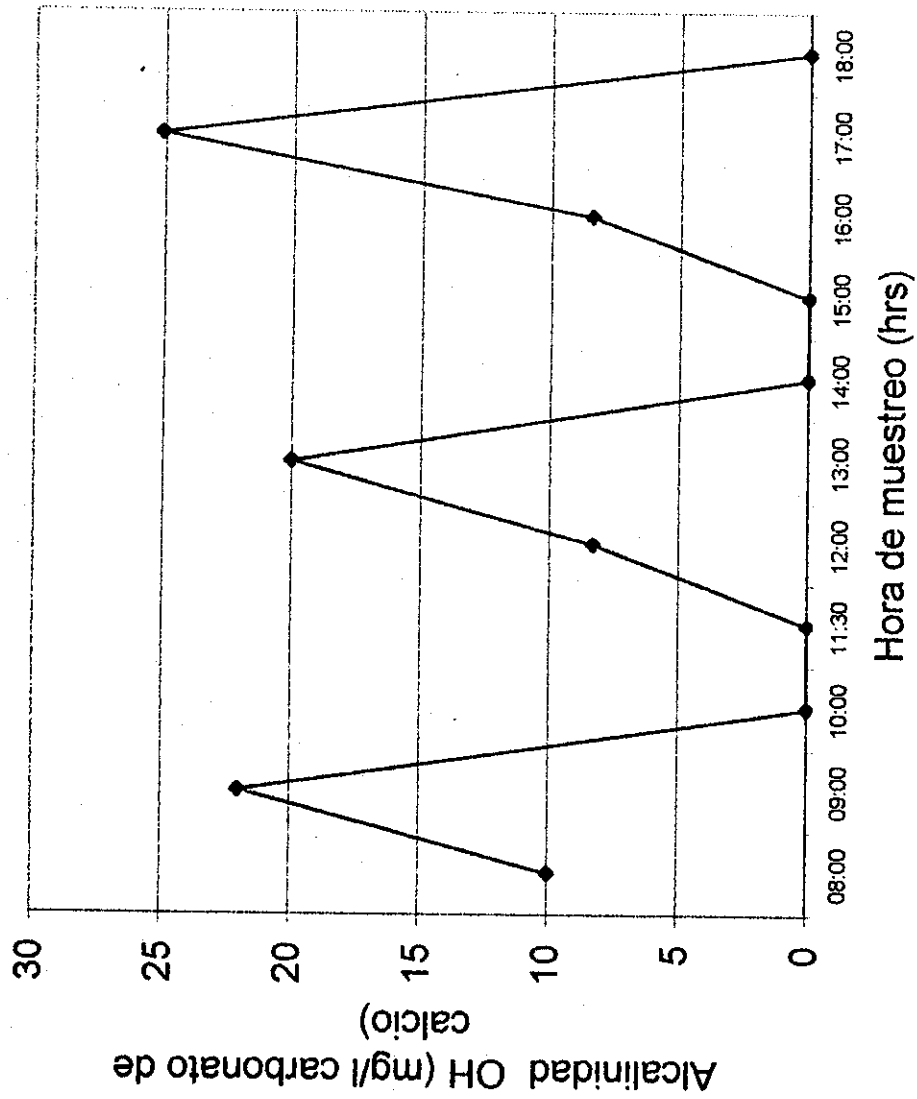
FIGURA No. 22 DUREZA DEL AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

**Dureza del agua en función del tiempo**  
**Figura No.13**



Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 10 PPM MAXIMO.

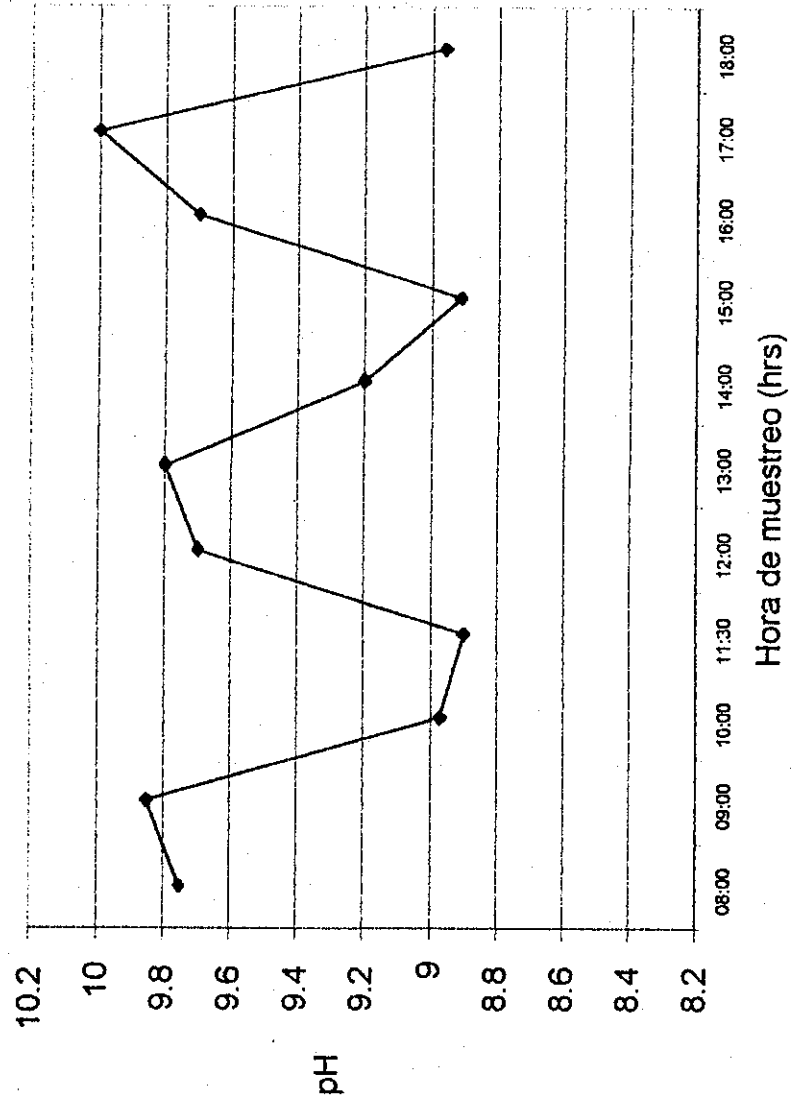
**Alcalinidad OH en función del tiempo**  
**Figura No. 14**



Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 0 - 8.5 PPM

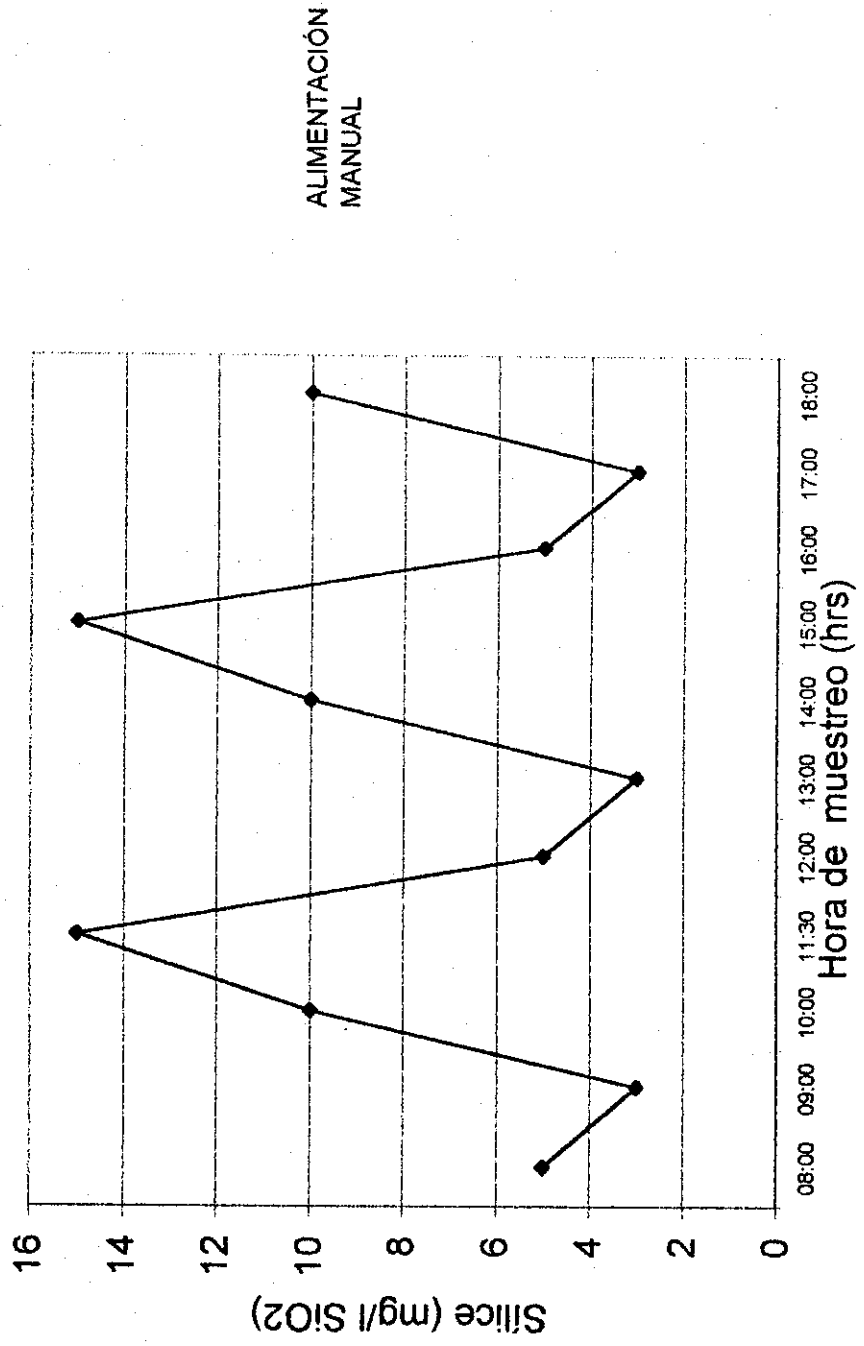


**pH en función del Tiempo**  
**Figura No. 15**



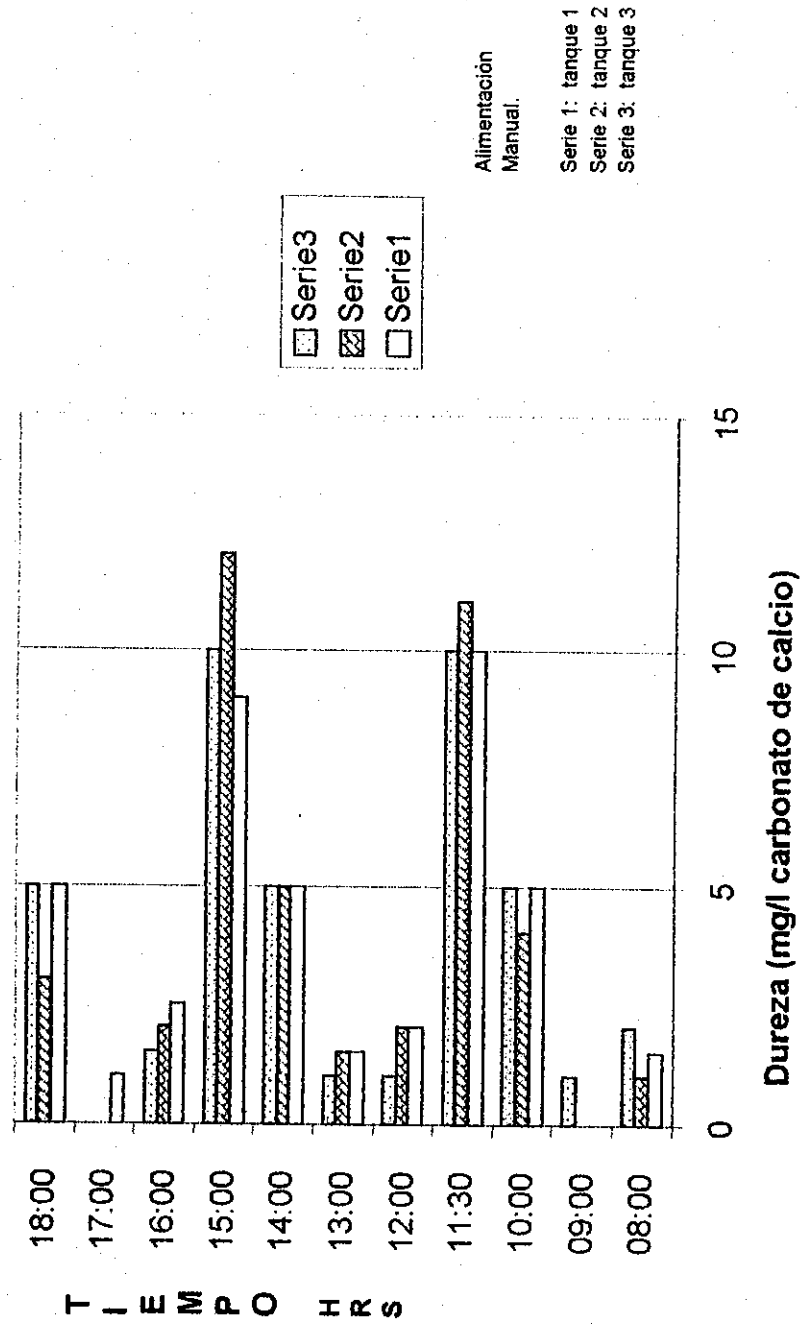
Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 9.7 A 10.0 UNIDADES.

Sílice en función del tiempo  
Figura No. 16



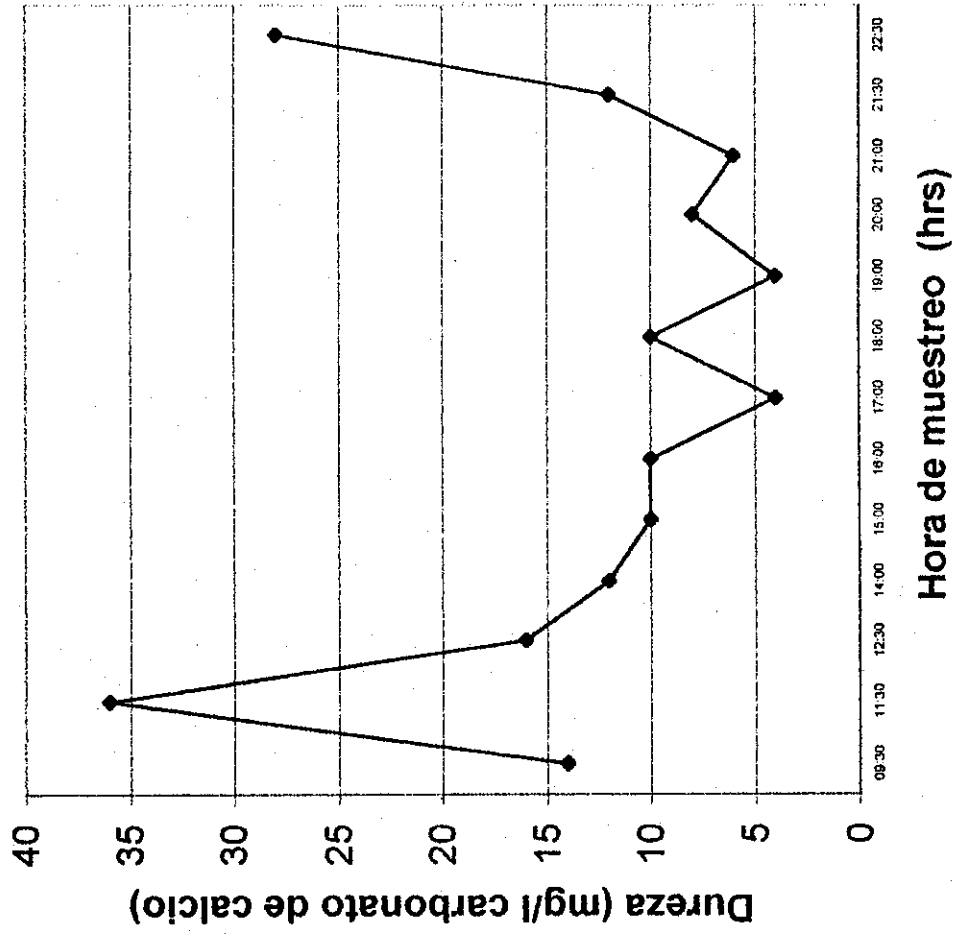
Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 5 mg/l

**Dureza del agua en función del tiempo**  
**Figura No. 17**



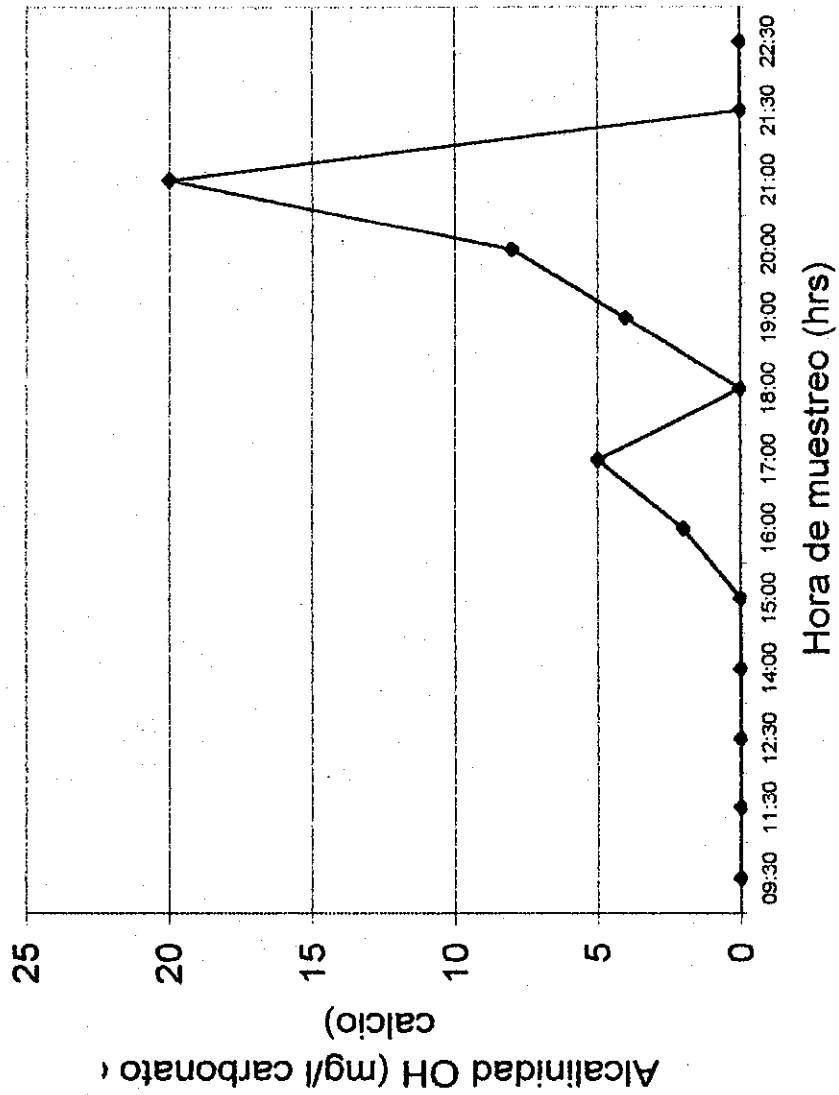
Efluente de los tanques de intercambio iónico. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
 Condiciones de dureza del agua requerida por la caldera: 0.0 a 5.0 mg/l

**Dureza del agua en función del Tiempo**  
**Figura No. 18**



Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
 NORMA: 10 mg/l MAXIMO.

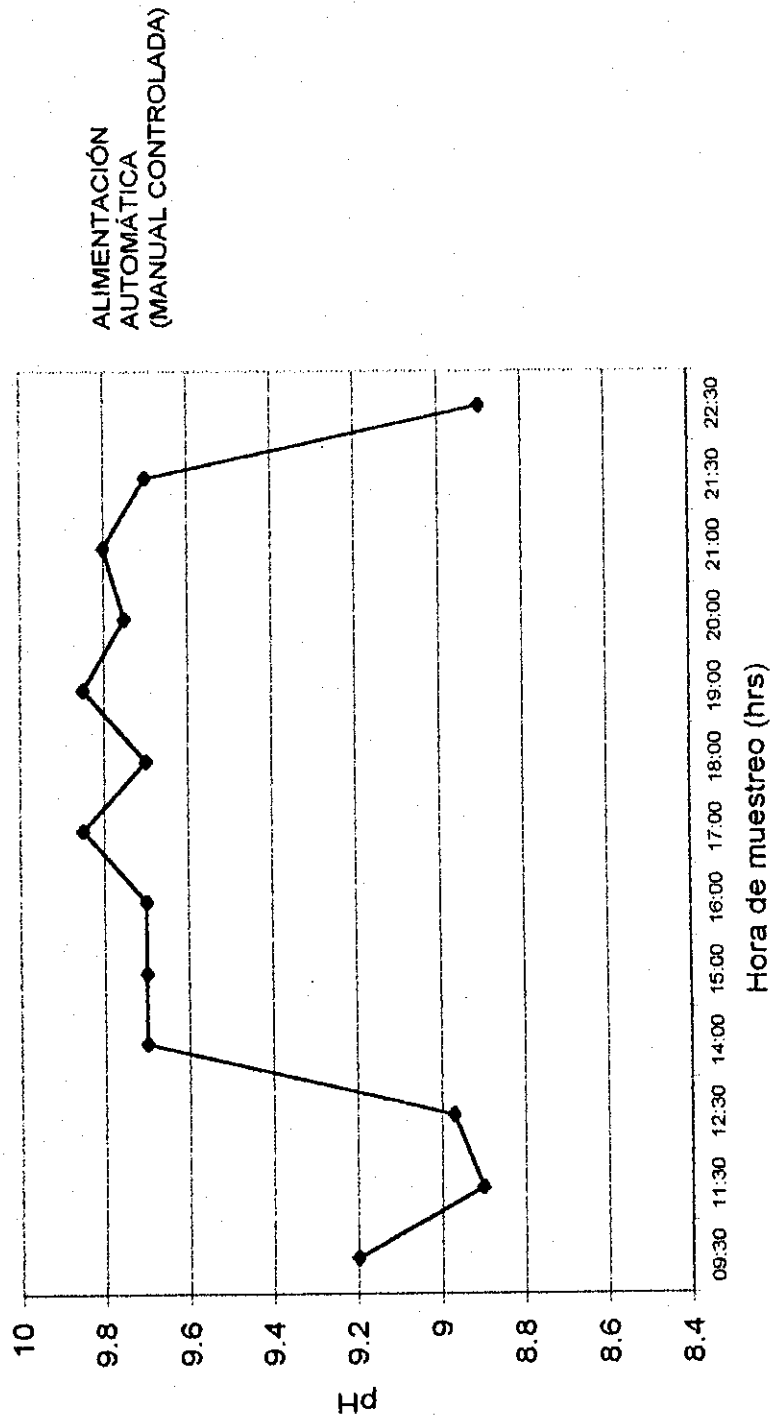
**Alcalinidad OH en función del tiempo**  
**Figura No. 19**



ALIMENTACIÓN  
AUTOMÁTICA  
(MANUAL CONTROLADA)

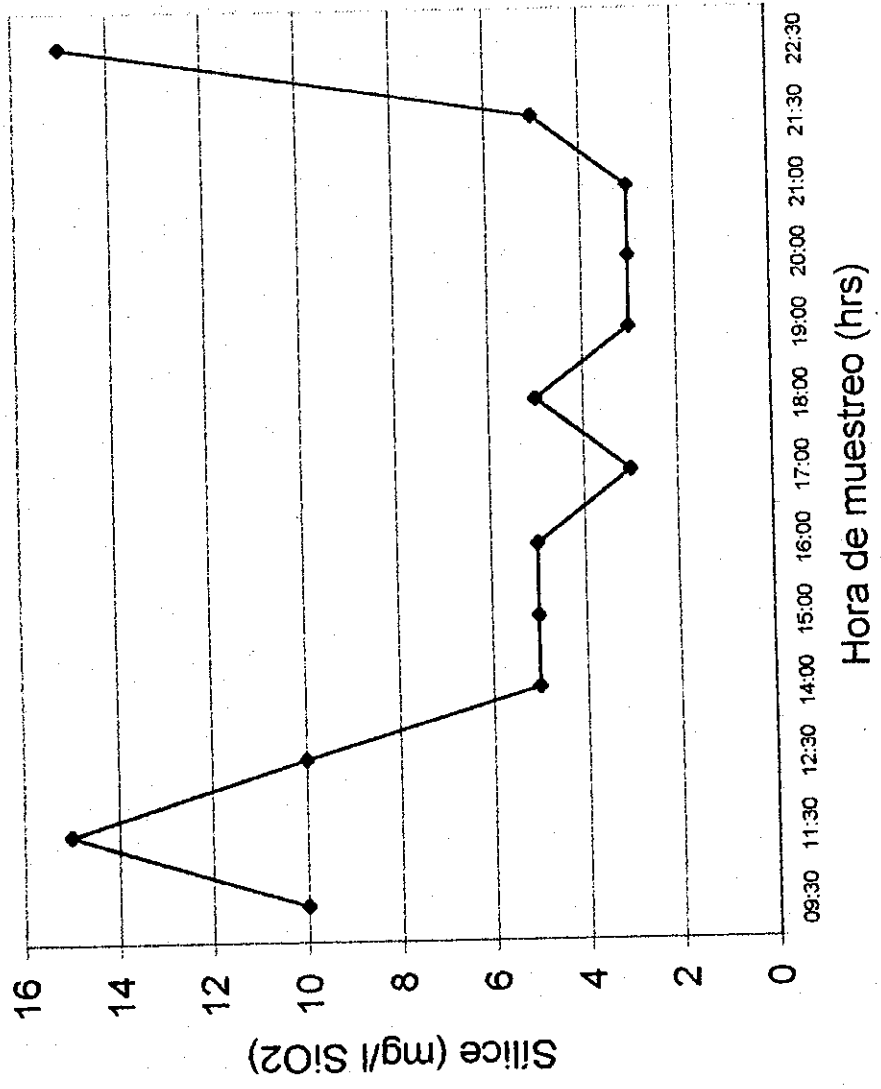
Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 0.0 - 8.5 mg/l.

**pH en función del tiempo**  
**Figura No. 20**



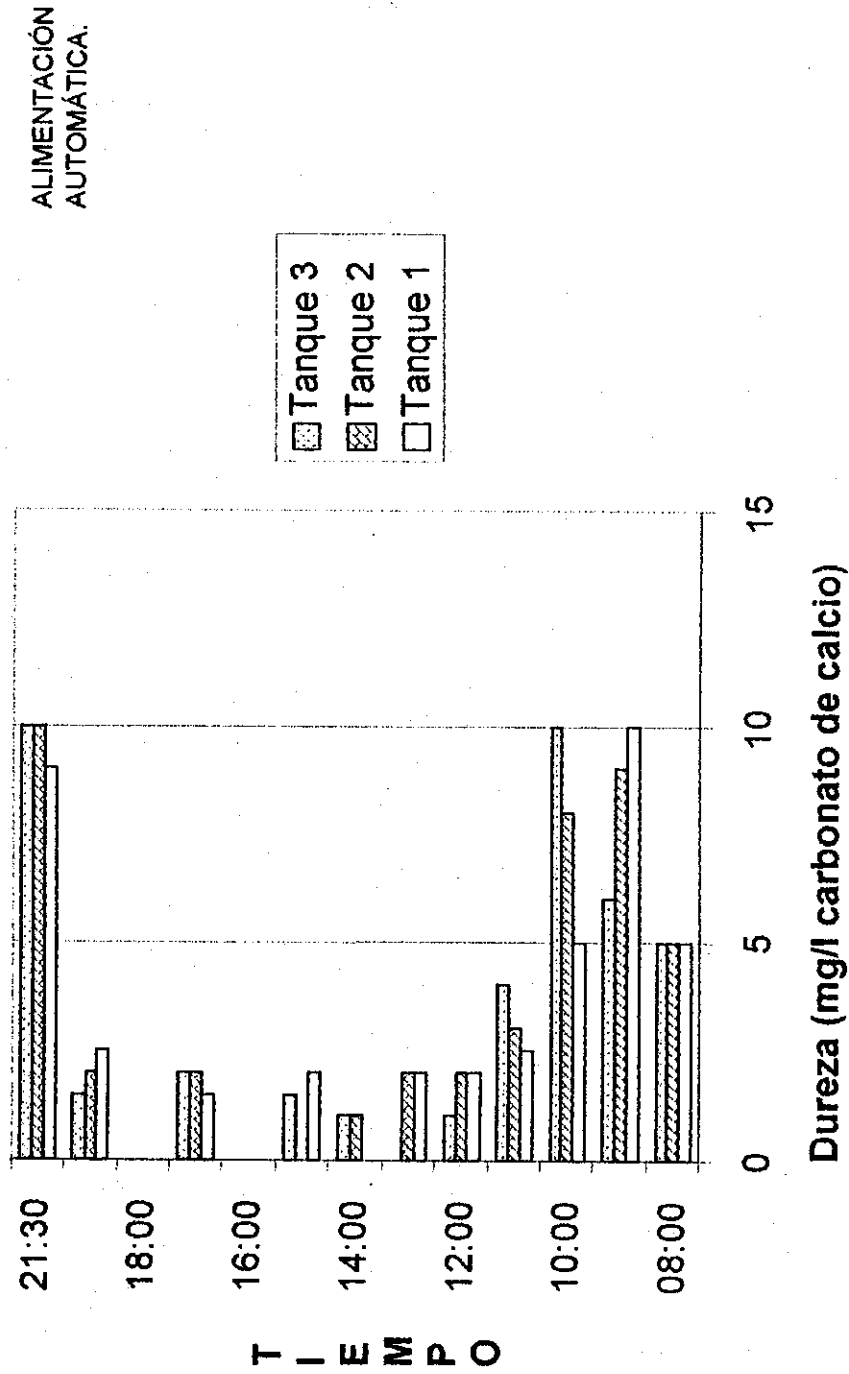
Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
 NORMA: 9.7 A 10.0 UNIDADES.

Sílice en función del Tiempo  
Figura No. 21



Efluente del tanque sedimentador. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
NORMA: 5 mg/l.

Dureza del agua en función del tiempo  
 figura No. 22



Efluente de los tanques de intercambio iónico. Agua blanda a 212 grados Fahrenheit.  
 Condiciones de dureza del agua para llenado de la caldera: 0.0 a 5.0 mg/l.



## APÉNDICE 5

### PRUEBAS PARA EL CONTROL DE LOS PARÁMETROS DEL AGUA BLANDA.

#### 5.1. TÉCNICA No. 1

#### DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD P

##### APARATOS Y REACTIVOS

- 1 bureta automática graduada de 20 ml
- 1 probeta graduada de 100 ml
- 1 cápsula de porcelana de 250 ml
- 1 agitador magnético
- 1 magneto
- 1 pinta de ácido hidrociorhídrico 30N
- 2 onzas de indicador de fenolftaleína (en frasco con gotero)

##### Procedimiento:

1. Colocar 100 ml de muestra del agua, medidos con la probeta graduada, en la cápsula de porcelana.
2. Agregar cinco gotas del indicador fenolftaleína.
3. Llenar la bureta con el ácido hidrociorhídrico 30N a la marca cero.
4. Agitar la muestra y titular hasta que el color rojo desaparezca. Tomar la lectura de ácido usado.
5. Conservar la solución para la lectura MO

##### REPORTAR:

Alcalinidad P (ppm  $\text{CaCO}_3$ ) = ml gastados de ácido x 16.7

## 5.2. TÉCNICA No. 2

### DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD M

#### APARATOS:

Los mismos que la alcalinidad P.

#### REACTIVOS:

1 pinta de ácido hidroclohídrico 30 N

2 onzas indicador naranja de metilo (en un frasco con gotero)

#### PROCEDIMIENTO:

1. A la solución resultante de la lectura P, agregarle tres o cuatro gotas de indicador naranja de metilo.
2. Empezar a titular lentamente con el ácido en la bureta en el punto que corresponde a la alcalinidad P, hasta que la solución se torne anaranjada o gris.

#### CALCULOS:

Alcalinidad M (ppm  $\text{CaCO}_3$ ) = ml totales gastados de ácido x 16.7

#### REPORTAR:

Alcalinidad OH (ppm  $\text{CaCO}_3$ ) =  $2P - M$

NOTA: La alcalinidad OH es cero si un valor negativo se obtiene al usar esta ecuación.

### 5.3. TÉCNICA No. 3

#### DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL

##### APARATOS Y REACTIVOS

- 1 probeta graduada de 20 ml
- 1 cápsula de porcelana de 250 ml
- 1 agitador magnético
- 1 magneto
- 1 cucharilla de 0.2 ml
- Indicador Negro de Ericromo T
- Solución EDTA 0.02 N
- Solución buffer pH = 10

##### PROCEDIMIENTO:

1. Medir 50 ml de la muestra a examinarse en la probeta graduada, y ponerlo dentro de la cápsula de porcelana. Agitar y agregar 8 gotas de buffer.
2. Dejar reposar la muestra por dos minutos.
3. Agregar una medida de indicador, agitar hasta que se mezcle por completo. Si la solución se torna roja, hay dureza presente.
4. Llenar la bureta con la solución EDTA a la marca 0.
5. Titular lentamente hasta que la muestra se torne azul.

##### REPORTAR:

Dureza total (ppm  $\text{CaCO}_3$ ) = ml gastados EDTA x 20

#### 5.4. TÉCNICA No. 4

### DETERMINACIÓN DE SILICE

#### APARATOS

- 1 comparador de color
- 1 disco de color, rango 0 – 120 ppm
- 2 tubos comparadores de 13 mm
- 1 probeta para el test de sílice
- 1 pizeta plástica de 250 ml
- 1 reloj

#### REACTIVOS:

- Solución ácida (botella sílice No. 1)
- Heptamolibdato (botella sílice No. 2)
- Sodio sulfito en solución (botella sílice No. 3)

#### PROCEDIMIENTO:

1. Agregar la muestra directamente a la probeta para el test de sílice, hasta la marca de "sample" (5 ml).
2. Adicionar la solución de sílice No. 1 hasta la marca 1 (5ml más).
3. Agregar ahora la solución sílice No. 2 hasta la marca 2 (5 ml más). Agitar y esperar dos minutos.
4. Agregar la solución de sílice No. 3 hasta la marca 3 (10 ml más) y agitar vigorosamente. Después de 5 minutos colocar la solución en un tubo comparador de 13 mm. El otro tubo comparador debe de contener agua desmineralizada; insertar ahora los tubos en el comparador colorimétrico. Siempre el tubo con la muestra irá a la derecha y el tubo con agua a la izquierda.

**REPORTAR:**

El resultado de la comparación colorimétrica es igual a ppm de sílice (SiO<sub>2</sub>). En caso de que el tono del color desarrollado por la muestra sea más oscuro del tono del disco, se hará necesario emplear una dilución al 50 %, ahora el resultado de la comparación colorimétrica se multiplica por dos y eso es igual a ppm de sílice (SiO<sub>2</sub>).

## 5.5. TÉCNICA No. 5

### REVISIÓN DEL NIVEL DE CAMA DE LODO

#### APARATOS:

2 probetas graduadas de 100 ml

1 reloj

#### PROCEDIMIENTO:

1. Tomar 100 ml de muestra en una probeta, de la válvula No. 2 de la sección cónica del ablandador.
2. Tomar 100 ml de muestra en una probeta, de la válvula No. 3 de la sección cónica del ablandador.
3. Dejar reposar durante 15 minutos.
4. El porcentaje de lodo por volumen se lee directamente de la probeta graduada y para la válvula # 2 no debe de haber más de 60 ml de lodo y para la válvula # 3 no más de 40 ml de lodo.
5. Si la lectura es mayor a estos valores, entonces aumentar la purga.