



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE
ALIMENTACIÓN DE CALDERAS DE LA EMPRESA
CONTRACHAPADOS DE ESMERALDAS S.A”**

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

JUAN JOSÉ DEMERA CHARCOPA

Riobamba – Ecuador

2013

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios Padre por darme la vida y guiar mi camino en cada paso, a mis Padres por ser los pilares en mi vida, a mis hermanos por alentarme en todo momento.

También agradezco a los Ingenieros César Ávalos y Marco Chuiza quienes han sido de gran ayuda tanto en mi formación profesional como en el desarrollo de este trabajo.

A los compañeros, amigos y docentes de la Facultad de Ciencias.

DEDICATORIA

*Al Amor, esfuerzo, dedicación y perseverancia de
mis padres, Ángel Demera y Jenny Charcopa.*

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERAS DE LA EMPRESA CONTRACHAPADOS DE ESMERALDAS S.A”, de responsabilidad del señor Juan José Demera Charcopa ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Silvio Álvarez DECANO FAC. CIENCIAS
Ing. Mario Villacrés DIRECTOR DE ESCUELA
Ing. César Ávalos DIRECTOR DE TESIS
Ing. Marco Chuiza MIEBRO DEL TRIBUNAL
Tec. Carlos Rodríguez DIRECTOR CENTRO DE DOCUMENTACIÓN
Nota de Tesis Escrita	

“Yo JUAN JOSÉ DEMERA CHARCOPA, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”

JUAN JOSÉ DEMERA CHARCOPA

INDICE DE ABREVIATURAS

A	Área del filtro
A_0	Tasa media de filtración
$ALC.$	Alcalinidad
A_{MF}	Área total de filtración
β	Resistencia específica del medio filtrante.
$C.E$	Conductividad eléctrica
d	Diámetro del tanque
DT	Dureza total
Fe	Hierro
Ft^3	Pie cúbico
$\frac{gal}{h}$	Galón por hora
h_T	Altura del tanque
h_{TS}	Altura del tanque de salmuera
K	Constante
	kg/h Kilogramo por hora
L	Espesor de la torta
L_{AB}	Longitud del ablandador
$\frac{lb}{h}$	Libra por hora
	m^3 Metro cúbico
	m^3/h Metro cúbico por hora
	mL Mililitro
	min Minuto
NTU	Unidades nefelométricas de turbiedad
O.D	Oxígeno disuelto
	$^{\circ}C$ Grado centigrado
P	Presión de trabajo

pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
	Q Caudal
	Q_L Caudal de lavado
	$Q_{tratamiento}$ Caudal de tratamiento
Si	Sílice
STD	Sólidos totales disueltos
T_{RA}	Tiempo de residencia en el ablandador
$TURB.$	Turbidez
	μ Viscosidad dinámica
	$\mu S/cm$ Microsiemens por centímetro
	V Volumen del tanque
	V_{AB} Volumen del ablandador
	v_L Velocidad de lavado
V_L	Volumen de lavado
V_F	Tamaño de los filtros
V_{TS}	Tamaño del tanque de salmuera
	V_R Volumen de resina en el ablandador
α	Resistencia específica de la torta
θ	Tiempo de filtración
	θ_L Tiempo de lavado

TABLA DE CONTENIDOS

Pp:

PORTADA	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
HOJA DE FIRMAS	
HOJA DE RESPONSABILIDAD	
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	
TABLA DE CONTENIDOS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE GRÁFICOS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii
ANTECEDENTES.....	iv
JUSTIFICACIÓN.....	v
OBJETIVOS.....	vi
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1 AGUAS INDUSTRIALES.....	19
1.1.1 FUENTES SUPERFICIALES.....	19
1.1.2 FUENTES SUBTERRÁNEAS.....	20
1.1.3 TIPOS DE AGUAS.....	22
1.1.4 USOS INDUSTRIALES DEL AGUA.....	22
1.1.5 CONTROL QUÍMICO DEL AGUA.....	24
1.2 PROBLEMAS CAUSADOS POR EL AGUA EN CALDERAS.....	30
1.2.1 ARRASTRE.....	30
1.2.2 ESPUMEO.....	31
1.2.3 CORROSIÓN.....	32
1.2.4 INCRUSTACIONES.....	36
1.3 TRATAMIENTO DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR.....	38
1.3.1 PREPARACIÓN DEL AGUA BRUTA.....	39
1.3.2 TRATAMIENTO EXTERNO PARA AGUAS DE CALDERAS.....	47

1.3.3TRATAMIENTO INTERNO PARA AGUAS DE CALDERAS.....	57
1.4PURGAS.....	63
1.5ÍNDICE DE ESTABILIDAD.....	64
2. PARTE EXPERIMENTAL	66
2.1MUESTREO.....	67
2.2METODOLOGÍA.....	68
2.2.1MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	70
2.3DATOS EXPERIMENTALES.....	86
2.3.1DIAGNÓSTICO.....	86
2.3.2DATOS.....	89
2.3.3PARÁMETROS FUERA DE NORMA.....	95
2.4 DATOS ADICIONALES.....	97
3. CÁLCULOS Y RESULTADOS	98
3.1CÁLCULOS.....	99
3.1.1BALANCE DE MASA PARA LAS CALDERAS.....	99
3.1.2OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERAS.....	103
3.1.3DISEÑO DE UN SEGUNDO ABLANDADOR PARA EL SISTEMA.....	112
3.2RESULTADOS.....	121
3.3 PROPUESTA.....	124
3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	125
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
4.1. CONCLUSIONES.....	129
4.2. RECOMENDACIONES.....	130
BIBLIOGRAFÍA	131
ANEXOS.....	133

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.2.4. 1 Relación entre depósitos y % de pérdida de combustible.....	38
Tabla 1.3.3. 1 Contenido de ácido y fosfato de los fosfatos de sodio.....	59
Tabla 1.3.3.3. 1 Reacción entre oxígeno y sulfito de sodio.....	61
Tabla 1.4. 1 Índice de Riznar.....	65
Tabla 2.2.1.2.3. 1 Soluciones stock para determinación de oxígeno-Disuelto.....	75
Tabla 2.2.1.2.5. 1 Relación de la alcalinidad.....	78
Tabla 2.2.1.1. 1 Descripción de los Métodos de Análisis.....	70
Tabla 2.3.2. 1 Análisis físico-químico del agua del río.....	89
Tabla 2.3.2. 2 Análisis físico-químico del agua potable.....	90
Tabla 2.3.2. 3 Análisis físico-químico del agua ablandada.....	91
Tabla 2.3.2. 4 Análisis físico-químico del agua de alimentación.....	92
Tabla 2.3.2. 5 Análisis físico-químico del condensado.....	93
Tabla 2.3.2. 6 Análisis físico-químico del agua de la purga.....	94
Tabla 2.4. 1 Datos adicionales.....	97
Tabla 3.1.2.1.3. 1.- Prueba 1 de ablandamiento y regeneración.....	105
Tabla 3.1.2.1.3. 2 Prueba 2 de ablandamiento y regeneración.....	105
Tabla 3.1.2.1.3. 3 Prueba 3 de ablandamiento y regeneración.....	105
Tabla 3.1.2.1.3. 4 Valor promedio ablandamiento y regeneración.....	106
Tabla 3.1.2.1.8.1 Pruebas de dosificación de dispersante NALCO 22300 en alimentación.....	109
Tabla 3.1.3.1.1 Simulación de filtración.....	112
Tabla 3.1.3.13. 14 Parámetros de diseño para el sistema de filtración.....	118
Tabla 3.1.3.2.1 Parámetros de Diseño de un Filtro de Zeolitas.....	120
Tabla 3.2. 1 Caracterización final del agua.....	121
Tabla 3.2. 2 Caracterización del agua del ablandador.....	122
Tabla 3.2. 3 Caracterización final del agua de alimentación.....	122
Tabla 3.2. 4 Caracterización final del condensado.....	123
Tabla 3.2. 5 Caracterización final de la purga.....	124

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.3.3. 1 Parámetros fuera de norma agua de alimentación.....	95
Gráfico 2.3.3. 2 Parámetros fuera de norma condensado	96
Gráfico 2.3.3. 3 Parámetros fuera de norma en agua de purga.....	97
Gráfico 3.1.2.1.3. 1 Dureza final vs concentración NaCl.....	106
Gráfico 3.1.2.1.8. 1 Dureza removida vs ppm NALCO 22300.....	109
Gráfico 3.2. 1 Agua del ablandador.....	122
Gráfico 3.2. 2 Agua de alimentación	123
Gráfico 3.2. 3 Agua de condensado.....	123
Gráfico 3.2. 4 Agua de purga.....	124

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1.2.2.2.1.1 Dinámica del proceso de ablandamiento y regeneración	51
--	----

INDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1 Caldero Bremer HBFS 6.5	134
Anexo N° 2 Incrustaciones del caldero Bremer	134
Anexo N° 3 Parámetros de la calidad del agua	135
Anexo N° 4 Catálogo resina Purolite C-100	136
Anexo N° 5 Sistema de ablandamiento.....	137
Anexo N° 6 Pruebas de dureza luego de optimización	137
Anexo N° 7 Diagrama potabilización - ablandamiento	138
Anexo N° 8 Diagrama distribución de vapor	139
Anexo N° 9 Diagrama retorno de condensados	140
Anexo N° 10 Costos por Productos Químicos.....	141
Anexo N° 11 Verificación de purgas	142

RESUMEN

La optimización del tratamiento del agua de alimentación de calderas de la Empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A, de la ciudad de Esmeraldas tiene como finalidad cumplir con todos los parámetros exigidos por normas técnicas de calderas.

El método experimental fue utilizado para la investigación con fines evaluativos, para el análisis del agua alimentación de calderas se realizaron mediciones in situ y en el laboratorio de la empresa utilizando equipos como: conductímetro, pHmetro, termómetros, colorímetros. Las técnicas y material de laboratorio se basaron en métodos normalizados de la American Society For Testing And Materials(ASTM) y los Standard Methods (SM).

La regeneración de la resina utilizada en el ablandador con el uso de cloruro de sodio al 20% en solución, tiempo entre regeneraciones cada dos días, aplicación estricto de purgas y reducción de dureza mediante el uso del producto químico Nexguard 22300 fueron variables claves para mejorar la calidad del agua.

Como resultado la dureza pasó de 12,6ppm a 0,5 ppm cuyo valor es corregido hasta un valor de cero mediante la adición de Nexguard 22300, la cantidad de sólidos totales disueltos pasan de 255,83ppm a 100ppm, mientras la conductividad pasa de 511,67 μ S/cm a 200 μ S/cm.

Como conclusión, la calidad del agua de alimentación de calderas optimizada cumple con los parámetros que exige la norma del catálogo. Se recomienda el control diario de parámetros del agua, la aplicación de purgas necesarias, la dosificación correcta de productos químicos y la regeneración con solución de cloruro de sodio al 20% para mejorar el ablandamiento.

SUMMARY

The optimization in treatment of boiler supply water in Plywood Company of Esmeraldas S.A in Esmeraldas city is intended to fulfill the parameters required by technical standards boilers.

The experimental method was used for research evaluation purposes, for the analysis of boiler supply water in situ measured was used and in the laboratory of the company using equipment like: conductivity meter, pH meter, thermometers and colorimeters. The laboratory techniques and materials were based on standard methods of the American Society for Testing and Materials (ASTM) and the Standard Methods (SM).

Regeneration of the resin used in the softening with the use of sodium chloride to 20% solution, time between regenerations every two days, strict application of purges and hardness reduction by the use of the chemical Nexguard 22300 were key variables to improve water quality.

As a result hardness changed from 12.6ppm hardness 0.5ppm whose value is corrected to a value of zero by adding Nexguard 22300, the amount of total dissolved solids pass from 255.83ppm to 100ppm, while the conductivity passes from 511.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

In conclusion, the quality of boiler supply water optimized parameters meet the requirements defined in the catalog. Daily control is recommended in water parameters, necessary purges applying the correct dosage of chemicals and regeneration with sodium chloride solution to 20% to improve the softening.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua con la cual se va a alimentar a una caldera es de vital importancia para toda empresa que requiere de este equipo generador de vapor, ya que de este modo se reducen las afectaciones por procesos corrosivos e incrustantes causados por el agua.

Este trabajo de investigación fue realizado en las instalaciones de la empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A., que cuenta con dos calderas como son la caldera Siller y la caldera Bremer, esta última presenta problemas de incrustaciones. La empresa cuenta con un sistema de potabilización de agua, un tanque ablandador de agua en cuyo interior contiene zeolita de alta capacidad como es la zeolita Purolite C-100 que permite la reducción sustancial de la dureza del agua que posteriormente será mezclada con el condensado recuperado del sistema para luego ser bombeado hacia los tanques de alimentación de las calderas. En este punto se da un tratamiento químico al agua de alimentación usando secuestrantes de oxígeno, reguladores de pH e inhibidores de dureza.

La optimización del tratamiento del agua de alimentación de las calderas pretende mejorar los parámetros del agua que estén fuera de rango que puedan afectar las estructuras de las calderas y su vez el normal funcionamiento de las mismas, reduciendo de este modo costos de mantenimiento y prolongando la vida útil de estos equipos generadores de vapor. Para la realización de esta optimización se utilizó el método experimental para evaluar y mejorar la calidad del agua en distintos puntos como son; agua ablandada, condensados, agua de alimentación y agua de purga, además mejorar la regeneración, ablandamiento y administración de productos inhibidores de incrustaciones. Con todo lo mencionado anteriormente se pudo llegar a los puntos de control deseados del agua de alimentación.

ANTECEDENTES

El grupo "PELIKANO" del Ecuador es la agrupación de las empresas Novopan, Contrachapados de Esmeraldas S.A (CODESA) y Plywood dedicadas a la fabricación de tableros aglomerados y contrachapados. CODESA utiliza como materia prima madera de la zona norte de la provincia de Esmeraldas, la cual es transportada hasta las instalaciones de la planta para su debido proceso de transformación.

Esta empresa cuenta con su propio sistema de tratamiento de agua que cumple con dos funciones; la primera es potabilizar el agua tomada del Río Esmeraldas abasteciendo de agua potable a la planta, oficinas administrativas, comedor y villas propias de la empresa. La segunda función es proveer agua de alimentación a las calderas para la generación de vapor, al pasar a través de un ablandador una vez que ha pasado por el proceso de potabilización, para posteriormente ser mezclada con el condensado. Así mismo se usan productos químicos en el agua de alimentación de calderas como inhibidores de corrosión, secuestrantes de dureza y reguladores de pH.

La empresa cuenta con dos calderos el caldero Bremer y el caldero Siller, ambos usan madera como combustible y son alimentados con la misma calidad de agua.

El caldero Bremer de la empresa es de fabricación brasilera, éste usa como combustible madera proveniente de los rechazos generados a lo largo de los diferentes procesos siendo que el vapor generado permite el funcionamiento de los procesos de secado, prensa y maceración. En la actualidad esta caldera presenta problemas de incrustaciones, lo que disminuye la calidad de vapor deseada afectando de este modo los procesos que dependen del vapor, aumentando costos de mantenimiento de la caldera.

JUSTIFICACIÓN

La importancia que representa para una empresa tener su propio equipo de generación de vapor y por tanto un tratamiento adecuado de agua para la alimentación de la caldera implica el tener en óptimas condiciones los parámetros del agua que puedan llegar a afectar el correcto funcionamiento del equipo generador de vapor, es decir que un correcto tratamiento de agua puede derivar en el aumento de la eficiencia de la caldera, aumento del tiempo de vida útil de la misma y reducción de costos de mantenimiento.

La empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A cuenta con su propio sistema de tratamiento de agua para la alimentación de la caldera, pero este tratamiento no es eficiente debido a que la caldera Bremer presenta gran cantidad de incrustaciones alrededor de los tubos donde se da la transferencia de calor, lo que trae como consecuencia la disminución de eficiencia, mayor consumo de combustible y costos de mantenimiento.

Este proyecto tiene como finalidad mejorar la calidad del agua de alimentación de la caldera de la empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A. mediante la optimización de su sistema de tratamiento de agua, de modo que todos los parámetros del agua que puedan afectar a la caldera queden dentro de las especificaciones técnicas correspondientes.

Por todas las razones antes mencionadas se justifica la realización del presente trabajo, que permitirá dar solución a la problemática existente.

OBJETIVOS

GENERAL

Optimizar el sistema de tratamiento del agua de alimentación de calderas de la Empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A.

ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del sistema de tratamiento del agua para la alimentación de la caldera.
- Identificar variables del proceso que permitan mejorar la calidad del agua de alimentación de la caldera.
- Realizar la caracterización físico-química del agua para alimentar calderas a la salida del sistema de tratamiento después de la optimización.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I

1.1 AGUAS INDUSTRIALES

Son aguas de proceso que por sus propiedades físico-químicas pueden ser utilizadas en la industria ya sea como solvente, agente de reacción química, como medio de fabricación ya sea en fase líquida o de vapor, así por ejemplo; generación de vapor para producir energía eléctrica, fluido de lavado, como fluido de enfriamiento. La decisión para elegir una fuente de agua como abastecimiento depende de calidad, cantidad, seguridad del abastecimiento, costos de construcción y operación.

Las fuentes de agua se pueden clasificar en dos tipos:

1.1.1 FUENTES SUPERFICIALES

El abastecimiento de agua para uso público por lo general viene de fuentes superficiales, ya sean estos lagos, ríos, manantiales, que requieren un tratamiento para mejorar su calidad.

Ríos.- Son las fuentes de agua que requieren mayor énfasis en su tratamiento, ya que la contaminación, la temperatura del agua y el contenido de sales varían continuamente. Este tipo de fuente se prefiere cuando no se puede encontrar agua con mejor calidad o facilidad. Se puede anotar que esta fuente es más económica que el agua de embalses ya que requiere menor inversión en infraestructura.

Lagos.- Son capaces de proporcionar agua de buena calidad en la parte central de los mismos, no así en sus riveras, estas aguas requieren un tratamiento mínimo, su composición es uniforme de un día a otro, su variación de temperatura es mínimo y la cantidad de agua que proporcionan estos cuerpos de agua es satisfactoria ya que

continuamente se están regenerando. La única desventaja es que ocasionalmente el lago usado como fuente de abastecimiento también es usado para la descarga de aguas, lo que implica un aspecto importante para tomar en cuenta el punto de la toma.

Embalses.- requieren inversiones considerables para la construcción de los mismos, la cantidad de agua está sujeta a variaciones diarias y durante todo el año. Estas aguas pueden presentar olores y sabores que se deben a la presencia de algas. Los embalses son utilizados para almacenar agua durante todo el año para ser utilizada especialmente en épocas de estiaje, los embalses presentan ventajas como la sedimentación del agua retenida, lo que disminuye la turbidez de la misma, además de la disminución de la población bacteriana.

1.1.2 FUENTES SUBTERRÁNEAS

Este tipo de fuentes, por las cantidades pequeñas de agua se usa generalmente en comunidades pequeñas. El agua procedente de este tipo de fuente presenta una dureza generalmente alta por el arrastre de minerales en el lecho subterráneo.

Las aguas subterráneas presentan mayor facilidad de tratamiento ya que generalmente la cantidad de impurezas es menor ya que el agua se autodepura al atravesar las diferentes capas del suelo. Así tenemos:

Pozos poco profundos.- Son aquellos cuya profundidad no supera los 30 metros y generalmente son cavados o entubados. Los que son cavados presentan un diámetro entre 1,20 y 1,80 metros y son llevados desde la superficie hasta el manto acuífero, estos pozos son recubiertos de hormigón o ladrillo para evitar infiltraciones hacia la superficie. Para el

caso en que el agua subterránea se encuentra a una profundidad de 7,5 metros o menos se prefiere entubarla mediante un tubo de hierro con una coladera de latón.

Pozos profundos.- Son aquellos cuya profundidad es mayor a los 30 metros, es decir que el agua se encuentra en estratos profundos por lo que es necesario la perforación del pozo a través de las formaciones rocosas superficiales. Estos pozos presentan un diámetro entre 15 a 30 centímetros, generalmente protegidos con recubrimientos metálicos que evitan la introducción de aguas superficiales, se usa una coladera en el pozo cuando el agua contenida en el manto acuífero presenta gran cantidad de grava y arena.

Manantiales.- Generalmente aparecen cuando el estrato que conduce agua llega a la superficie, es decir que el agua subterránea es forzada a salir por medio de las fisuras de las rocas. Cuando se usa agua de manantiales como fuente se debe tratar en lo posible que dicha agua no se contamine o entre en contacto con aguas superficiales que disminuyen la calidad de la misma por ello es importante proteger el manantial con una estructura impermeable que generalmente es concreto.

Las operaciones industriales no pueden llevarse a cabo sin el suministro de agua de buena calidad según los requerimientos del proceso, es así que diferentes procesos requieren de diferentes calidades o especificaciones del agua utilizada en el mismo.

El agua tratada que satisface las necesidades municipales no es en la mayoría de los casos adecuada para ser utilizada en procesos industriales, es decir que si bien el suministro de agua para una industria proviene de la red municipal con ciertas especificaciones aproximadas es conveniente darle un tratamiento adicional de modo que cumpla con los requerimientos del proceso en el cual va a ser utilizada.

1.1.3 TIPOS DE AGUAS

La cantidad y tipos de componentes presentes en el agua en forma de sales determinan el tipo de agua dentro de las cuales tenemos:

Aguas Duras.-Estas poseen compuestos de calcio y magnesio en forma de sales que tiene la característica principal de ser poco solubles y son considerados como los principales responsables de la formación de incrustaciones en las superficies donde se da la transferencia de calor.

Aguas Blandas.-Estas tienen una composición con porcentaje menor de sales de calcio y magnesio que poseen gran solubilidad.

Aguas neutras.-Por su composición característica de alta concentración de sulfatos y cloruros no causan mayor alteración del valor del pH.

Aguas alcalinas.-Estas presentan en su composición cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio, la presencia de estas sales hacen al agua elevar el valor de pH.

1.1.4 USOS INDUSTRIALES DEL AGUA

Las aplicaciones del agua a nivel industrial son variadas y dependen de la industria a la cual se haga referencias, así por ejemplo, el agua puede utilizarse en procesos de generación de vapor, enfriamiento, transporte, lavado, calentamiento, etc.

1.1.4.1 Transferencia de calor

El agua es utilizada esencialmente en procesos de calentamiento o enfriamiento a nivel industrial para aprovechar la gran capacidad calorífica de este fluido. Para el proceso de

calentamiento se usa el agua en estado de vapor, que es generado mediante calderas y fluye a altas velocidades y presiones a través de los recipientes donde se da la transferencia de calor entre el fluido caliente y el fluido frío.

En los procesos de enfriamiento el agua fluye en forma líquida para absorber calor procedente de los fluidos calientes con lo que intercambia calor.

1.1.4.2 Generación de energía

El agua transformada en vapor en las plantas especializadas en estos procesos pasa a través de diferentes etapas donde el vapor genera electricidad a partir del movimiento de turbinas de vapor que conectados a los respectivos turbogeneradores son capaces de generar campos eléctricos y direccionarlos a un sistema eléctrico.

Otra forma de generar energía a partir del agua es el uso de mecanismos como ruedas hidráulicas que aprovechan al movimiento natural del agua en la superficie de cuerpos de aguas como ríos, mares, etc., que permiten mover dichos mecanismos y a través de su movimiento aprovechar la energía producida.

1.1.4.3 Transporte

Al igual que las corrientes naturales de agua que pueden arrastrar sólidos en suspensión, las aguas que fluyen en el interior de las tuberías de una industria pueden cumplir con una acción similar llevando materiales de una zona a otra según sean los requerimientos. Por ejemplo en las industrias de alimentos, plantas enlatadoras, ingenios azucareros, etc.

Otro ejemplo de transporte es en el caso de los procesos de destilación por arrastre de vapor en que las burbujas de vapor de un recipiente producen una mezcla de vapor con el

líquido orgánico que contenga dicho recipiente, como en el caso de la industria de los hidrocarburos.

1.1.4.4 Lavado

El uso del agua resulta un método adecuado y económico en el caso del lavado de los equipos en una industria, ya que al lavar un equipo permite precautelar la integridad de los equipos de proceso, la seguridad de los trabajadores y evita la contaminación de los productos.

Se conocen tres tipos de métodos de lavado, lavado por dilución como en el caso de la industria galvanoplástica en la que los objetos se sumergen en tanques de diferentes soluciones pasando por enjuagues intermedios para evitar la contaminación de los demás tanques, lavado por desplazamiento como en el caso de la industria del papel en la que se elimina el licor residual de la pulpa cruda y lavado por extracción como en el caso de la industria petrolera para reducir el contenido de sales disueltas en el crudo que favorecen la corrosión, el agua se inyecta en relación del cuatro por ciento del flujo de crudo.

Existen muchas otras aplicaciones del agua a nivel industrial, dichas aplicaciones dependen del tipo de procesos que se lleve a cabo en el interior de dichos complejos.

1.1.5 CONTROL QUÍMICO DEL AGUA

El control continuo del agua tratada que va a alimentar la caldera es de vital importancia para reducir los efectos sobre la caldera que puede tener la variación de la composición del agua. El número mínimo de análisis químicos que debe realizarse al agua de alimentación de la caldera depende de la relación del agua y del condensado que se aporta a la alimentación, dentro de los análisis requeridos tenemos:

1.1.5.1 pH

El pH constituye una propiedad del agua que expresa cantidades relativas de iones H^+ y OH^- , es decir, permite conocer el carácter ácido o básico de la misma. Un valor de pH 7,0 expresa neutralidad, con valores de pH menores a 7,0 el agua se torna ácida y a pH mayores a 7,0 se torna alcalina.

Es importante el control del pH del agua destinada a la caldera, ya que el agua con un pH menor de 7,0 tiende a ser más corrosiva que una que tiene un pH mayor de 7,0. Por otra parte conforme aumenta el pH del agua, aumenta la tendencia para formar incrustaciones.

1.1.5.2 ALCALINIDAD

La alcalinidad se define como la capacidad que tiene el agua para absorber o neutralizar un ácido. A mayor alcalinidad, mayor capacidad de neutralizar un ácido. El agua pura tiene una alcalinidad muy baja y poca capacidad neutralizadora.

La alcalinidad manifiesta la presencia de iones bicarbonato y carbonato de hidroxilo. Cuando el pH del agua es superior a 10,5, se manifiesta un valor muy alto de alcalinidad que no es recomendable en el agua de alimentación de calderas, ya que esto trae como consecuencia la formación de espumas y alta cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en el vapor, el mismo que provoca corrosión en las tuberías de vapor y condensado.

1.1.5.3 CONDUCTIVIDAD

La conductividad permite determinar la cantidad de sólidos disueltos presentes en una muestra de agua, es decir que no mide la presencia de iones en forma particular, sino que constituye la concentración total de iones.

El control de la conductividad del agua de la caldera es importante ya que permite establecer un método de control de purga efectivo, dando una idea aproximada de la totalidad de sólidos disueltos.

1.1.5.4 TURBIDEZ

Permite conocer la obstrucción óptica que impide o limita el paso de una fuente de luz a través de una muestra de agua que usualmente es debida a la presencia de materiales en suspensión que se encuentran en forma de partículas muy finas como arcillas, lodos muy finos, materia orgánica, entre otros.

Las aguas para uso industrial deben tener muy poca o ninguna turbidez, especialmente en el agua de alimentación de calderas ya que esta materia en suspensión se decanta como lodo sobre los tubos de la caldera provocando recalentamiento y corrosión debajo de los depósitos.

La turbidez puede disminuir con dejar el agua en reposo por un cierto tiempo, pero, por lo general es más eficiente la clarificación mecánica o química y la filtración.

1.1.5.5 SÓLIDOS DISUELTOS

Representa a todas las impurezas que se encuentran disueltas en el agua y que no pueden ser retenidos por los filtros, sin importar lo fino que sean. Como ejemplo de sólidos disueltos se pueden citar; sílice, hierro, calcio, magnesio, cloruros, sodio, sulfato. La cantidad de sólidos disueltos que tiene el agua determina el uso y reutilización de la misma, una cantidad alta de estos sólidos causa problemas de contaminación del vapor y arrastre.

1.1.5.6 DUREZA

El grado de dureza del agua viene dado por la cantidad de calcio y magnesio presentes en la muestra expresada como ppm de carbonato de calcio, pudiendo variar dependiendo de la fuente, por ejemplo, las aguas superficiales diluidas por el agua de lluvia presentan una dureza menor que las aguas de pozo de una misma región.

Para procesos de generación de vapor se necesita que la dureza del agua sea lo más baja posible, porque el calcio y el magnesio tienden a formar incrustaciones una vez dentro de la caldera especialmente por las altas temperaturas que hacen que la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio disminuya precipitando en la superficie de los tubos de intercambio de calor ocasionando pérdidas de energía en el sistema.

1.1.5.7 SÍLICE

En el agua la sílice puede estar en diferentes formas, ya sea como; sílice disuelta, en suspensión y como partícula coloidal. La sílice no puede ser eliminada por procesos convencionales como clarificación y filtración, resultando indeseable en el agua de alimentación de calderas, ya que puede formar una incrustación muy densa y dura que provoca serias pérdidas de eficiencia en la caldera, sobrecalentamiento del metal, fallas en tubos de la caldera y corrosión.

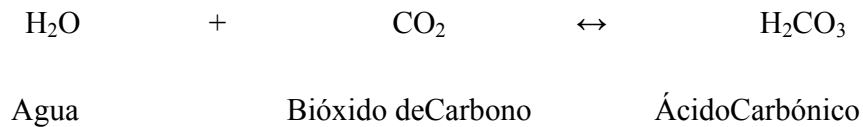
1.1.5.8 HIERRO

Esta prueba permite determinar si el retorno del condensado contiene un exceso de óxido de hierro, lo que constituye una clara evidencia de que se ha dado erosión en tuberías y maquinaria que utilizan este vapor. El hierro y el cobre tienden a formar depósitos que

disminuyen la transferencia de calor. Para reducir este efecto se pueden utilizar filtros de membrana para remover estas sustancias.

1.1.5.9 DIÓXIDO DE CARBONO

Corrosión es el principal daño que puede provocar el CO₂, sobre todo en lastuberías de condensado. Cuando el pH es bajo, el CO₂ reacciona con el agua de condensado para formar ácido carbónico el cual es corrosivo. La reacción química se lleva a cabo como se muestra:



El efecto corrosivose manifiesta en forma de ranuras generalmente en las líneas de retorno de condensado.

1.1.5.10 OXÍGENO

El agua proveniente de ríos y lagos, generalmente contienen entre 6 y 8 partes por millón de oxígeno, aumentando la concentración del mismo en el agua cuanto más baja sea la temperatura.

Cuando el agua se encuentra a temperatura ambiente, el oxígeno no contribuye mayormente a la corrosión, pero cuando existen altas temperaturas, como en el caso de un sistema degeneración de vapor, el oxígeno se vuelve altamente corrosivo. La corrosión producida por oxígeno en condiciones de alta temperatura, se manifiesta en forma de perforaciones profundas que pueden llegar a romper los tubos. El oxígeno disuelto en el agua de alimentación de calderas se elimina mediante medios mecánicos como es el caso

de un desaerador el cual alimenta el agua con vapor para reducir el contenido de oxígeno disuelto en el agua hasta un nivel de 10 ppb (0,01 ppm).

1.1.5.11 ACEITE.

La presencia de aceite en el agua de alimentación favorece la formación de espuma en el interior de la caldera dando como consecuencia el arrastre al vapor.

1.1.5.12 FOSFATO.

El fosfato es utilizado para controlar el pH y dar protección contra la dureza, esto se logra ya que el fosfato al reaccionar con el calcio y el magnesio crean sales en forma de incrustaciones solubles que son fácilmente eliminados en la purga de la caldera.

1.1.5.13 SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.

La determinación de estos sólidos está directamente relacionada con la turbidez, cuando la cantidad de estos sólidos aumenta se producen problemas en la sedimentación y de erosión de las tuberías metálicas cuando el agua fluye a altas velocidades. Los sólidos en suspensión representan la cantidad de impurezas en suspensión que se encuentran en el agua.

1.1.5.14 SECUESTRANTES DE OXÍGENO.

Estos tienen la función de remover el oxígeno disuelto del agua, entre ellos podemos mencionar a sulfitos, hidrazina, hidroquinona, etc. Al remover el oxígeno disuelto se está disminuyendo la tendencia corrosiva que pueda tener el agua.

1.2 PROBLEMAS CAUSADOS POR EL AGUA EN CALDERAS

1.2.1 ARRASTRE

Tiene que ver con el hecho de que algún contaminante es llevado por medio del vapor cuando este sale de la caldera, comúnmente producido por pequeñas gotas de agua que contienen sólidos en suspensión. La presencia de espuma en el agua de la caldera y vaporización de los contaminantes propician el fenómeno del arrastre.

Algunas causas son las que producen el arrastre entre ellas:

1. Alcalinidad y sólidos totales elevados.
2. Alto nivel de agua.
3. Cambios bruscos de presión.
4. Mala operación de purgas.

Este problema está relacionado con el suministro de vapor húmedo debido al arrastre de condensado. El arrastre tiene relación con deficiencias mecánicas que tienen que ver con la operación con elevados niveles de agua, deficiencias de los separadores de gota, sobrecargas térmicas, variaciones bruscas en los consumos, y deficiencias químicas debido a problemas en el tratamiento de agua, para evitar esto se recomienda mantener los siguientes límites de los contenidos de alcalinidad, sólidos totales y sílice:

1. Alcalinidad total (CaCO_3) < 700 ppm
2. Contenido de sílice (SiO_2) < 150 ppm
3. Sólidos disueltos < 3500 ppm

1.2.2 ESPUMEO

La formación de espuma tiene que ver con las deficiencias químicas relacionadas con el tratamiento de agua de la caldera, específicamente con excesivos contenidos de alcalinidad, sólidos totales disueltos, sólidos totales en suspensión y sílice.

Dos mecanismos suelen producir formación de espuma, el primero de ellos es el aumento de sólidos disueltos en el interior de la unidad, los que sobrepasan los límites aceptados de trabajo, la presencia de algunos tipos de grasas o aceites como ácidos orgánicos producen una saponificación de las mismas dada la alcalinidad, temperatura y presión existentes en el interior de la caldera.

El segundo mecanismo que da origen a la formación de espumas se basa en el principio de Henry el cual dice que la solubilidad de un gas disuelto en un medio acuoso disminuye a medida que aumenta la temperatura del medio acuoso, es decir cuando los gases disueltos como el oxígeno y el dióxido de carbono pasan de la fase líquida a la fase de vapor se produce la formación de espuma cuando el agua hierve en la caldera.

Cuando el agua presenta en su composición trazas de materia orgánica, como grasas y aceites, aparecen películas en la interfase de la fase acuosa y de vapor que impiden que los gases escapen libremente y esto disminuye la eficiencia de la caldera y causa problemas con el agua de proceso que se encuentra en un circuito cerrado en la caldera y demás componentes del sistema de producción de vapor.

Cuando la caldera no se purga con la frecuencia requerida se puede presentar problemas de espumeo, causando problemas de operación disminuyendo la calidad del vapor, ya que se puede presentar el arrastre de partículas de sólidos con el vapor.

1.2.3 CORROSIÓN

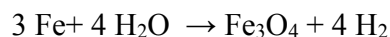
La corrosión constituye la disolución del hierro u otros materiales de la que están hechas las tuberías por medio de las cuales fluye agua especialmente en condiciones de altas temperaturas que aceleran dicho fenómeno. Este problema se da generalmente por la sustitución de hierro del metal por el hidrógeno del agua, siendo que el ión ferroso liberado reacciona con los iones oxidrilo para formar hidróxido ferroso que forma capas protectoras para impedir que más iones de hidrógeno continúen atacando a la tubería. El oxígeno disuelto, el dióxido de carbono y otras impurezas hacen que las capas formadas por el hidróxido ferroso se desprendan mediante la formación de hidróxido férrico. Más específicamente el dióxido de carbono reacciona con el hidróxido ferroso para formar bicarbonato ferroso soluble y posteriormente el oxígeno se oxida este compuesto para formar óxido férrico el cual permanece suspendido dando una coloración roja al agua.

La presencia de agua en forma líquida favorece la aparición de este fenómeno, ya que el vapor seco con presencia de oxígeno, no es corrosivo, no así los condensados formados que presentan naturaleza muy corrosiva.

El ataque corrosivo más intenso se produce en las líneas de vapor y condensado, específicamente en la zona donde se acumula agua condensada. Debido a la entrada de aire al sistema, la corrosión producida por el oxígeno es severa especialmente cuando el valor del pH es bajo, la presencia de bióxido de carbono acelera la velocidad de la corrosión en los metales del sistema por efecto de la presencia de oxígeno disuelto.

La corrosión que produce el oxígeno disuelto se presenta en forma de montículos de óxido que suelen tener coloración negra en las superficies del acero al carbono que ataca.

Este tipo de corrosión se presenta con frecuencia en calderas, dando la siguiente reacción:

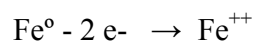


Esta reacción se produce cuando el vapor sobrecalentado ejerce su acción sobre el metal.

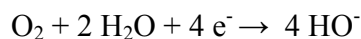
Una diferencia de potencial entre la superficie metálica y la superficie acuosa produce corrosión dada por una reacción electroquímica.

Los metales se disuelven en el área de más bajo potencial, para dar iones y liberar electrones de acuerdo a la siguiente ecuación:

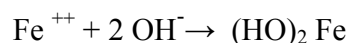
En el ánodo



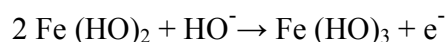
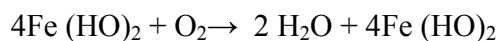
En el cátodo

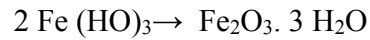


Los iones HO^- (oxidrilos) formados en el cátodo migran hacia el ánodo donde completan la reacción con la formación de hidróxido ferroso que precipita de la siguiente forma:



Si la concentración de hidróxido ferroso es elevada, precipitará como flóculos blancos. El hidróxido ferroso reacciona con el oxígeno adicional contenido en el agua según las siguientes reacciones:





1.2.3.1 FRAGILIZACIÓN CÁUSTICA

La fragilidad cáustica se origina por presencia de una solución cáustica concentrada en contacto con una superficie metálica produciendo una reacción corrosiva de los bordes de los granos cristalinos dentro del metal, generalmente el ataque no es detectado presentándose la falla repentinamente generando quebradura repentina del metal sin deformación previa

Este problema se da principalmente por tres factores:

- 1) Escape de vapor que permita la concentración de agua en el punto de fuga de modo que la concentración de sosa sea superior a los 350 gramos por litro.
- 2) Afectación al metal por parte de la sosa cáustica concentrada originada por la concentración del agua de la caldera.
- 3) El área del metal expuesta a la concentración esté sometida a un esfuerzo de tensión superior al de su punto crítico.

Al eliminar uno de los tres factores mencionados se logrará desaparecer el riesgo de este problema. A altas temperaturas el nitrato resulta un inhibidor del efecto de fragilización, siendo estable hasta presiones de 400psi y una relación entre nitrato de sodio/alcalinidad total no menor a 0,4:1. Existen otras sustancias capaces de inhibir o detener por completo este tipo de fallas, una de ellas es el sulfato de sodio que retarda el proceso de fragilización y si llega a concentraciones adecuadas tiende a detener la formación de este tipo de fallas,

el extracto de quebracho es un flavotanino procedente del corazón del árbol de quebracho que también ha demostrado eficacia en contrarrestar la fragilización siempre y cuando la proporción entre flavotaninos y alcalinidad total sea como hidróxido de sodio a 0,3.

Un metal que ha sufrido fragilización presenta características como:

- Fracturas debajo de la línea de agua específicamente sobre la superficie seca de las uniones.
- Estas fallas generalmente ocurren en placas laminadas y placas de acero fundido.
- Las fracturas presentadas son irregulares y muy marcadas en sus cambios de direcciones.
- Las fracturas aparecen en las uniones remachadas o traslapadas.
- Es usual en metales sometidos a grandes esfuerzos.
- Aparece en áreas adyacentes a las uniones.
- En las áreas fragilizadas se encuentra presencia de óxido de hierro o sulfuro.

La detección de dichos daños estructurales se los puede llevar a cabo de forma no invasiva mediante métodos como radiografías, técnicas de vibraciones sónicas y ultrasónicas, técnicas de campos magnéticos y pruebas de tinción con colorantes fluorescentes. Por otra parte la sílice y otros compuestos oxidantes aceleran el proceso de fragilización, aún en pequeñas concentraciones.

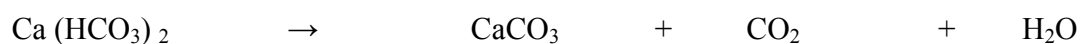
1.2.4 INCRUSTACIONES

Las incrustaciones son materiales capaces de acumularse sobre las superficies internas de la caldera, retardando la transferencia de calor o restringir la circulación normal del agua produciendo como resultado un recalentamiento del metal.

En calderas de baja presión las incrustaciones se forman por la presencia de calcio y magnesio principalmente además de otros contaminantes como hierro, cobre, sílice, aluminio, aceite y lodo.

La formación de las incrustaciones se da cuando las sales que normalmente son solubles en agua en condiciones normales precipitan debido a las condiciones de presión y temperatura a la que es sometida el agua en el proceso de generación de vapor ya que la solubilidad de dichas sales tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura.

Otros factores de la formación de incrustaciones son los cambios químicos y la concentración del agua en el interior de la caldera, así por ejemplo la alcalinidad que generalmente está en la forma de bicarbonato debido a la alta temperatura provoca la conversión de bicarbonato a carbonato y al combinarse con el calcio tiende a carbonato de calcio como se muestra:



Bicarbonato de Calcio Carbonato de calcio Bióxido decarbono Agua

Las incrustaciones se presentan con mayor frecuencia en las áreas donde existe mayor transferencia de calor debido que las sales inicialmente solubles tienden a precipitarse y depositarse en la pared de los tubos debido al gradiente de temperatura, actuado como

material aislante entre el metal y el agua que circula provocando sobrecalentamiento y posterior ruptura del metal.

Un régimen de purga adecuada asegura que los sólidos que se mantienen en suspensión en forma de lodos puedan ser extraídos de la caldera de manera que no representen un peligro grave para el sistema. Cuando la purga no es realizada con la frecuencia adecuada, los lodos se depositan en la superficie de la caldera, en este caso los depósitos se adhieren a la superficie del metal y convirtiéndose en un material duro y difícil de despegar.

La formación de depósitos de hierro sigue la misma mecánica de los lodos, este llega a la caldera cuando existen problemas de corrosión en las líneas de condensado cuando no existe protección contra la corrosión.

Las sustancias formadoras de incrustaciones son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice, esto se debe a la baja solubilidad que presentan estas sales y algunas de ellas como es el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover, algunas de las causas más frecuentes de este fenómeno son las siguientes:

- Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.
- El vapor o condensado tienen algún tipo de contaminación.

Estas incrustaciones al depositarse en la superficie donde se da la transferencia de calor disminuyen la eficiencia del rendimiento de la caldera al disminuir la transferencia de calor

hacia el agua, es decir que las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la pared metálica que las calderas con las paredes limpias.

En general cuando existe presencia de incrustaciones densas y adherentes es seguro de que el agua que se está utilizando para la alimentación de la caldera no ha sido tratada, dichas incrustaciones se caracterizan por estar compuestas de sulfato de calcio, carbonatos y silicatos. Mientras que las incrustaciones más suaves se deben al agua que solo contiene dureza de bicarbonato. La conductividad térmica de las incrustaciones varía entre 0,66 y 2,06 BTU por pie cuadrado, por pie de espesor, por hora, por cada °F, aceptándose como valor medio de conductividad 1,5. La presencia de porosidad disminuye la conductividad térmica de una incrustación pudiendo llegar a valores tan bajos como 0,2 BTU por pie cuadrado, por hora, por cada °F.

Tabla 1.2.4. 1 Relación entre depósitos y % de pérdida de combustible.

Espesor (mm)	% pérdida de combustible
0,8	9
1,6	12-16
3,2	20
6,4	40-60

FUENTE: Memorias Seminario Calderos Industriales EPN 2010

1.3 TRATAMIENTO DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE VAPOR

Una caldera en funcionamiento que se alimenta con agua sin el tratamiento químico correspondiente además de presentar problemas operativos, tendrá dos problemas específicos como son; la corrosión y la presencia de incrustaciones, lo que conlleva a una disminución de la eficiencia y por tanto a reparaciones costosas por daños en estructuras internas del equipo generador de vapor. El uso de métodos modernos de tratamiento de

agua para alimentación permite que las calderas operen con altos grados de eficiencia porque aumenta la transmisión de calor al disminuir las incrustaciones, logrando un ahorro para una empresa.

El tratamiento de agua para calderas, se lo puede llevar a cabo por medio de métodos químicos, mecánicos o una mezcla de ambos según los componentes del agua, así por ejemplo, el oxígeno y el dióxido de carbono son eliminados por medio de métodos mecánicos, por otro lado los sólidos disueltos no volátiles son tratados con métodos químicos.

La evaporación de agua en el interior de la caldera hace precipitar sales que normalmente son solubles, las cuales se depositan en forma de costras en superficies donde normalmente se da la transferencia de calor, lo que posteriormente termina disminuyendo la eficiencia de la caldera. Las sales de calcio y magnesio son las que normalmente precipitan y forman incrustaciones, pero también pueden quedar como sedimentos y ser eliminadas en la purga. Por otra parte fenómeno de la corrosión se da por efecto del oxígeno disuelto y el dióxido de carbono, que dañan estructuras metálicas de la caldera.

1.3.1 PREPARACIÓN DEL AGUA BRUTA

Muchos complejos industriales se abastecen de fuentes de agua como ríos o lagos para aportar dicha agua como suministro para calderas, pero antes de llevar a cabo esta actividad se debe realizar un tratamiento previo que permita eliminar impurezas. Así tenemos:

1.3.1.1 MEZCLADO

Se puede definir al mezclado como una operación que permite una distribución rápida y uniforme de los químicos dosificados durante el tratamiento del agua antes de que se den las reacciones deseadas.

El mezclado se puede llevar a cabo de forma mecánica o hidráulica en los lugares destinados a este fin como pueden ser tuberías, tanques especiales o secciones de tanques. Esta operación está basada en la agitación violenta del agua con el producto químico dosificado durante un tiempo adecuado, la agitación puede darse a través de agitadores mecánicos o canales deflectores que permiten tener las condiciones de turbulentas óptimas para este fin.

1.3.1.2 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

La coagulación es la formación de flóculos producido por los cambios fisico-químicos que se dan por efecto del coagulante soluble sobre la alcalinidad del agua. La coagulación está comprendida por tres etapas; la primera está relacionada con la mezcla de los productos químicos con el agua a tratar a velocidades altas para permitir la distribución homogénea del químico, la segunda etapa se da a velocidades menores para permitir la formación de los flóculos y la tercera etapa tiene que ver con un mezclado final suave para favorecer el aumento del tamaño de los flóculos.

La floculación no es más que la aglomeración de las partículas en suspensión para formar flóculos de mayor tamaño que precipiten más rápido en el tanque sedimentador.

Generalmente las aguas blandas tienen mejor coagulación cuando el pH se encuentra entre 5,8 y 6,4, las aguas duras coagulan mejor a pH entre 6,8 a 7,8, mientras que las aguas que contienen una concentración de color alta, es decir mayor a 30ppm tienen mejor coagulación a pH entre 5,0 y 6,0.

Existen diversos tipos de coagulantes en el mercado entre los más utilizados tenemos:

1.3.1.2.1 SULFATO DE ALUMINIO

Este se obtiene mediante la reacción entre el óxido de aluminio y ácido sulfúrico con posterior purificación del producto separando la proporción de óxido de aluminio que no ha reaccionado. Este producto viene generalmente como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ conteniendo un 15,3% de óxido de aluminio en forma ácida o básica, pudiendo estar en forma líquida o en polvo.

Cuando el agua se encuentra cerca del punto neutro al adicionar el indicador naranja de metilo, el flóculo probablemente contenga $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3$, pero si por el contrario el agua presenta una coloración rosa al añadir fenolftaleína la composición del flóculo probablemente sea $\text{Al}(\text{OH})_3$, por otra parte cuando la alcalinidad del agua es debida al bicarbonato de calcio entonces se produce la reacción:



1.3.1.2.2 ALUMBRES DE AMONIO Y POTASIO

Generalmente utilizados en tanques de alumbre donde es disuelto en tanques a presión y siendo posteriormente inyectada en al agua a tratar.

1.3.1.2.3 ALUMINATO DE SODIO

Este producto tiene presentaciones en líquido y en polvo, contiene aluminato de sodio, carbonato de sodio, sosa cáustica y materia orgánica. El aluminato de sodio puede provocar un ablandamiento del agua debido a la presencia de compuestos sódicos, puede ser utilizado en conjunto con el sulfato de aluminio para mejorar la floculación y a la vez producir un ablandamiento mejor que el causado por el tratamiento con cal-carbonato.

El aluminato de sodio contiene un 88% de NaAlO_2 , generalmente se usa en agua para calderas produciendo flóculos parecidos a los del sulfato de aluminio con la diferencia que este tiene una reacción alcalina siendo especial para el tratamiento de ciertas aguas.

1.3.1.2.4 SULFATO FERROSO

Es también conocido como “copperas”, presenta una fórmula $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y utilizado para clarificar agua muy turbia. Al igual que el sulfato de aluminio, este reacciona con la alcalinidad del agua para formar los flóculos, siendo que el flóculo que se forma al inicio es de naturaleza soluble, en este caso hidróxido ferroso, que posteriormente se oxida a hidróxido férrico por efecto del oxígeno disuelto presente en el agua. El hidróxido férrico es insoluble y tiende a precipitar. El sulfato ferroso se utiliza en combinación con cal hidratada que neutraliza al dióxido de carbono que impide la oxidación del sulfato ferroso a sulfato férrico.

1.3.1.2.5 SULFATO FÉRRICO

Este producto reacciona con la alcalinidad del agua para la formación de hidróxido férrico insoluble sin requerir la adición de cal hidratada. El sulfato férrico en solución es corrosivo por lo que necesario usar recipientes resistentes para su preparación y almacenaje.

Al ser diluido el sulfato férrico forma un hidrato $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ que tiende a solidificarse al igual que el yeso, por lo que es necesario adicionar cuatro partes de agua por cada parte de sulfato férrico.

1.3.1.2.6 CLORURO FÉRRICO Y SULFATO FERROSO CLORADO

El cloruro férrico es utilizado para el tratamiento de aguas negras para mejorar el asentamiento de los lodos y su facilidad para ser filtrados. Este compuesto tiene mejores resultados de coagulación a pH de 5,0, es corrosivo por lo que su almacenamiento y preparación se debe llevar a cabo en recipiente resistentes a la corrosión.

El sulfato ferroso clorado es preparado en las mismas plantas de tratamiento de agua realizando una cloración a la solución de sulfato ferroso, siendo que la proporción es de 1:8, es utilizado para coagular aguas coloridas a un pH de 4,9.

1.3.1.3 SEDIMENTACIÓN

La sedimentación se lleva a cabo en tanques que son estructuras dentro de las cuales fluye agua a tan baja velocidad que los flóculos o materiales suspendidos tienden a caer para depositarse en el fondo del mismo para obtener agua relativamente clara. Este proceso se da inmediatamente después de la coagulación y floculación, pero antes de pasar al filtro.

En el aprovechamiento de la fuerza de la gravedad se basa esta operación, ya que las partículas de mayor peso contenidas en el agua tienden a descender y depositarse en el fondo del recipiente que contiene el agua permitiendo la clarificación del agua que entra a esta etapa del tratamiento. Características como forma, peso, tamaño, resistencia a la fricción y viscosidad de las partículas suspendidas en el agua constituyen un parámetro importante en el diseño de los tanques sedimentadores.

Los sedimentadores pueden tener formas rectangulares o circulares y estar construidas de diferentes materiales como concreto, acero, madera, etc. Dependiendo del contenido de sólidos y del flujo de agua tratado, el tiempo de retención puede ir de 4 a 12 horas, lo que en ocasiones puede ser perjudicial ya que favorece el crecimiento bacteriano. Los sedimentadores de diseño rectangular presentan problemas de corto circuito, este problema se resuelve ubicando mamparas a la entrada del equipo.

Los factores que se deben tomar en cuenta durante la operación del sedimentador son:

- Mínima turbulencia provocada por el agua de entrada.
- Impedir corto circuito en las aguas que entran y salen del sistema.
- Evitar turbulencia y arrastre del efluente del sistema.

La operación de sedimentación puede acelerarse o facilitarse mediante el empleo de agentes coagulantes como el sulfato ferroso, alúmina, cloruro férrico y óxido de magnesio.

El tipo de agua bruta permite determinar el tipo de coagulante que se debe utilizar, además de esto en muchos casos se debe añadir un álcali al agua para elevar el pH al valor requerido.

1.3.1.4 FILTRADO

Es el proceso mediante el cual se retiran del agua las materias suspendidas a medida que pasa a través de un lecho poroso que generalmente es una capa de arena. Existen dos tipos de filtros de arena empleados:

1.3.1.4.1 FILTROS LENTOS

Estos se caracterizan porque el agua que pasa a través del filtro lo hace a velocidades bajas que oscilan entre 18700 a 90000 litros/metro cuadrado al día dependiendo de la turbiedad, el tratamiento previo y la temperatura.

La filtración lenta es idónea para quitar olores y sabores, purificación bacteriana y tratamiento final de aguas contaminadas. El filtro puede llegar a taparse por actividad bacteriana, obstrucción por tapones de aire y alta turbidez.

Los filtros lentos son usados cuando se desea tratar aguas naturales con turbidez baja, la arena que se usa para este tipo de filtro es más fina que en el caso de los filtros rápidos. En este tipo de filtros se debe mantener la velocidad de flujo estable de filtración lo cual se logra con el control mecánico o automático de dichos flujos.

La limpieza de este tipo de filtro se la realiza retirando manualmente cierta cantidad de arena que ha sido saturada con material retenido y posterior reposición de la misma cantidad retirada para evitar disminución de la eficiencia de la filtración.

1.3.1.4.2 FILTROS RÁPIDOS

Los filtros de arena rápidos presentan algunas características como:

- Utiliza arena gruesa.
- La velocidad en el filtro rápido es entre 15 a 50 veces mayor que en el filtro lento.
- La limpieza se lleva a cabo ingresando agua en sentido contrario al flujo normal del agua que se trata.

Los filtros rápidos se pueden usar para la mayoría de aguas siempre y cuando se le dé un tratamiento previo para la eliminación de materia en suspensión. Este tipo de filtros no elimina la turbiedad ligera, sustancias que imprimen características de color y olor, bacterias, sustancias coloidales como lo hace el filtro lento.

El tratamiento previo que se tiene que dar al agua antes de entrar a los filtros rápidos consiste en la adición de coagulantes, mezcla, floculación y sedimentación de tal manera que se disminuya la cantidad de materiales suspendidos, siendo que el objeto principal de este filtro es eliminar flóculos y material suspendido que logró pasar la etapa de sedimentación.

En este tipo de filtro la velocidad de filtración es mayor a los 2 galones por minuto por pie cuadrado logrando sobrepasar los 2.5 galones por minuto por pie cuadrado, pueden presentarse dificultades de operación como:

- Fallas en controles de flujo y del equipo mecánico.
- Falla en las capas del filtro (obstrucción del lecho filtrante, separación de las paredes del lecho por contracción del mismo, formación de bolas de arena por efecto del material coagulado y mezcla de arena y grava).

Los cuidados que se deben tener para evitar dificultades de operación por parte de los filtros rápidos son:

- El sistema de drenaje debe mantener una distribución uniforme de agua.
- Grava graduada que resista el movimiento durante el retrolavado.
- Lavado frecuente de los filtros.
- Cloración antes de que el agua pase al filtro para evitar la formación de bolas de arena.

1.3.2 TRATAMIENTO EXTERNO PARA AGUAS DE CALDERAS

Es el ablandamiento del agua, este consiste en eliminar los iones de calcio y magnesio, además de la sílice y gases disueltos presentes en el agua de alimentación de la caldera que puede llevarse a cabo mediante diferentes métodos:

1.3.2.1 ABLANDAMIENTO CON CAL - CARBONATO

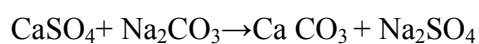
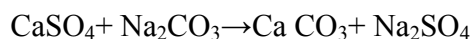
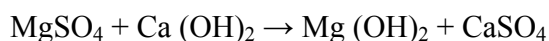
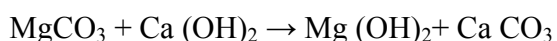
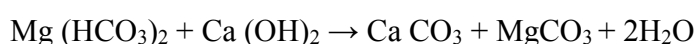
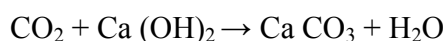
Cuatro compuestos minerales presentes en el agua en solución son los que producen el efecto de dureza en la misma, bicarbonato de calcio, bicarbonato de magnesio, sulfato de calcio y sulfato de magnesio, otros compuestos que causan dureza en menor grado son los cloruros y nitratos de calcio y magnesio.

La dureza es de naturaleza carbonatada cuando existe la presencia de bicarbonato de calcio y bicarbonato de magnesio, por otro lado, es de naturaleza no carbonatada cuando existe la presencia de sulfatos de calcio y magnesio, así como también la presencia de cloruros y nitratos.

La alcalinidad del agua consiste generalmente en determinar la dureza carbonatada, en otros casos como en el agua ablandada y en algunas aguas crudas, esta alcalinidad puede incluir también alcalinidad sódica, que generalmente se manifiesta cuando la alcalinidad excede la dureza total.

La dureza no carbonatada se puede determinar mediante la diferencia entre la dureza total y la dureza carbonatada, para eliminar o reducir la dureza no carbonatada se requiere añadir sosa cáustica. Cuando se suma la alcalinidad más la dureza no carbonatada se tiene como resultado la dureza total para el caso en que el agua no tiene dureza sódica, de lo contrario, la dureza total es igual a la alcalinidad total menos la alcalinidad sódica.

El proceso de ablandamiento de agua viene explicado por las reacciones que se dan cuando se añaden al agua que contiene calcio y magnesio en forma de sales las sustancias ablandadoras como son la cal y la sosa cáustica como se muestra a continuación:



Todas estas reacciones son las que ocurren durante el proceso de ablandamiento de agua, en la primera ecuación se considera la presencia de dióxido de carbono en el agua ya que consume cal en el ablandamiento, la segunda, tercera y cuarta ecuación muestra cómo se

elimina la dureza carbonatada mediante el empleo de cal, la quinta ecuación muestra la eliminación de la dureza no carbonatada del magnesio, mientras las dos últimas ecuaciones muestran cómo se elimina la dureza no carbonatada formada por la presencia de sulfato de calcio que se formó en la quinta ecuación química y además de la que estaba presente inicialmente en el agua.

Todas estas reacciones son utilizadas para realizar los cálculos pertinentes de dosificación de cal y sosa al agua que se va a dar el tratamiento, para la realización de dichos cálculos se deben tener datos como dióxido de carbono libre, dióxido de carbono de bicarbonato (44 por ciento de la alcalinidad), dureza no carbonatada y magnesio, todas estas determinaciones se deben realizar para calcular la dosificación de los productos químicos de ablandamiento.

Las plantas de tratamiento de agua que usan este método generalmente están compuestas de; aparatos que permiten mezclar el agua con los productos químicos de ablandamiento, tanques de sedimentación dentro de los cuales se da el ablandamiento y a la vez el asentamiento de los precipitados, filtros de arena para clarificar agua.

Los beneficios de las plantas de tratamiento de agua que realizan el ablandamiento con cal tienen mayor grado de coagulación y de eliminación de bacterias que una planta de tratamiento normal que tiene operaciones de coagulación y filtración.

Experimentos realizados con aguas infectadas de agentes patógenos demuestran que el uso de cal puede llegar a eliminar hasta el cien por ciento de dichos agentes, así por ejemplo, si se trata agua a temperatura normal con un pH entre 11,01 a 11,50 por un tiempo de dos horas o trabajando con un pH entre 10,51 a 11,00 por un tiempo aproximado de cuatro

horas la eliminación de agentes patógenos es total, siendo que el uso de cal no puede sustituir el uso de cloro como agente desinfectante.

1.3.2.2 ABLANDAMIENTO POR INTERCAMBIO DE CATIONES

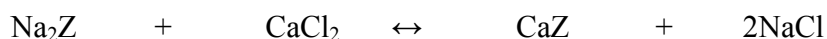
Los procesos de intercambio iónico que se utilizan para la purificación de agua son dos; el primero incluye el uso de zeolitas de sodio y el segundo es el uso de zeolitas de hidrógeno.

Las zeolitas de sodio son utilizadas para el ablandamiento de aguas que serán destinadas para la alimentación de calderas, aguas de proceso o de uso doméstico.

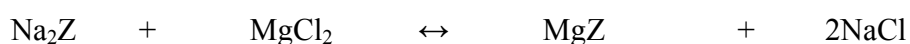
El proceso de ablandamiento de aguas mediante el uso de zeolitas de sodio consiste en hacer pasar el agua que se va a tratar a través de un lecho de resinas zeolíticas de sodio o potasio, es decir que permitan el intercambio de los iones de calcio y magnesio del agua hacia la superficie de la resina, mientras que los iones de sodio o potasio se liberan al agua, reduciendo de esta manera la dureza del agua.

1.3.2.2.1 DINÁMICA DEL PROCESO DE ABLANDAMIENTO Y REGENERACIÓN

Las reacciones de suavización son:



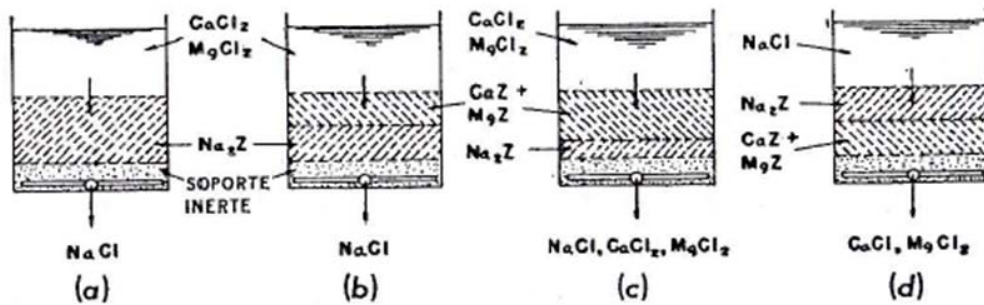
Zeolita de sodio + Cloruro de calcio \leftrightarrow Zeolita de calcio + Cloruro de sodio



Zeolita de sodio + Cloruro de magnesio \leftrightarrow Zeolita de magnesio + Cloruro de sodio

A continuación se muestra la dinámica del proceso de ablandamiento y regeneración de la zeolita de sodio.

Figura. 1.2.2.2.1 Dinámica del proceso de ablandamiento y regeneración



FUENTE: SheppartPowel, Acondicionamiento de aguas para la industria

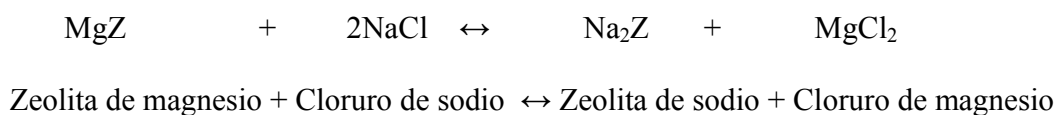
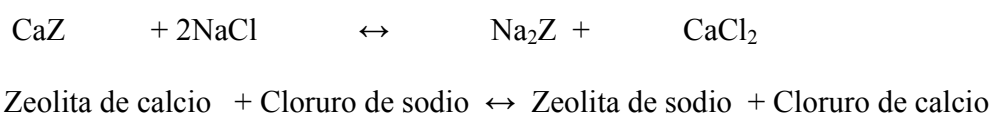
En el punto (a) se muestra como los cloruros de calcio y magnesio presentes en el agua a tratar pasan a través de un lecho de zeolitas de sodio y rápidamente se convierten en cloruros de sodio gracias al intercambio iónico, quedando retenidos en la superficie de la zeolita los iones de calcio y magnesio.

En el punto (b) se muestra como se satura la mitad del lecho zeolítico, es decir que aumenta la proporción de iones calcio y magnesio en la superficie de la zeolita y disminuye la proporción de sodio propio de la resina por efectos del intercambio en el proceso de ablandamiento.

En el punto (c) se muestra como la capa de zeolita de sodio es tan delgada que la eficiencia del intercambio disminuye, es decir la zeolita saturada permite el paso de los cloruros de calcio y magnesio a través de la misma sin darse el ablandamiento, apareciendo de este modo la dureza del agua que sale del lecho de zeolita.

En este punto la capacidad que tiene la zeolita de intercambiar iones de sodio por iones de calcio y magnesio no ha sido totalmente agotada, pero si se ha agotado el valor de intercambio en operación. Cuando estas condiciones aparecen en el ablandamiento es necesario llevar a la zeolita a un proceso conocido como regeneración que tiene como finalidad reponer proporción normal de sodio en la zeolita para que se dé el ablandamiento normal, esto se lo logra removiendo los iones de calcio y magnesio de la superficie de la zeolita saturada mediante el uso de un lecho de cloruro de sodio (sal común) en solución.

En el proceso de regeneración se dan reacciones inversas al proceso de ablandamiento como se detalla a continuación:



El proceso de regeneración se encuentra ilustrado en el literal (d), la regeneración de la zeolita no se da al 100 por ciento ya que en su superficie siempre quedan trazas de calcio y magnesio.

El ablandamiento no se da solo para calcio y magnesio, sino que también se da para cationes divalentes como hierro y manganeso. La capacidad de intercambio de una zeolita catiónica se expresa en kilogramos de dureza removida por pie cúbico de material ablandador, la capacidad de intercambio varía de acuerdo al tipo de ablandador, dureza del agua tratada, cantidad de regenerante utilizado, concentración de sodio, etc.

Cuando se realiza el diseño de un ablandador, se debe realizar el cálculo de la dureza compensada o verdadera considerando la dureza excesiva y el sodio que se encuentra presente en el agua.

Para el caso en que el agua presenta una dureza mayor a 400ppm y una concentración de sodio mayor a 100ppm, entonces la dureza compensada puede calcularse con la fórmula:

$$H_c = H_a \times \frac{9000}{9000 - \text{cationestotales}}$$

Dónde:

H_c, hace referencia a la dureza compensada.

H_a, expresa la dureza total del agua expresada como carbonato de calcio.

Los cationes totales representan la suma de la dureza total en ppm y la concentración de sodio en el agua en ppm.

1.3.2.2.2 REQUISITOS DE LA REGENERACIÓN

La regeneración es el proceso inverso al ablandamiento, es decir que se busca reponer la concentración de sodio o potasio inicial en la zeolita y que disminuyó por efectos del intercambio.

Para la regeneración de la zeolita se usa cloruro de sodio por su economía, disponibilidad y rapidez de encontrarlo, la cantidad de sal que se utilice depende de la cantidad de iones de sodio y potasio que se requiera reponer a la zeolita. La cantidad real de cloruro de sodio o potasio excede a la cantidad que se calcula teóricamente, este exceso se justifica debido a gran afinidad que presenta la zeolita por los iones calcio y el magnesio por los iones sodio.

La eficiencia de regeneración de una zeolita o resina cambiadora de iones viene definida como las libras de regenerante por kilogramo de iones removidos.

El consumo de sal utilizada en la regeneración depende de:

- 1) Material de intercambio.
- 2) Grado de dureza.
- 3) Distribución de la sal en el lecho.
- 4) Ablandamiento y regeneración incompleta.

Para unidades pequeñas de ablandamiento usualmente se prepara solución de salmuera de acuerdo a los requerimientos, diluyendo salmuera en agua dentro de un recipiente apropiado para posteriormente ser inyectado al ablandador para la regeneración. Para sistemas de mayor capacidad se tienen grandes tanques que contienen grandes cantidades de salmuera donde se alimenta de agua al tanque hasta un nivel determinado para tener la concentración requerida. La solución de salmuera puede ser inyectada por gravedad o por bombeo según los requerimientos del proceso de regeneración.

También se puede utilizar agua de mar para la regeneración de las zeolitas, ya que esta contiene el 2.5% de cloruro de sodio resultando económico para instalaciones grandes de tratamiento incluso cuando se debe dar un tratamiento de clarificación del agua del mar para reducir la cantidad de sólidos suspendidos.

Para la regeneración con agua del mar se debe tomar en cuenta que la alcalinidad no debe ser menor del 3%, es decir que la relación entre cloruros y la dureza no debe ser menor a

este valor. Los volúmenes de agua de mar con fines de regeneración son mayores que las soluciones de salmuera.

1.3.2.2.3 TANQUES SUAVIZADORES

Cuyas dimensiones varían según el volumen de agua que se va a tratar y de la dureza que pueda tener la misma. El gasto permisible para ablandamiento que pueden tener estos tanques varía desde los 3gpm por pie cuadrado de área hasta los 8gpm. La profundidad del lecho ablandador puede ir de 30 a 72 pulgadas, el diámetro del tanque también está en función de del volumen de agua a tratar entre regeneraciones, este diámetro puede variar desde las 10 pulgadas para unidades pequeñas a 12 pulgadas para unidades grandes.

La mayoría de los tanque suavizadores presentan configuración vertical excepto cuando existen limitaciones de espacio vertical la configuración es horizontal. Los suavizadores de configuración horizontal pueden tener dimensiones de hasta 25 pies de longitud y hasta 12 pies de diámetro, este tipo de tanques presentan una capacidad menor de ablandamiento que los tanques verticales que varía del 10 al 15% debido a que no se dispone del área seccional recta máxima.

En general los sistemas de suavizamiento horizontal presentan mayor dificultad de operación y mantenimiento por ello no son extensamente utilizados.

1.3.2.2.4 SISTEMA DE DRENADO INFERIOR

El diseño y construcción de este tipo de sistemas es similar al que se lleva a cabo para un filtro, es decir, retrolavado uniforme y uniformidad del agua que se trata en el interior del lecho.

La diferencia entre el sistema de drenaje de un filtro y el sistema de drenaje de una zeolita es el tipo de material que se usa para la construcción del mismo y el volumen de agua que se requiere para el retrolavado, ya que en los sistemas de zeolita se recomiendan que sean contruidos de latón rojo u otros materiales resistentes a la corrosión, estos deben estar recubiertos por antracita o grava graduada ya que sirven de soporte al lecho de intercambio además de permitir una recolección uniforme del agua tratada.

1.3.2.2.5 SISTEMA DE RETROLAVADO, REGENERACIÓN Y ENJUAGUE

Una vez que se va a empezar el proceso de regeneración, se debe desconectar el servicio de ablandamiento. Durante el retrolavado se debe inyectar agua hacia arriba en el interior del lecho, lo cual se hace principalmente para aflojar el lecho.

El retrolavado permite remover los depósitos que se encuentran en la superficie de la zeolita. Una vez que se ha completado el retrolavado se descarga salmuera en solución en el interior de lecho para la regeneración de la zeolita, esto se lo hace controlando el flujo de la solución de salmuera.

Una vez que el proceso de regeneración ha terminado, se procede al enjuague que permite la remoción de la sal muera del lecho. Una vez terminado el enjuague el equipo está listo para volver a la operación de ablandamiento de forma normal.

La velocidad de retrolavado puede variar dependiendo del tipo de intercambiador iónico que se esté utilizando, así, para arenas verdes esta velocidad varia de 7 a 8 gpm y para productos carbonáceos o resinosos varía entre 4 o 5 gpm.

1.3.2.2.6 DISTRIBUIDORES DE SALMUERA

Estos deben estar contruidos de materiales resistentes a la corrosión ya que en su interior distribuyen la salmuera utilizada para la regeneración de manera uniforme. Entre los materiales más usados para la construcción de estos sistemas se encuentra el latón rojo y otras aleaciones.

1.3.2.2.7 VÁLVULAS DE CONTROL

Son las encargadas de regular el flujo de aguas crudas, aguas suavizadas, aguas de retrolavado, salmuera, agua de retrolavado y agua de enjuague. Las válvulas de control pueden ser manuales, automáticas o semiautomáticas, siendo que muchos de estos sistemas de ablandamiento usan válvulas multifunción que evitan la operación de múltiples válvulas manuales disminuyendo el riesgo de la apertura incorrecta de válvulas manuales.

1.3.3 TRATAMIENTO INTERNO PARA AGUAS DE CALDERAS

El tratamiento interno del agua de calderas mediante compuestos químicos es el método más antiguo y más extensamente utilizado para corregir parámetros de importancia en el agua usada para generar vapor.

Inicialmente cuando se empezó a desarrollar productos que permitieran mejorar la calidad del agua que se utilizaría en calderas muchas veces hacían más daño que beneficio ya que se llegaba a utilizar sustancias que podían llegar a ser peligrosas para dichas condiciones de presión y temperatura. Actualmente los productos desarrollados fruto de años de investigaciones tienen una base científica que avala su uso y dosificación.

El tratamiento interno se da cuando la inversión de un equipo de tratamiento externo no se justifica por:

- Tamaño de la planta.
- Presiones de trabajo moderadas.
- Agua de buena calidad.

Existen parámetros químicos que justifican el uso de un tratamiento interno como; formación de incrustaciones, ajuste de pH, ajuste de alcalinidad, desaeración, corrosión, etc. El tratamiento interno incluye el uso de materiales orgánicos e inorgánicos usados independientemente o mezclados para complementarse unos con otros para reducir el apareamiento de los parámetros más importantes de control como son; incrustaciones, corrosión, fragilización cáustica y contaminación del vapor.

1.3.3.1 TRATAMIENTO CON FOSFATO

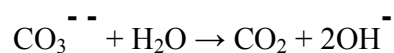
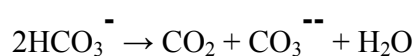
Este tratamiento tiene como finalidad dar lugar a la formación de sales de fosfato de calcio y magnesio en forma de materia en suspensión, las cuales no tienden a adherirse en las superficies donde se da la transferencia de calor. El exceso de fosfato permitirá que todo el calcio precipite en forma de fosfato de calcio que no forma incrustaciones evitando de este modo la formación de sulfato de calcio que se forma cuando el producto de la concentración de iones calcio por la concentración de sulfato es mayor a la constante de solubilidad del sulfato de calcio.

El precipitado deseado de calcio es $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ya que se vuelve económicamente viable por su menor solubilidad y mayor contenido de calcio, no así en el caso de CaHPO_4 o

CaH₄(PO₄)₂. Esto se lo logra cuando el pH del agua de la caldera está entre 11 y 12 y la concentración cáustica este entre 17 y 170 ppm.

La formación de espuma se debe a una concentración cáustica mayor a 200 ppm, mientras la causticidad residual permite la precipitación del magnesio y la reducción de la corrosión.

La causticidad en el agua se produce por las siguientes reacciones:



Los fosfatos de sodio en orden de acidez se presentan a continuación:

Tabla 1.3.3. 1Contenido de ácido y fosfato de los fosfatos de sodio

Compuesto	Fórmula	Porcentaje de ácido en H ₂ SO ₄ equivalente	Porcentaje de PO ₄
Metafosfato sódico	NaPO ₃	96	93
Fosfato monosódico anhidro	NaH ₂ PO ₄	82	79
Fosfato monosódico cristalizado	NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O	71	69
Fosfato disódico anhidro	Na ₂ H ₂ PO ₄	32	67

FUENTE: AWA; Agua, su calidad y tratamiento.

1.3.3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO PARA CORRECCIÓN DEL pH Y ALCALINIDAD

La importancia de mantener un pH y una alcalinidad deseable hacen que estos parámetros sean considerados de gran importancia ya que el pH disminuye con la temperatura, pero la corrosión tiende a aumentar en estas condiciones. Muchas plantas consideran que un pH óptimo de operación se encuentra en el intervalo entre 10,2 a 11,2, estableciendo como punto de control el valor de 10,6.

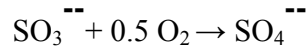
El mantener una alcalinidad de sodio adecuada permite la prevención de la formación de incrustaciones provocadas por la sílice ya que esta se mantiene en solución. El valor adecuado de alcalinidad en una caldera depende de la presión de trabajo, si por ejemplo, un valor de alcalinidad superior a 350ppm puede derivar en formación de espumas, mientras que un valor menor a 80ppm no asegura el amortiguamiento del pH del agua.

Para incrementar el pH y la alcalinidad del agua de alimentación y de caldera se usa normalmente sosa cáustica después de la desaeración del agua para evitar la fijación del dióxido de carbono que se necesita remover normalmente.

1.3.3.3 DESAERACIÓN QUÍMICA

La presencia de oxígeno disuelto en las agua de calderas tienden a causar problemas de corrosión en el interior de la misma, este inconveniente se puede reducir o eliminar mediante la adición de sulfito de sodio en el agua de alimentación antes de entrar a la caldera, del mismo modo evitando que el condensado entre en contacto con el aire antes de

retornar a la alimentación. El oxígeno disuelto se elimina mediante la reacción de oxidación del sulfito añadiendo un catalizador de cloruro de cobalto para promover esta reacción.



La dosificación del sulfito se realiza continuamente al agua de alimentación mediante una bomba dosificadora, dicha inyección se regula en función del caudal de alimentación de agua para establecer la relación correspondiente entre el flujo de sulfito y el flujo de agua de alimentación, una concentración de sulfito comprendida entre 10 y 20ppm es suficiente para proteger la caldera.

La dosificación de sulfito de sodio corregida a 90% pureza y una eficiencia del 75% se especifican a continuación:-

Tabla 1.3.3.3. 1Reacción entre oxígeno y sulfito de sodio

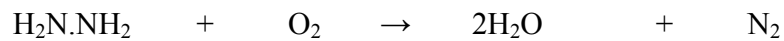
	Na ₂ SO ₃ + 0.5O ₂ ↔ Na ₂ SO ₄		
Pesos de combinación	126	16	142
Equivalente a.....	7,875ppm	1ppm	
	11,67	1ppm	
Dosis	0,972 lb/ 1000 gal	1ppm	
	16,71 ppm	1mL/Litro	
	0,139 lb/1000gal	1mL/Litro	

FUENTE: Shepart Powel; Acondicionamiento de aguas para la industria.

En calderas que trabajan a presiones bajas la desaeración química se puede efectuar químicamente, pero en caldera que operan a altas presiones la adición de productos químicos es menor ya que la cantidad de oxígeno disuelto en el agua empleada también es menor debido al proceso de desaeración térmica al que es sometida.

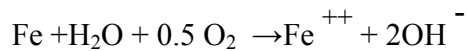
Otra sustancia utilizada para secuestrar oxígeno es la hidracina, mezclándose con el mismo para formar agua y desprender nitrógeno gaseoso el cual es desalojado de forma inocua con el vapor.

La reacción se muestra a continuación:

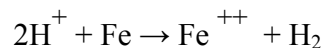


En condiciones de pureza total de hidracina y eficiencia del 100%, 1ppm de hidracina será capaz de remover 1ppm de oxígeno. La hidracina se recomienda en caldera que operan a presiones mayores de 500psi, mientras que el tratamiento con sulfito es recomendado para calderas que operan a presiones menores de 300psi.

El oxígeno promueve las reacciones de corrosión como se muestra a continuación:



Al igual que el oxígeno, el dióxido de carbono causa problemas de corrosión en la caldera, especialmente en el sistema de retorno del condensado ya que este compuesto existe en el vapor que al condensarse forma ácido carbónico provocando la oxidación del hierro según la siguiente reacción:



Cuando la concentración de carbonato de calcio equivalente se mantiene por debajo de los 15ppm, el dióxido de carbono no causa problemas de corrosión, el problema está en que la mayoría del agua natural suministrada no cumple con este requisito.

1.3.3.4 TRATAMIENTOS ANTIESPUMANTES

Este tratamiento tiene la finalidad de reducir la concentración de sólidos suspendidos y disueltos presentes en el agua de calderas, constituyendo un tratamiento complementario a la purga. Este tratamiento se lleva a cabo mediante el empleo de sales de bario que permitía la precipitación de los sulfatos sin que aumente la concentración de sodio.

También algunas aminas y glicoles han demostrado su gran efectividad en pruebas de antiespumantes, estos vienen comercializados como poliamidas y derivados de polialquilen glicol, los cuales permiten dispersar lodos y controlar la incrustación.

1.4 PURGAS

Esta operación constituye una parte importante dentro del tratamiento del agua de calderas ya que permite remover la mayor parte del polvo, lodo y otros materiales indeseables dentro de la caldera, requiriendo para ello un monitoreo y control estricto de estos parámetros.

La purga se realiza de manera óptima cuando su intervalo reduce de manera efectiva el lodo y las incrustaciones dentro de la caldera minimizando la pérdida de calor y concentración de aditivos químicos para el control del agua. Existen dos tipos de purgas, la purga lateral o superficial que normalmente se ubica en el nivel superior del agua y reduce de manera eficiente la espuma que se forma en la superficie del agua. Por otra parte la purga de fondo permite el control de la sílice, lodos, sólidos y otros materiales.

El control de purga normalmente se lleva a cabo considerando la conductividad, sólidos totales disueltos, sílice, hidrazina o fosfatos para lo cual se toma en cuenta los ciclos de concentración.

1.5 ÍNDICE DE ESTABILIDAD

El índice de estabilidad constituye un valor numérico que se calcula con los datos del análisis del agua, tales como; dureza, temperatura, pH y alcalinidad, permitiéndonos cuantificar la tendencia incrustante o corrosiva que ejerce la misma en la superficie del recipiente o tubería que la contenga.

El índice de W. Langelier establece que el agua no tiene tendencia incrustante ni corrosiva cuando se encuentra saturada de carbonato de calcio, cuyo valor de pH corresponde al pH de saturación (pH_s). El índice de Langelier nos da un valor cualitativo del agua pero no cuantifica las tendencias del agua.

Si pH es igual a pH_s, el agua se encuentra saturada de carbonato de calcio, es decir que esta no tiende a formar incrustaciones ni corrosión en las estructuras metálicas. Si pH es menor a pH_s, el agua tiene tendencia corrosiva. Si pH es mayor a pH_s, el agua tiene tendencia incrustante.

$$\text{ÍNDICE DE LANGELIER} = pH - pH_s$$

$$pH_s = I \text{ alc} + I \text{ dur. cal.} + I \text{ sol. dis.}$$

Dónde:

I alc. = índice de alcalinidad del agua.

I sol. dis. = índice de sólidos disueltos.

I dur. cal. = índice de dureza cálcica.

El índice de Ryznar permite cuantificar el la tendencia del agua, permitiéndonos tener un criterio de agresividad del agua.

$$\text{ÍNDICE DE RYZNAR} = 2pH_s - pH$$

Tabla 1.4. 1 Índice de Ryznar

ÍNDICE DE RYZNAR	TENDENCIA DEL AGUA
4 - 5	Muy incrustante
5 - 6	Ligeramente incrustante
6 - 7	Ni incrustante ni corrosiva
7 - 7,5	Ligeramente corrosiva
7,5 - 9	Muy corrosiva
9	Excesivamente corrosiva

CAPÍTULO II

Parte Experimental

CAPÍTULO II

2.1 MUESTREO

El muestreo fue realizado en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua de la empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A la cual cuenta con su propia toma de agua en el Río Esmeraldas, en la planta de tratamiento el agua cruda se potabilizada para el consumo interno y ablandada para ser utilizada en la generación de vapor necesaria para los procesos de secado, maceración, prensa.

El muestreo tiene por objeto conocer la variabilidad que existe en la calidad de agua con la cual se alimenta a la caldera para la generación de vapor mediante el análisis de los parámetros que tienen mayor impacto respecto a los daños que pueden causar a las estructuras de la caldera. Las especificaciones de la calidad del agua de alimentación de la caldera vienen establecidos en el manual de operación de esta caldera desarrollado por la empresa Bremer & Filhos, empresa que diseñó y construyó dicha caldera especialmente para esta empresa, en dicho manual se especifican los límites máximos permisibles y los rangos de los parámetros del agua a analizar, de tal manera que se obtenga agua de alimentación con la calidad requerida.

El muestreo tiene su base técnica y científica en las normas ASTM D 510 referente al muestreo para aguas industriales y ASTM D 860 referente a muestreo de aguas de calderos.

Una vez establecida la variabilidad de la calidad del agua analizada se procederá a identificar los parámetros del agua que deben ser mejorados y el modo más adecuado para hacerlo.

La información recogida es reportada en cuadros en los cuales se especifica la fuente, propiedades medidas, límites permisibles según la norma de tal manera que se pueda realizar un análisis comparativo entre los datos recolectados y los estándares de la norma determinando de esta manera el estado actual de la planta y posteriormente los cálculos para la optimización de la misma.

La información adicional de la investigación se obtendrá a través de entrevistas con personas que conocen y operan el sistema de tratamiento de agua, revisión de manuales y catálogos de los equipos que forman parte del sistema. A fin de que se facilite el análisis comparativo de los datos, y la determinación de la condición actual de la planta así como el dimensionamiento y la optimización del Sistema de Tratamiento, todos los datos recolectados se los registrara en cuadros diferentes para cada punto de muestreo.

2.2 METODOLOGÍA

Para el diagnóstico inicial del sistema de tratamiento de agua se hicieron determinaciones *in situ* de parámetros como pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos, dichos valores se determinaron mediante un conductímetro, mientras que los análisis complementarios como sílice, hierro y cloro se los realizó en el área de la empresa dedicada al análisis de aguas mediante el uso de los equipos disponibles y los métodos de titulación se utilizaron para la determinación de la dureza y alcalinidad.

Antes de realizar los análisis físico-químicos del agua, se realizó la medición de los caudales que maneja el sistema, realizando cada hora la lectura de los medidores de agua

instalados a lo largo del sistema, de este modo se pudo conocer que el sistema mantiene caudales constantes de operación por lo que cualquier momento es adecuado para tomar muestras representativas.

Para poder elaborar el plan de muestreo y de esta manera obtener muestras representativas se tomaron en cuenta dos consideraciones importantes, la primera es que se realizan dos bombeos diarios del agua del río Esmeraldas para abastecer a la cisterna a partir de la cual se toma el agua para realizar su potabilización y posteriormente el ablandamiento de la misma, la segunda es que el agua de alimentación de la caldera se obtiene mezclando el agua a la salida del ablandador con el condensado. Por lo cual para conocer la variación de la calidad del agua a lo largo del sistema se tomaron muestras del agua bombeada del Río Esmeraldas, agua potabilizada, agua ablandada, condensado, agua de alimentación y agua de purga. Se tomó una muestra diaria de agua durante 18 días, las muestras fueron tomadas en los puntos mencionados que son claves para el control de la calidad del agua que permiten conocer como varía la calidad de la misma a medida que recorre el sistema.

En el muestreo se usaron botellas de plástico, uno para cada punto en que se tome la muestra tomando en cuenta consideraciones como:

Las muestras se tomaron directamente de la fuente.

Es necesario dejar correr el agua de la fuente por unos segundos para antes de tomar la muestra.

Antes de llenar el envase con una determinada muestra este debe enjuagarse tres veces con la misma muestra.

Llevar registro de cada muestra que se recolecta, identificando cada frasco que la contenga para evitar confusiones en el análisis.

2.2.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS

2.2.1.1 MÉTODOS

Tabla 2.2.1.1. 1Descripción de los Métodos de Análisis

DETERMINACIÓN	MÉTODO	DESCRIPCIÓN
pH	Electrométrico	STANDARD METHODS 4500- H ⁺ B
CONDUCTIVIDAD	Electrométrico	STANDARD METHODS 2510
OXÍGENO DISUELTO	Colorimétrico	MÉTODO: ASTM D 888
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS	Electrométrico	ASTM D6301
TURBIEDAD	Turbidímetro	STANDARD METHODS 2130-B
DUREZA	Volumétrico	STANDARD METHODS 2340
HIERRO	Colorimétrico	APHA 124A
SÍLICE ALTA	Colorimétrico	ASTM 859 D
SÍLICE BAJA	Colorimétrico	ASTM 859 B
ALCALINIDAD	Volumétrico	ASTM D1067
SULFITOS	Volumétrico	ASTM D1339 C
CAUDAL	Práctico	Lectura en los medidores

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

2.2.1.2 TÉCNICAS

2.2.1.2.1 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO pH

MÉTODO: STANDARD METHODS 4500- H⁺ B

CONCEPTO

El pH es un parámetro que permite conocer la acidez o alcalinidad del agua, este parámetro puede tomar valores comprendidos entre 1 a 14. Cuando el pH del agua toma valores menores a 7 se considera ácida, cuando es igual a 7 se considera neutra y cuando toma valores superiores a 7 se considera como básica.

REACTIVOS

- Agua destilada
- Agua Problema

PROCEDIMIENTO

- Calibrar el pH-metro con solución patrón.
- Colocar un volumen de muestra en un vaso de vidrio limpio.
- Sumergir el electrodo en la muestra realizando una agitación suave y esperar hasta la estabilización de la lectura.
- Anotar el valor de la lectura.

CÁLCULO

Lectura directa

2.2.1.2.2 DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

MÉTODO: STANDARD METHODS 2510

INTRODUCCIÓN

La conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir corriente directamente relacionada con la concentración de sustancias ionizadas en el agua. Se usa corriente para determinar la pureza del agua desmineralizada y los sólidos totales disueltos

Debido a la conductancia tan alta que tienen por unidad de peso los iones hidrógeno u óxido, como en el caso de las calderas se acostumbra casi siempre a neutralizar las muestras antes de medir la C E. con el fin de evitar lecturas erróneas demasiado altas. Entonces la determinación de la conductividad se puede relacionar con la concentración de STD.

REACTIVOS

- Agua destilada
- Agua Problema

MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD:

Encender el equipo y realizar la lectura de la conductividad. Si la conductividad de la muestra es más alta de 20000 micromhos por centímetro la dilución es necesaria. Enjuagar electrodo con agua desmineralizada o destilada.

CÁLCULO

Lectura directa de la conductividad en microsiemens.

2.2.1.2.3 DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO EN AGUA (D.O)

MÉTODO: ASTM D 888

MÉTODO COLORÍMETRO DEL ÍNDIGO CARMÍN:

Este método se aplica a aguas que contienen menos de 0,06 ppm de oxígeno disuelto, tales como vapor condensado y agua de alimentación a calderas desaireadas.

REACTIVOS

- Patrones de color: Soluciones stock de la siguiente manera
- Patrón de color rojo # CS-A
- Patrón de color amarillo # CS-B
- Patrón de color azul # CS-C
- HCl (gravedad específica 1,19) concentrado.
- HCl (1+99) mezcle un volumen de HCl concentrado (gravedad específica 1,19) con 99 volúmenes de agua
- Solución de Índigo Carmín.
- Reactivo de índigo carmín.
- Solución de KOH.- Disuelva 530 g de KOH en agua y diluya a 1 litro.

PROCEDIMIENTO

Coloque la bureta directamente encima del Nessler, de modo que la punta de la misma, penetre una profundidad en la muestra fluyente de unos 13mm.

Llene la bureta con el reactivo de índigo carmín KOH más o menos hasta 1 ml, encima de la marca cero. Drénela hasta el cero dentro de la muestra fluyente y deje que fluya 1

minuto más. Saque el tubo del Nessler suavemente a fin de no introducir burbujas de aire. No saque el Nessler del cubo de muestreado. Rápidamente introduzca 0,8 ml de solución alcalina de índigo carmín desde la bureta dentro de la muestra en el tubo de Nessler.

Si emplea la botella BOD añada 4 ml del reactivo. Levante la bureta encima del Nessler, e inmediatamente tape el Nessler firmemente con tapón de vidrio apenas engrasado, teniendo cuidado de no incluir burbujas de aire.

Vierta el Nessler varias veces para mezclar. Se desarrollará un color indicador de la concentración del oxígeno disuelto. Coloque el Nessler en una superficie blanca y compruebe su color con los patrones previamente preparados, viéndolos en un ángulo de 45°C, empleando una lámpara fría de luz blanca para la iluminación. Una mejor comparación puede obtener, empleando una serie de tres lámparas con dos “DELUXE” y una “DEYLITE”, fluorescentes, con un vidrio de ópalo debajo de los tubos o vasos de muestra.

La coloración debe ser comparada inmediatamente tan pronto como sea posible, luego de la mezcla de la muestra y reactivo, ya que el color no es estable por más de 30 minutos, el aire puede causar cambio de color.

PRECISIÓN

La precisión de éste método puede expresarse:

$$S_o = 0,052 * X + 0,7$$

S_o = precisión de un solo operador

X = concentración de D. O. ppm

Tabla 2.2.1.2.3. 1Soluciones stock para determinación de oxígeno-Disuelto

Equivalente a oxígeno Disuelto	Milímetros de estándares de color		
	CS-A	CCS-B	CS-C
0	0,75	35	-
0,005	5	20	-
0,01	6,25	12,5	-
0,015	9,4	10	-
0,02	13	6,4	-
0,025	14,4	3,8	-
0,03	14,6	3,3	0,2
0,035	15,1	2,9	1,1
0,04	15,5	2,4	2,2
0,045	16,1	2	2,8
0,05	18,3	1,7	8,1
0,055	21,7	1,4	13,1
0,06	25	1	18

2.2.1.2.4 DETERMINACIÓN DE TURBIDEZ

STANDARD METHOD 2130-B

Mide la intensidad de color en el agua, debido a impurezas, las cuales pueden ser de naturaleza orgánica como grasas, aceites o de naturaleza inorgánica como arcillas, calcio, etc.

La turbidez del agua se debe a la presencia de sólidos suspendidos que están dispersos en ella, tales como arcilla, limo, materia orgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos, provocando una reducción de su transparencia. Por lo tanto, la medición de la turbidez indica el grado de opacidad o dispersión de la luz a causa de los

sólidos suspendidos. Se debe entender que la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica de una muestra, que hace que los rayos luminosos se dispersen y se absorban, en lugar de que se transmitan en línea recta a través de ella.

REACTIVO

- Agua destilada
- Agua problema

PROCEDIMIENTO

Colocar el volumen adecuado de muestra en la celda.

Coloque en un vaso de vidrio limpio un volumen de muestra suficiente como para cubrir al electrodo de vidrio.

Colocar la celda en el Turbidímetro

Anote el valor de la lectura en el protocolo de trabajo.

CÁLCULO

Lectura directa

2.2.1.2.5 DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD

MÉTODO: ASTM D1067

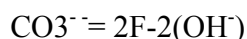
PRINCIPIO DEL MÉTODO:

La alcalinidad del agua está constituida por hidróxidos (OH), Carbonatos (CO₃) y Bicarbonatos (HCO₃). Este método se basa en la titulación con ácido sulfúrico 0,02 N usando dos indicadores: fenolftaleína y anaranjado de metilo este sustituible por el indicador mixto (verde bromocresol y rojo de metilo).

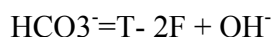
Tabla 2.2.1.2.5. 1Relación de la alcalinidad

Resultado de la Titulación	Alcalinidad de hidróxido en CaCO ₃	Alcalinidad de carbonato en CaCO ₃	Alcalinidad de bicarbonato en CaCO ₃
F= 0	0	0	M
F< 1/2T	0	2F	M-2F
F= 1/2T	0	2F	0
F > 1/2T	2F -T	2(T-F)	0
F= T	T	0	0

M = Alcalinidad Total



F = Alcalinidad a la fenolftaleína



Cálculo de alcalinidad expresada como carbonato de sodio. Las alcalinidades obtenidas de cálculos anteriores multiplicar por 1,06

2.2.1.2.6 DETERMINACIÓN DE DUREZA

MÉTODO: STANDARDMETHODS 2340

PRINCIPIO DEL MÉTODO

Esta prueba está basada en la determinación del contenido total de Ca y Mg de una muestra por titulación con un agente orgánico secuestrante (EDTA,) cuyo pH se he amortiguado (Buffer) formando un quelato complejo soluble (complexometría) en la presencia de un colorante orgánico (Eriocromo Negro) que sirve como indicador, sensitivo a los iones Ca y Mg El punto final ocurre cuando el calcio y el magnesio han sido secuestrados y se produce un cambio de color del rojo vino al azul.

Titulando una segunda alícuota de la muestra en presencia de otro indicador (Murexide) y otro amortiguador de PH (NaOH) se determina por separado la Dureza Cálcica. La

diferencia entre la Dureza Total y la dureza debida al Calcio representa la dureza magnésica.

PROCEDIMIENTO "DUREZA TOTAL":

Tomar 50 mL de muestra.

Adicionar 2-3 mL de solución Buffer.

Adicionar 0,2 – 0,3 gramos de indicador sólido de "Eriocromo negro T"

Titular con solución de EDTA (etilendiaminotetraacético) (1 mL = 1 mg de CaCO₃).

CÁLCULOS:

Dureza Total ppm de CaCO₃ = Volumen de EDTA usado x20

PROCEDIMIENTO "DUREZA CÁLCICA"

Tomar 50 mL de muestra.

Adicionar 2 mL de (NaOH) Hidróxido de sodio 1N

Adicionar 0 2-0,3 gramos de polvo indicador de "Murexide"

Titular con solución de EDTA (etilendiaminotetraacético) (1 mL = 1 mg de CaCO₃).

CÁLCULOS:

Dureza Cálicappm CaCO₃ = Volumen de EDTA usado x20

PROCEDIMIENTO "DUREZA MAGNÉSICA"

Esta dureza se obtiene restando la Dureza Cálcica de la Dureza Total.

Dureza Magnésica en ppm de CaCO₃ = Dureza total – Dureza cálcica

2.2.1.2.7 DETERMINACIÓN DE HIERRO

MÉTODO: APHA 124A

PRINCIPIO DEL MÉTODO:

Para determinar el hierro total, el hierro férrico se convierte a ferroso solubilizado con ácido y se reduce con Clorhidrato de Hidroxilamina para formar un complejo de color rojo naranja con 1,10 Fenantrolina. La intensidad de color producida es proporcional a la cantidad de hierro ferroso en el agua, que es medida espectrofotométricamente. Con la lectura obtenida y usando la curva de calibración para hierro se determina su contenido en ppm.

REACTIVOS:

- Solución De Hidroxilaminasolución Buffer De Acetato De Amonio: Disolver 250 gramos de $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ en 150 mL de agua destilada. Adicionar 700 mL de ácido acético (Glacial) concentrado.
- Solución De Fenantrolina: Disolver 106 miligramos de 1.10-Fenantrolina Monohidratada en 100 mL de agua destilada bajo agitación, calentar hasta 80°C , no hervir la solución. Descartar la solución si es oscura. El calentamiento no es necesario si 2 gotas de HCl concentrado son adicionadas al agua destilada.
- Solución Stock De Hierro (Sulfato Amonio Ferroso): Adicionar 20 mL de ácido sulfúrico concentrado a 50 mL de agua destilada, pero lentamente; luego disolver 1,40 g de sulfato ferroso de amonio. Adicionar gota a gota permanganato de potasio

0,1N hasta un ligero color rojo. Finalmente diluir con agua libre de hierro hasta 100mL y mezclar.

PROCEDIMIENTO:

Tomar 50 mL de muestra en un frasco de Erlenmeyer de 125 mL.

Adicionar 2mL de HCl concentrado.

Adicionar 1 mL de solución de Hidroxilamina.

Adicionar varias perlas de vidrio y evaporar hasta que tengamos un volumen de 20mL de muestra.

Enfriar a temperatura ambiente y transferir a un frasco volumétrico de 100mL.

Adicionar 10mL de acetato de amonio (búffer) y 2 mL de solución de Fenantrolina.

Diluir hasta la marca con H₂O destilada.

Mezclar completamente y permitir reposar por diez minutos para desarrollar color.

Pasar a una celda del espectrofotómetro y realizar la lectura con una longitud de onda de 510nm.

Esta lectura se compara en la curva de calibración y se observan los ppm resultantes.

Correr un blanco con agua destilada y encerrar el aparato.

2.2.1.2.8 SÍLICEALTA

MÉTODO: ASTM 859-D(AGUAS CRUDA, CLARIFICADA Y DE CALDERAS, 0 a 50 ppm)

INTRODUCCIÓN:

La sílice existe normalmente como óxido (SiO_2) o como silicato (SiO_3 y SiO_2). Es el elemento en segundolugar en abundancia en la naturaleza y está presente en la mayoría de las aguas. No tiene efectos tóxicos conocidos y se usa para formar recubrimientos interiores protectores en tuberías para inhibir la corrosión.

La determinación de cantidades del orden de trazas de sílice ha llegado a ser muy importante en la operación de plantas de producción de energía eléctrica por vapor. La sílice en el agua de alimentación de las calderas puede recubrir las aspas de las turbinas y disminuir la eficiencia del intercambio de calor.

REACTIVOS:

- Solución de ácido clorhídrico (1:49)
- Solución de molibdato de amonio
- Solución de sulfito de sodio (170g/litro):
- Agua destilada

PROCEDIMIENTO:

Tomar 10ml de muestra o estándar.

Adicionar con agitación 5ml de solución de ácido clorhídrico (1:49)

Adicionar 5ml de solución de molibdato de amonio.

Permitir estabilizar la mezcla por un minuto.

Adicionar 10ml de solución de sulfito de sodio, mezclar bien.

Permitir que la p mezcla se estabilice por unos 5 minutos.

Llevar la mezcla a una celda del espectrofotómetro y realizar la lectura usando una longitud de onda de 820nm.

Ajustar el cero con agua destilada y con los mismos reactivos con volúmenes iguales.

Solución de sulfito de sodio (170g/litro): disolver 170 gramos de sulfito de sodio, enagua y diluir en 1 litro.

2.2.1.2.9 SÍLICE BAJA

MÉTODO: ASTM 859 B (AGUAS DEMINERALIZADA Y CONDENSADO) 0.1 ppm - 10ppm.

PRINCIPIO DEL MÉTODO:

Es el color azul que desarrolla la sílice soluble en presencia del ión molibdato usando como agente reductor ácido 1 amino-2naptol-4 sulfónico. El color se lee fotométricamente y se obtiene una lectura que por medio de un gráfico de calibración se determina el contenido de sílice en la muestra.

REACTIVOS:

- Ácido Clorhídrico
- Molibdato De Amonio

- Solución De Acido Oxálico (100 G/L)
- Solución De Ácido Amino Naptol Sulfónico
- Solución Estándar De 5,0 Ppm De Sílice
- Ácido Clorhídrico (L+49)

PROCEDIMIENTO:

Tomar 10ml de muestra o estándar.

Adicionar con agitación 5ml de solución de ácido clorhídrico (1+49)

Adicionar 5ml de solución de molibdato de amonio.

Permitir estabilizar la mezcla por un minuto.

Adicionar 10ml de solución de sulfito de sodio, mezclar bien.

Permitir que la mezcla se estabilice por 5 minutos.

Llevar la mezcla al espectrofotómetro y realizar la lectura utilizando una longitud de onda de 820nm.

Ajustar el cero con agua destilada y con los mismos reactivos, con reactivos iguales.

2.2.1.2.10 SULFITOS

MÉTODO: ASTM D 1339 C

Con frecuencia el sulfito se encuentra en aguas de calderas y aguas de alimentación donde normalmente es usado como químico inhibidor de corrosión. Este método tiene como principio la oxidación del sulfito de sodio de una muestra acidificada valorando con una

solución de yodato de potasio en presencia de un indicador de almidón y un exceso de yoduro de potasio.

REACTIVOS:

- Solución de yoduro de potasio
- Solución indicadora de almidón
- EDTA
- Ácido clorhídrico
- Yodato de potasio.

PROCEDIMIENTO:

Mezclar 5mL de ácido clorhídrico con 5mL de agua en una matraz erlenmeyer de 250mL.

Adicionar 10mL de muestra estabilizada con EDTA.

Colocar 1mL de solución de almidón.

Colocar 5mL de yoduro de potasio.

Titular con yodato de potasio hasta color azul (a).

Correr un blanco con agua destilada y yodato de potasio (b).

CÁLCULO

$$ppm SO_3^- = 6,35 (a - b)$$

2.3 DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se detallan los análisis realizados a los diferentes tipos de agua del sistema:

2.3.1 DIAGNÓSTICO

Para la realización del diagnóstico inicial del sistema de tratamiento y por tanto de la calidad de agua que se obtiene se realizaron observaciones y entrevistas con el personal a cargo del mantenimiento de la misma, de lo que se puede concretar lo siguiente:

2.3.1.1 PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA

En la planta potabilizadora del agua cruda se dan los procesos de floculación y cloración de dicha agua, esta planta cuenta con un tanque rectangular construido en acero al carbono, filtro de arena vertical de 5 pies, un tanque plástico de agua tratada de 1300 litros, tablero eléctrico de control, bomba dúplex dosificadoras de químicos, bombas centrífugas de alimentación.

La planta potabilizadora de agua produce 80 metros cúbicos cada día, presenta un buen funcionamiento y produce agua de buena calidad para el consumo humano.

2.3.1.2 SISTEMA DE ABLANDAMIENTO

Luego de que el agua es clarificada y potabilizada esta pasa al sistema de suavizamiento que consta de un ablandador, su respectivo tanque de salmuera para la regeneración y su regenerador automático. El ablandador tiene configuración vertical y en su interior contiene la resina catiónica PROLITE C-100 que permite la suavización del agua potabilizada que posteriormente se va a mezclar con el condensado recuperado.

La regeneración de la resina se realiza utilizando solución de salmuera que debe estar entre el 5% al 20% para que se dé una buena regeneración, al realizar la inspección del tanque de salmuera se observa que esta presenta sal sin disolver en el fondo del mismo lo que hace presumir que la concentración de sal en dicho tanque no tiene la concentración requerida para realizar una regeneración eficiente.

Al realizar el análisis diario de la dureza a la salida del ablandador se observa que la dureza que debería mantenerse en cero no lo hace causando problemas de incrustaciones en la caldera ya que disminuye la calidad del agua de alimentación que tiene la caldera. El ablandador tiene dimensiones de 30"x72" es decir, de 0,762 metros de diámetro por 1,83 metros de altura. El ablandador produce 4,5 metros cúbicos de agua por hora.

2.3.1.3 POZO DE MEZCLA AGUA ABLANDADA MÁS AGUA DE CONDENSADO.

En este pozo se da la mezcla entre el agua ablandada y el agua de condensado, dicha mezcla posteriormente se va a bombear hacia una cisterna y a un tanque elevado que será el abastecimiento permanente de agua de la caldera.

2.3.1.4 TANQUE DE AGUA DE ALIMENTACIÓN

En este tanque se da la inyección de los químicos que van a permitir que el agua no afecte las estructuras de la caldera ya que en este tanque se inyecta; secuestrante de oxígeno, inhibidor de corrosión, reguladores de pH y dispersantes. El tanque de alimentación del caldero Bremer tiene una capacidad de 4,98 m³, mientras que el tanque de alimentación del caldero Siller tiene una capacidad de 7,068 metros cúbicos.

El sistema de tratamiento cuenta con cuatro cisternas en las cuales el agua cruda y el agua tratada son almacenadas de forma separada a medida que avanza en el tratamiento. Cabe destacar que no existe una persona capacitada técnicamente que lleve el control diario de los parámetros del agua y que regule la dosificación de los químicos que a diario son inyectados al agua. El caldero Siller es utilizado solamente cuando hay producción especial de tableros, es decir cuando los requerimientos de vapor son mayores.

2.3.1.5 CALDERO BREMER HBFS 6.5

Este caldero es especialmente diseñado para esta empresa que su fuente de combustible son los residuos de madera generados durante el proceso de fabricación de los tableros que son triturados y llenados a un silo que alimenta constantemente a la cámara de combustión de la caldera a través de un sistema automático de tornillos sin fin.

Debido a la calidad de agua que alimentaba a la caldera esta presentó problemas de incrustaciones en su estructura interna, específicamente en la superficie externa de los tubos en donde se da la transferencia de calor ya que esta es una caldera pirotubular por lo que fue necesaria la limpieza química para mejorar su funcionamiento.

2.3.2 DATOS

Tabla 2.3.2. 1 Análisis físico-químico del agua del río

DÍA	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)	DT(ppm CaCO ₃)	Fe (ppm)	Si (ppm)
1	26,00	8,54	200,00	100	114	0,03	46,74
2	25,00	8,08	220,00	110	84	0,06	22,99
3	24,00	7,07	300,00	140	89	0,09	15,58
4	26,00	8,29	340,00	170	101	0,12	31,16
5	25,00	8,60	280,00	140	88	0,15	2,66
6	24,00	6,79	360,00	170	93	0,18	26,6
7	24,00	7,83	250,00	120	72	0,07	32,87
8	24,00	8,40	210,00	100	83	0,13	35,91
9	27,00	8,12	190,00	100	98	0,14	17,1
10	25,00	8,82	230,00	110	80	0,09	7,6
11	25,00	7,02	270,00	130	93	0,08	3,8
12	27,00	6,90	350,00	140	76	0,12	29,64
13	25,00	7,15	370,00	180	98	0,09	20,14
14	24,00	7,90	320,00	150	100	0,08	33,82
15	26,00	8,20	250,00	120	135	0,10	33,44
16	27,00	7,30	270,00	130	103	0,12	24,32
17	25,00	7,90	330,00	160	90	0,15	24,13
18	27,00	8,60	290,00	140	78	0,18	25,821
PROMEDIO	25,3	7,8	279,44	133,89	91	0,11	12,70

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.2. 2Análisis físico-químico del agua potable

DÍA	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)	DT (ppm CaCO ₃)	Fe (ppm)	Si (ppm)	TURB NTU
1	26,00	8,54	204,00	102	114	0,03	46,733	1
2	25,00	8,08	225,00	113	84	0,06	22,99	0
3	24,00	7,07	320,00	160	89	0,09	15,58	0
4	26,00	8,29	315,00	158	101	0,12	31,16	1
5	25,00	8,60	282,00	141	88	0,15	2,66	1
6	24,00	6,79	336,00	168	93	0,18	26,6	0
7	24,00	7,83	230,00	115	72	0,07	32,87	1
8	24,00	8,40	270,00	135	83	0,13	35,91	0
9	27,00	8,12	198,00	99	98	0,14	17,1	0
10	25,00	8,82	225,00	113	80	0,09	7,6	0
11	25,00	7,02	263,00	132	93	0,08	3,8	1
12	27,00	6,90	334,00	167	76	0,12	29,64	0
13	25,00	7,15	366,00	183	98	0,09	20,14	1
14	24,00	7,90	308,00	154	100	0,08	33,82	1
15	26,00	8,20	240,00	120	135	0,10	33,44	0
16	27,00	7,30	259,00	130	103	0,12	24,32	0
17	25,00	7,90	301,00	151	90	0,15	24,13	0
18	27,00	8,60	288,00	144	78	0,18	25,82	1
PROMEDIO	25,33	7,86	275,78	138	91	0,11	24,13	0,44

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.2. 3Análisis físico-químico del agua ablandada

DÍA	T (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)	DT(ppm CaCO ₃)	Fe(ppm)	Si(ppm)
1	26	8,55	200,00	100	62,00	0,03	46,711
2	26	8,10	215,00	108	14,00	0,06	22,99
3	25	7,09	317,00	159	2,00	0,08	15,58
4	27	8,31	270,00	135	4,00	0,10	31,16
5	25	8,55	250,00	125	0,00	0,11	2,66
6	24	6,75	324,00	162	6,00	0,15	26,6
7	26	7,80	227,00	114	20,00	0,06	32,87
8	24	8,42	300,00	150	0,00	0,11	35,91
9	27	8,15	146,00	73	5,60	0,12	17,1
10	25	8,80	225,00	113	12,80	0,08	7,6
11	25	7,07	260,00	130	2,80	0,07	3,8
12	26	6,80	328,00	164	5,60	0,11	29,64
13	25	7,17	280,00	140	42,00	0,08	20,14
14	24	7,85	301,00	151	103,60	0,07	33,82
15	26	8,20	227,00	114	40,00	0,90	33,44
16	27	7,33	259,00	130	22,00	0,10	24,32
17	25	7,87	285,00	143	0,00	0,12	24,13
18	27	8,65	260,00	130	6,60	0,15	25,821
PROMEDIO	26	7,86	259,67	130	19,39	0,14	24,13

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.2. 4Análisis físico-químico del agua de alimentación

DÍA	T (°C)	pH	CE (μ S/cm)	STD (ppm)	DT (ppm CaCO ₃)	Fe (ppm)	Si (ppm)	O.D (ppm)
1	60	8,55	530	265	6,00	0,09	24,6	0,00
2	62	8,45	440	220	10,0	0,07	12,1	0,00
3	64	8,60	510	255	4,0	0,09	8,2	0,00
4	57	8,31	540	270	6,0	0,11	16,4	0,00
5	60	8,55	500	250	4,0	0,12	1,4	0,00
6	61	8,75	570	285	10,0	0,16	14	0,00
7	62	8,80	570	285	16,0	0,07	17,3	0,00
8	66	8,42	530	265	12,0	0,12	18,9	0,00
9	64	9,15	410	205	8,0	0,03	9	0,00
10	62	8,80	440	220	40,0	0,09	4	0,00
11	61	9,07	490	245	14,3	0,08	2	0,00
12	57	8,80	570	285	8,0	0,12	15,6	0,00
13	62	9,17	590	295	9,0	0,09	10,6	0,00
14	57	8,85	540	270	40,0	0,08	17,8	0,00
15	62	9,10	460	230	22,9	0,01	17,6	0,00
16	59	8,35	470	235	9,4	0,11	12,8	0,00
17	63	8,87	550	275	4,7	0,13	12,7	0,00
18	60	9,15	500	250	2,3	0,06	13,59	0,00
PROMEDIO	61,06	8,76	511,67	255,83	12,6	0,08	12,70	0,00

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.2. 5 Análisis físico-químico del condensado

DÍA	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (ppm)	DT (ppm CaCO_3)	Fe (ppm)
1	86	8,3	70	35	4,00	0,00
2	89	8,5	10	5	6,00	0,01
3	88	8,8	0	0	4,00	0,00
4	87	8,6	0	60	2,00	0,00
5	86	9	20	10	2,00	0,01
6	88	9,5	90	45	9,92	0,00
7	86	8,9	0	0	6,00	0,00
8	87	9,11	0	65	4,00	0,01
9	89	9,2	70	35	2,00	0,02
10	89	8,75	90	45	10,00	0,00
11	86	8,8	0	0	5,68	0,00
12	88	9,1	10	5	6,00	0,00
13	88	9,3	10	5	14,00	0,00
14	86	8,56	10	5	5,56	0,01
15	86	8,7	0	0	9,23	0,00
16	86	9,3	20	10	6,78	0,00
17	87	9,2	30	15	2,30	0,00
18	87	8,9	50	25	0,90	0,00
PROMEDIO	87,17	8,92	26.67	13.33	5,58	0,00

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.2. 6Análisis físico-químico del agua de la purga

DÍA	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	STD (ppm)	Fe (ppm)	Si (ppm)	Alc. M (ppm CaCO_3)	Sulfito Residual	Alc. OH (ppm CaCO_3)
1	81	11,12	9180	4590	0,40	122,00	200	40	156
2	77	10,58	11080	5540	0,98	125,00	200	37	122
3	73	10,22	10100	5050	0,82	118,80	200	49	298
4	69	10,22	8650	4325	0,80	140,00	142	39	274
5	78	10,23	10210	5105	2,00	180,00	116	34	100
6	84	9,63	12410	6205	0,02	185,00	164	30	272
7	85	11,01	8850	4425	2,00	146,00	272	46	232
8	76	10,45	7400	3700	0,69	151,00	200	31	190
9	73	10,81	9720	4860	0,82	128,70	176	46	166
10	86	9,46	9120	4560	3,90	175,00	200	47	200
11	80	10,23	10120	5060	2,00	170,80	262	33	200
12	70	10,91	9720	4860	0,69	134,80	232	34	160
13	80	10,03	8430	4215	0,76	130,47	200	48	256
14	79	10,97	7500	3750	0,84	126,14	326	45	314
15	72	10,14	9220	4610	0,91	140,00	500	41	372
16	86	10,35	7900	3950	0,98	135,00	200	43	410
17	82	10,43	8365	4182,5	0,60	128,00	568	42	420
18	80	11,67	8805	4402,5	0,23	122,00	282	45	440
PROMEDIO	78,39	10,52	9265,56	4632,78	1,08	142,15	246,67	40,56	254,56

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

2.3.3 PARÁMETROS FUERA DE NORMA

A continuación se comparan parámetros medidos con las especificaciones del agua por parte del fabricante para establecer el cumplimiento de la misma:

Tabla 2.3.3.1 Dureza promedio a la salida del ablandador

PARÁMETRO	UNIDAD	DETERMINACIÓN PROMEDIO	LÍMITE SUGERIDO	CONDICIÓN
DUREZA	ppm CaCO ₃	19,39	0,0 - 5	NO CUMPLE

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 2.3.3.2 Límites normativos para el agua de alimentación

PARÁMETRO	UNIDAD	DETERMINACIÓN PROMEDIO	LÍMITE	CONDICIÓN
pH	----	8,76	8,3 – 10,5	CUMPLE
CE	μS/cm	511,67	<300	NO CUMPLE
STD	ppm	255,83	<150	NO CUMPLE
DT	ppm	12,6	<1	NO CUMPLE
Fe	ppm	0,08	<0,1	CUMPLE
O.D	ppm	0,00	0,0	CUMPLE
SiO ₂	ppm	12,70	<50	CUMPLE
Sulfito Residual	ppm	40,56	30-60	CUMPLE

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Gráfico 2.3.3. 1 Parámetros fuera de norma agua de alimentación

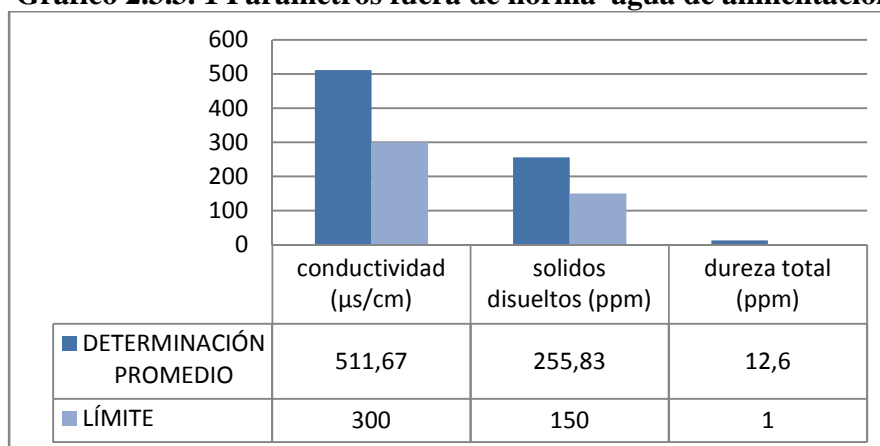


Tabla 2.3.3.4 Límites normativos para el condensado

PARÁMETRO	UNIDAD	DETERMINACIÓN PROMEDIO	LÍMITE	CONDICIÓN
pH	----	8,92	8,8 – 9,20	CUMPLE
CE	μS/cm	26,67	<20	NO CUMPLE
DT	ppm CaCO ₃	5,58	<0,20	NO CUMPLE
Fe	ppm	0,00	<0,10	CUMPLE

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Gráfico 2.3.3. 2 Parámetros fuera de norma condensado

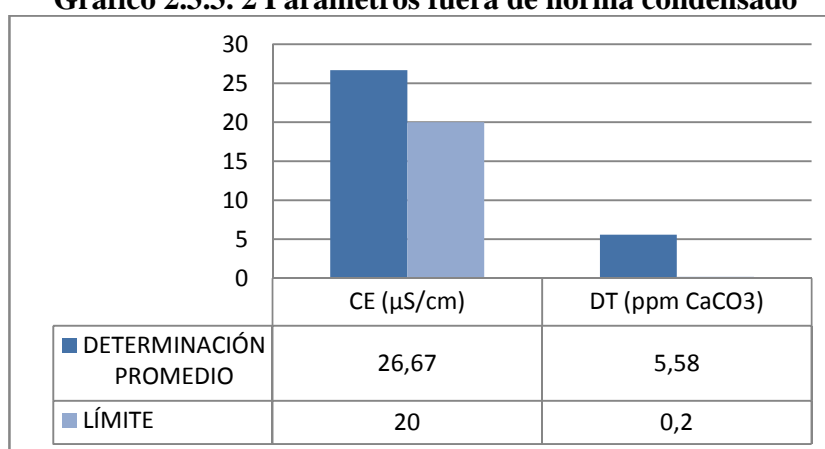
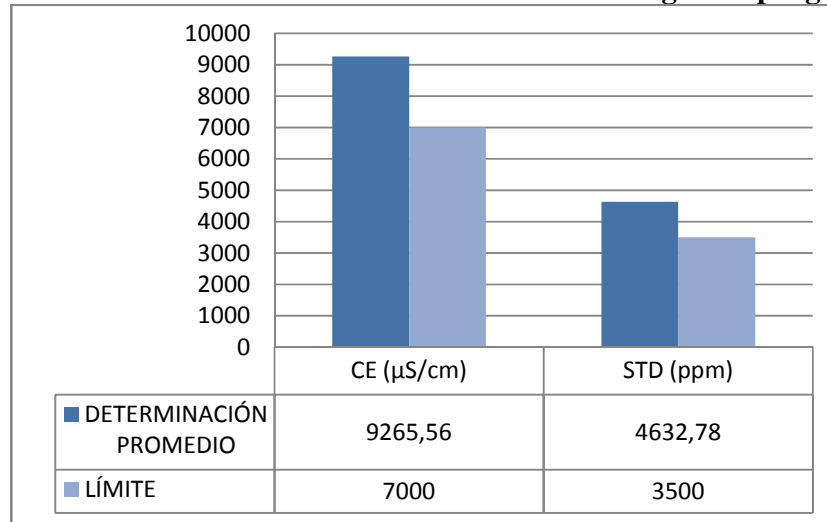


TABLA 2.3.3.5 Límites normativos para el agua de purga

PARÁMETRO	UNIDAD	DETERMINACIÓN PROMEDIO	LÍMITE	CONDICIÓN
pH	----	10,52	10,5–11,5	CUMPLE
CE	μS/cm	9265,56	<7000	NO CUMPLE
STD	ppm	4632,78	<3500	NO CUMPLE
Fe	ppm	1,08	<3,0	CUMPLE
SiO ₂	ppm	142,15	<150	CUMPLE
Alc. M	(ppm CaCO ₃)	246,67	<700	CUMPLE
Alc. OH	(ppm CaCO ₃)	254,56	200 - 450	CUMPLE

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Gráfico 2.3.3. 3 Parámetros fuera de norma en agua de purga



2.4. DATOS ADICIONALES

Tabla 2.4. 1 Datos adicionales

Diámetro del ablandador	30''
Longitud del ablandador	72''
Caudal de ablandamiento	5 m ³ /h
Producción de vapor caldera Bremer	6500Kg/h
Producción de vapor caldera Siller	4000Kg/h
Capacidad resina Purolite C-100	30,4Kilogramo/ft ³

CAPÍTULO III

Cálculos y Resultados

CAPÍTULO III

3.1 CÁLCULOS

3.1.1 BALANCE DE MASA PARA LAS CALDERAS

Las calderas de la empresa no cuentan con medidores de flujo de agua de alimentación, por lo que es necesario realizar el respectivo balance de masa para conocer dichos valores. Según los catálogos la caldera Bremer, esta tiene una producción nominal de 6500 kilogramos de vapor por hora (14332,5lb vapor/hora), mientras que la caldera Siller tiene una producción nominal de 4000 kilogramos de vapor por hora (8820lb vapor/hora). para la realización del balance de masa se toman en cuenta los anexos 8 y 9 respectivamente, quedando definido de la siguiente manera:

3.1.1.1 CÁLCULO DEL HP DE LAS CALDERAS

Por definición, 1 HP produce 34,5 lb vapor/hora entonces;

Ecuación 3.1.1.1.1

$$\text{HP Caldera} = \frac{\frac{\text{lb vapor nominal}}{h}}{34,5 \frac{\text{lb vapor}}{h \cdot \text{HP}}}$$

- **Para caldera Bremer**

$$\text{HP Caldera Bremer} = \frac{14332,5 \text{ lb vapor} / h}{34,5 \frac{\text{lb vapor}}{h \cdot \text{HP}}} = 415,43 \text{ HP}$$

- **Para caldera Siller**

$$\text{HP Caldera Siller} = \frac{8820 \text{ lb vapor} / h}{34,5 \frac{\text{lb vapor}}{h \cdot \text{HP}}} = 255,65 \text{ HP}$$

3.1.1.2 CÁLCULO DE LA ALIMENTACIÓN

Conociendo que la máxima cantidad de agua que puede evaporar 1HP caldera es 4,25 gal/hora entonces:

Ecuación 3.1.1.2.1

$$\text{Alimentación Caldera} = \text{HP Caldera} * 4,25 \frac{\text{gal}}{\text{HP} * \text{h}}$$

- **Para caldera Bremer**

$$\text{Alimentación Caldera Bremer} = 415,43 \text{ HP} * 4,25 \frac{\text{gal}}{\text{HP} * \text{h}}$$

$$\text{Alimentación Caldera Bremer} = 1765,58 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \approx 6683,45 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

- **Para caldera Siller**

$$\text{Alimentación Caldera Siller} = 255,65 \text{ HP} * 4,25 \frac{\text{gal}}{\text{HP} * \text{h}}$$

$$\text{Alimentación Caldera Siller} = 1086,51 \frac{\text{Gal}}{\text{h}} \approx 4112,88 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3.1.1.3 CÁLCULO DE PURGAS.

Este valor es el ideal cuando se tiene una buena calidad de agua, más adelante se detalla el control de las purgas en base a la calidad del agua según su estado actual.

Ecuación 3.1.1.3.1

$$\text{Purga} = \text{Alimentación} - \text{Vapor}$$

- **Para caldera Bremer**

$$\text{Purga} = 6683,45 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} - 6500 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Purga} = 183,45 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

- **Para caldera Siller**

$$\text{Purga} = 4112,88 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} - 4000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Purga} = 112,88 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3.1.1.4 CÁLCULO DEL CONSUMO TOTAL DE AGUA PARA LA ALIMENTACIÓN DE LAS CALDERAS.

Ecuación 3.1.1.4

Consumo Total Alimentación = Alimentación Bremer + Alimentación Siller

$$\text{Consumo Total Alimentación} = 1765,58 \frac{\text{gal}}{\text{h}} + 1086,51 \frac{\text{gal}}{\text{h}}$$

$$\text{Consumo Total Alimentación} = 2852,09 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \approx 10,80 \frac{m^3}{h}$$

3.1.1.5 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REPOSICIÓN EN FUNCIÓN DE LA SÍLICE PROMEDIO

Ecuación 3.1.1.5

$$\% \text{REPOSICIÓN} = \frac{\text{Sílice Alimentación} - \text{Sílice Condensado}}{\text{Sílice Reposición} - \text{Sílice Condensado}}$$

$$\%REPOSICIÓN = \left(\frac{12,70 - 0,19}{24,13 - 0,19} \right) \times 100$$

$$\%REPOSICIÓN = 52,26$$

3.1.1.6 CÁLCULO DEL CAUDAL REPOSICIÓN

Ecuación 3.1.1.6

$$\text{CAUDAL DE REPOSICIÓN} = \frac{\text{Consumo Total Alimentación} * \%REPOSICIÓN}{100}$$

$$\text{CAUDAL DE REPOSICIÓN} = \frac{10,80 \frac{m^3}{h} * 52,26}{100}$$

$$\text{CAUDAL DE REPOSICIÓN} = 5,64 \frac{m^3}{h}$$

Cabe mencionar que el ablandador produce normalmente 5 metros cúbicos por hora, es decir que no abastece el total del requerimiento de agua, lo cual se toma en cuenta para la segunda alternativa que se plantea.

3.1.1.7 CÁLCULO DE LA RECUPERACIÓN DEL CONDENSADO

Ecuación 3.1.1.7

$$\text{CONDENSADO} = \text{ALIMENTACIÓN} - \text{REPOSICIÓN}$$

$$\text{CONDENSADO} = 10,80 \frac{m^3}{h} - 5,64 \frac{m^3}{h}$$

$$\text{CONDENSADO} = 5,16 \frac{m^3}{h}$$

3.1.2 OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERAS

Esta alternativa está orientada a la minimización de los efectos perjudiciales que pueda causar una calidad de agua de alimentación de caldera que se encuentre fuera de parámetros de control, en este caso la dureza, conductividad y sólidos totales disueltos, para ello es necesario mejorar los tratamientos y dosificaciones que se dan a lo largo del sistema ya que estos procesos afectan sobre la calidad del agua que se suministra a la caldera.

En este caso se van a tomar acciones sobre el ablandador, el agua de alimentación y la purga de la caldera, estableciendo rutinas de control y dosificación de químicos para mejorar los parámetros del agua.

3.1.2.1 OPTIMIZACIÓN DEL ABLANDAMIENTO Y REGENERACIÓN.

La optimización del proceso de ablandamiento y regeneración tiene por objetivo reducir al máximo la cantidad de dureza que llega al agua de alimentación luego de su mezcla con el condensado. Para la realización de esta optimización se requiere conocer las características del ablandador.

3.1.2.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL ABLANDADOR

Ecuación 3.1.2.1.1

$$V_{AB} = \pi r^2 L_{AB}$$

$$V_{AB} = \pi(0,381m)^2(1,83m)$$

$$V_{AB} = 0,835 m^3$$

Dónde:

V_{AB} = Volumen del ablandador

L_{AB} = Longitud del ablandador

3.1.2.1.2 CÁLCULO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DEL ABLANDADOR

Ecuación 3.1.2.1.2

$$T_{RA} = \frac{V_{AB}}{Q_{AB}}$$

$$T_{RA} = \frac{0,835 \text{ m}^3}{5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$T_{RA} = 0,167\text{h} * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} = 10,02\text{min}$$

Dónde:

T_{RA} = Tiempo de residencia del ablandador

Q_{AB} = Caudal del ablandador

V_{AB} = Volumen del ablandador

3.1.2.1.3 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE SALMUERA PARA LA REGENERACIÓN.

Para el caso de la regeneración se realizaron pruebas con la resina propia del ablandador de la empresa, una vez agotada la resina Purolite C-100 fue sometida a diferentes concentraciones del regenerante, en este caso soluciones de cloruro de sodio al 5%, 10% y 20%. Estas determinaciones se las llevó a cabo en columnas de ablandamiento tomando 25

gramos de resina, simulando el tiempo de residencia dentro del ablandador. La muestra de agua tomada presenta una dureza de 135ppm para todos los casos.

Tabla 3.1.2.1.3. 1.- Prueba 1 de ablandamiento y regeneración

BURETA	REGENERACIÓN SOLUCIÓN NaCl	TIEMPO RESIDENCIA NaCl	LAVADO CON AGUA DESTILADA	TIEMPO RESIDENCIA MUESTRA	DUREZA FINAL MUESTRA
1	5%	10min	100mL	10min	2
2	10%	10min	100mL	10min	1,3
3	20%	10min	100mL	10min	0

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 3.1.2.1.3. 2 Prueba 2 de ablandamiento y regeneración

BURETA	REGENERACIÓN SOLUCIÓN NaCl	TIEMPO RESIDENCIA NaCl	LAVADO CON AGUA DESTILADA	TIEMPO RESIDENCIA MUESTRA	DUREZA FINAL MUESTRA
1	5%	10min	100mL	10min	1,8
2	10%	10min	100mL	10min	1,1
3	20%	10min	100mL	10min	0

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 3.1.2.1.3. 3 Prueba 3 de ablandamiento y regeneración

BURETA	REGENERACIÓN SOLUCIÓN NaCl	TIEMPO RESIDENCIA NaCl	LAVADO CON AGUA DESTILADA	TIEMPO RESIDENCIA MUESTRA	DUREZA FINAL MUESTRA
1	5%	10min	100mL	10min	2,1
2	10%	10min	100mL	10min	1,2
3	20%	10min	100mL	10min	0

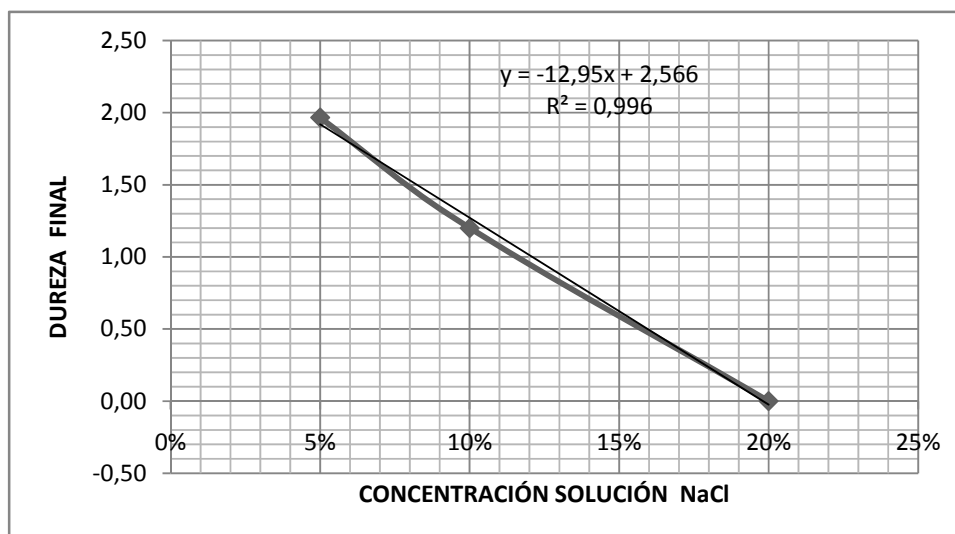
FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Tabla 3.1.2.1.3. 4 Valor promedio ablandamiento y regeneración

SOLUCIÓN NaCl	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
5%	2	1,8	2,1	1,97
10%	1,3	1,1	1,2	1,20
20%	0	0,0	0	0,0

FUENTE: Juan José Demera Ch. 2013

Gráfico 3.1.2.1.3. 1 Dureza final vs concentración NaCl



Según las pruebas realizadas, la resina Purolite C-100 requiere para su regeneración solución de salmuera a una concentración del 20%. Entonces;

3.1.2.1.4 VOLUMEN DEL TANQUE DE SALMUERA:

Ecuación 3.1.2.1.4

$$V_{TS} = h_{TS} * \pi * r^2$$

$$V_{TS} = 1,34 \text{ m} * \pi * (0,98\text{m})^2$$

$$V_{TS} = 1,01076\text{m}^3 * \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3}$$

$$V_{TS} = 1010,76\text{L}$$

Dónde:

V_{TS} = Volumen del tanque de salmuera

h_{TS} = Altura del tanque de salmuera

3.1.2.1.5 CONCENTRACIÓN DE SALMUERA AL 20%

Ecuación 3.1.2.1.5

$$\frac{20 \text{ g NaCl}}{100\text{mL de solución}} * \frac{\text{Kg NaCl}}{1000\text{g NaCl}} * \frac{1000\text{mL}}{1 \text{ L}} * 1010,76 \text{ L} = 202,15 \text{ Kg NaCl}$$

$$0,995 * 202,15 \text{ Kg NaCl} * \frac{1 \text{ costal de NaCl}}{50 \text{ Kg de NaCl}} = 4,02 \text{ sacos de sal de 50Kg}$$

Dónde:

0,995 corresponde a la pureza del cloruro de sodio en los sacos de 50 kilogramos.

3.1.2.1.6 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE RESINA DENTRO DEL ABLANDADOR

Del volumen total del ablandador, el 60% corresponde al volumen de la resina entonces:

Ecuación 3.1.2.1.6

$$V_R = V_{AB} * 0,6$$

$$V_R = 0,835 \text{ m}^3 * 0,6$$

$$V_R = 0,501 \text{ m}^3 \approx 17,67 \text{ ft}^3 \text{ de resina}$$

Dónde:

V_R = Volumen de resina dentro del ablandador

V_{AB} = Volumen del ablandador

3.1.2.1.7 CÁLCULO DE LOS CICLOS DE REGENERACIÓN

Conociendo que según el catálogo de la resina Purolite C100 esta tiene una capacidad de 30,4 Kgranos/ft³ de resina, determinamos la cantidad de granos ablandados por día dentro del lecho de resina del ablandador trabajando con la mayor dureza encontrada en la caracterización del agua, es decir 135 ppm. Un dato adicional es que el ablandador trata 5 metros cúbicos de agua por hora que equivalen a 31700,65 galones de agua por día entonces:

Ecuación 3.1.2.1.7.1

$$135\text{ppm} * \frac{1\text{grano}}{17,1\text{ ppm} * \text{galón}} * \frac{31700,65\text{ galón}}{\text{día}} * \frac{\text{Kgrano}}{1000\text{ grano}} = 250,26 \frac{\text{Kgrano}}{\text{día}}$$

Dividiendo para el volumen de resina dentro del ablandador tenemos:

$$\frac{250,26\text{ Kgrano}}{17,67\text{ ft}^3 * \text{día}} = 14,16 \frac{\text{Kgrano}}{\text{ft}^3 * \text{día}}$$

Para encontrar los días entre regeneraciones multiplicamos la capacidad total de la resina por un factor de 0,90 que representa la eficiencia actual del lecho de la resina y este producto lo dividimos para los kilogramos ablandados por cada pie cúbico de resina en el ablandador en un día de trabajo, entonces:

Ecuación 3.1.2.1.7.2

$$\frac{30,4 \frac{\text{Kgrano}}{\text{ft}^3} * 0,90}{14,26 \frac{\text{Kgrano}}{\text{ft}^3 * \text{día}}} = 1,92 \text{ días}$$

Es decir que cada dos días se debe regenerar la resina para mantener la dureza en control.

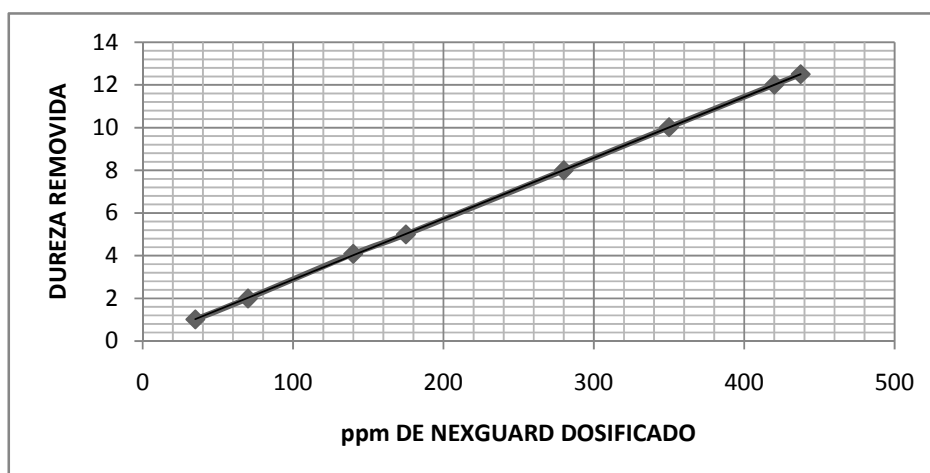
3.1.2.1.8 CONTROL QUÍMICO DE LA FUGA DE DUREZA.

El Nexguard 22300 es un polímero de la empresa NALCO CO, cuya finalidad es controlar las fugas de dureza que se dan en el sistema antes de causar daño en la caldera, es decir que es inyectado al agua de alimentación. Para la determinación de la dosificación de este producto se buscó la concentración indicada para inhibir 1ppm de dureza en el agua y a partir de ello realizar la dosificación correcta.

Tabla 3.1.2.1.8. 1Pruebas de dosificación de dispersante NALCO 22300 en alimentación

<i>Dureza inicial Alimentación (ppm)</i>	<i>Dosis Nexguard 22300(ppm)</i>	<i>Dureza removida Alimentación (ppm)</i>	<i>Dureza final Alimentación (ppm)</i>
20	35,00	1,02	18,98
20	70,00	2,00	18,00
20	140,00	4,09	15,91
20	175,00	5,00	15,00
20	280,00	8,00	12,00
20	350,00	10,02	9,98
20	420,00	12,01	7,99
20	437,50	12,50	7,50

Gráfico 3.1.2.1.8. 1Dureza removida vs ppm NALCO 22300



De lo experimentado se establece que 35ppm del producto Nexguard son capaces de remover 1,02 ppm de dureza de un litro de agua. En otras palabras para remover 1,02ppm de dureza de un litro de agua hacen falta 0,033mL de Nexguard 22300. Dependiendo de la dureza que presente el agua se debe dar la inyección de este producto, evidentemente a mayor dureza, mayor será el consumo.

3.1.2.2 CONTROL DEL RÉGIMEN DE PURGAS

3.1.2.2.1 CÁLCULO DEL CICLO DE CONCENTRACIÓN

Es importante conocer el valor de los ciclos de concentración (CC), ya que este nos permite estimar el número de veces que las impurezas del agua de la alimentación se concentran dentro de la caldera. Generalmente esta determinación se la realiza en función de los sólidos totales disueltos, cloruros y en base a la sílice, de este modo tenemos que:

Ecuación 3.1.2.1.10

$$CC = \frac{STD \text{ CALDERA}}{STD \text{ ALIMENTACIÓN}}$$

$$CC = \frac{4632,78\text{ppm}}{255,83 \text{ ppm}}$$

$$CC = 18,11$$

Dónde:

CC = Ciclos de concentración.

STD CALDERA = Sólidos totales disueltos en la caldera.

STD ALIMENTACIÓN = Sólidos totales disueltos en la alimentación.

3.1.2.2.2 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PURGA

Una vez conocido el valor de los ciclos de concentración procedemos a calcular el porcentaje y caudal de purga que se debe realizar para mantener los parámetros del agua dentro de los puntos de control.

Ecuación 3.1.2.1.11

$$\%PURGA = \left(\frac{1}{\text{Ciclo de Concentración} - 1} \right) \times 100$$

$$\%PURGA = \left(\frac{1}{18,11 - 1} \right) \times 100$$

$$\%PURGA = 5,84$$

3.1.2.2.3 CÁLCULO DEL CAUDAL DE PURGA

Ecuación 3.1.2.1.12

$$\text{CAUDAL DE PURGA} = \%PURGA * \text{CAUDAL ALIMENTACIÓN BREMER}$$

$$\text{CAUDAL DE PURGA} = \frac{\left(5,84 * 1765,58 \frac{\text{Gal}}{\text{h}} \right)}{100}$$

$$\text{CAUDAL DE PURGA} = 103,11 \frac{\text{Gal}}{\text{h}} \approx 0,3903 \frac{m^3}{h}$$

Una vez que se conoce el valor del caudal de purga se pueden establecer rutinas de purga que son necesarias para mantener el control de los parámetros del agua dentro de la caldera y de este modo mejorar la calidad del condensado, para este caso se recomienda realizar dos purgas durante cada turno de ocho horas, es decir, se deben realizar cada cuatro horas por un tiempo no mayor a 12 segundos para evitar caídas de presión dentro de la caldera ocasionando pérdidas de agua tratada y de energía innecesariamente. El tiempo no debe ser

mayor a quince segundos debido a que la purga es más efectiva durante los primeros segundos que se realiza. La purga se reduce a los valores calculados en el balance de masa una vez que los parámetros de la misma se encuentran dentro de su punto de control.

3.1.3 DISEÑO DE UN SEGUNDO ABLANDADOR PARA EL SISTEMA

Esta alternativa consiste en dimensionar un segundo ablandador para el tratamiento del agua para ser usado cuando las dos calderas están en operación suplir al primer ablandador durante el tiempo en que este tarda en regenerarse, es decir aproximadamente 2,5 horas.

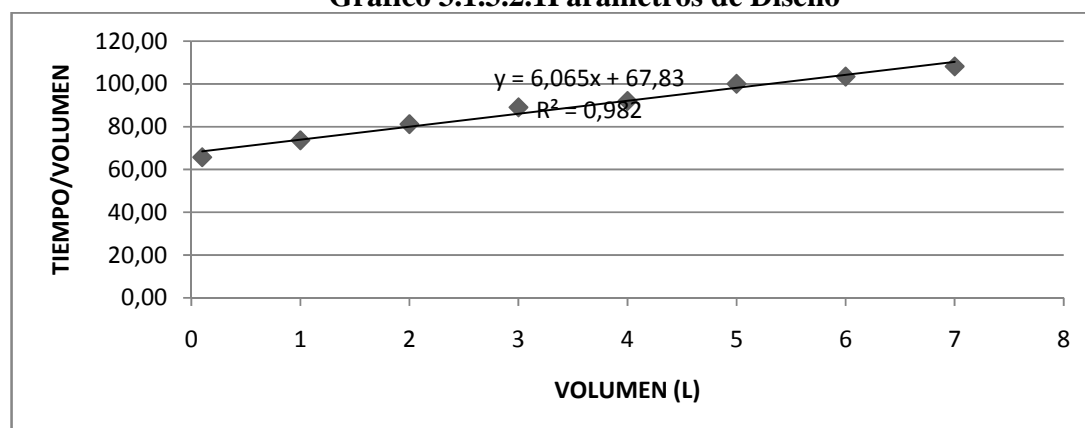
3.1.3.1 CÁLCULOS DE FILTRACIÓN

Tabla 3.1.3.1.1 Simulación de filtración

V(L)	Θ (min)	Θ/V (min/L)
0.1	6,57	65,7
1	73,61	73,61
2	162,32	81,16
3	267,11	89,04
4	368,03	92,01
5	500,25	100,05
6	620,46	103,41
7	757,10	108,16

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Gráfico 3.1.3.2.1 Parámetros de Diseño



FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Cálculo del área del filtro

Ecuación 3.1.3.3.1

$$A = \frac{\pi * \phi_i^2}{4}$$

Dónde:

- $\phi_i = 0,01 \text{ m}$
- $A = \text{Área del filtro}$

$$A = \frac{\pi * 0,01^2}{4}$$

$$A = 0,000078 \text{ m}^2$$

Cálculo del área total de filtración

Ecuación 3.1.3.4.2

$$A_{MF} = 2 * \pi * r * h_{FM} + 2 * \pi * r^2$$

Dónde:

- $A_{MF} = \text{Área total de filtración}$
- $h_{FM} = \text{Altura del material filtrante}$

$$A_{MF} = 2 * \pi * 0,005 \text{ m} * 0,27 \text{ m} + 2 * \pi * (0,005 \text{ m})^2$$

$$A_{MF} = 0,0086 \text{ m}^2$$

Cálculo del caudal

Ecuación 3.1.3.5.3

$$Q = \frac{V}{\theta}$$

Dónde:

- $V = \text{volumen filtrado}$
- $\theta = \text{tiempo que demora la filtración}$
- $Q = \text{Caudal}$

$$Q = \frac{0,1 L}{6,57 \text{ min}} * \frac{1m^3}{1000 L} * \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} = 0,022 \frac{m^3}{\text{día}}$$

Cálculo de la tasa media de filtración

Ecuación 3.1.3.6.4

$$\text{tasa media de filtración} = \frac{Q}{A}$$

Dónde:

- $Q = 0,022 \frac{m^3}{\text{día}}$
- $A = 0,000078 m^2$

$$\text{tasa media de filtración} = \frac{0,022 m^3/\text{día}}{0,000078 m^2}$$

$$\text{tasa media de filtración} = 282,05 \frac{m^3}{m^2 * \text{día}}$$

Cálculo de la resistencia específica de la torta

A partir de la ecuación de la recta obtenida de la gráfica anterior tenemos:

$$m = 6,0659 \frac{\text{min}}{L^2} = 101098,33 \frac{h}{m^6}$$

Ecuación 3.1.3.7.5

$$\alpha = \frac{2 * m * P * A^2}{\mu * W}$$

Dónde:

- $\mu = \text{Viscosidad dinámica } 3,26 \text{ kg/m} \cdot \text{h}$
- $W = \text{Contenido de sólidos} \cdot \text{vol líquido}$
- $P = \text{Presión de trabajo } 10332,27 \text{ kg/m}^2$
- $\alpha = \text{Resistencia específica de la torta}$

$$\alpha = \frac{2 * 101098,33 * 10332,27 * (0,0086 \text{ m}^2)^2}{3,26 * 0,183}$$

$$\alpha = 258998,91 \frac{\text{h}^2}{\text{Kg}}$$

Cálculo de la resistencia específica del medio filtrante

A partir de la ecuación de la recta obtenida de la gráfica anterior tenemos:

$$b = 67,835 \frac{\text{min}}{\text{L}} = 1130,58 \frac{\text{h}}{\text{m}^3}$$
$$b = \frac{\beta * \mu}{P * A} \Rightarrow \beta = \frac{b * P * A}{\mu}$$

Ecuación 3.1.3.8.6

$$\beta = \frac{1130,58 * 10332,27 * 0,0086}{3,26}$$

$$\beta = 30816,12 \frac{\text{h}^2}{\text{m}^2}$$

Dónde:

- $\mu = \text{Viscosidad dinámica } 3,26 \text{ kg/m} \cdot \text{h}$
- $W = \text{Contenido de sólidos} \cdot \text{vol líquido}$
- $P = \text{Presión de trabajo } 10332,27 \text{ kg/m}^2$

Cálculo del tiempo de filtración (escala industrial)

$$\frac{\theta}{V} = \frac{\alpha * \mu * W}{2 * P * A^2} V + \frac{\beta * \mu}{P * A}$$

Ecuación 3.1.3.9.7

$$\theta = \frac{\alpha * \mu * W}{2 * P * A^2} V^2 + \frac{\beta * \mu}{P * A} V$$

Dónde:

- $\mu =$ Viscosidad dinámica 3,26 kg/m * h
- $W =$ Contenido de sólidos * vol líquido
- $P =$ Presión de trabajo 10332,27 kg/m²

Asumiendo:

- $A = 0,456 \text{ m}^2$ ($\emptyset = 30$ pulg y altura de 72 pulg)
- $V = 0,834 \text{ m}^3$

$$\theta = \frac{258998,91 * 3,26 * 0,183}{2 * 10332,27 * 0,456^2} * 0,834^2 + \frac{30816,12 * 3,26}{10332,27 * 0,456} * 0,834$$

$$\theta = 42.79 \text{ horas}$$

Cálculo del tiempo y volumen de la solución de lavado para el filtro

- **Cálculo de la velocidad de lavado**

Ecuación 3.1.3.10.8

$$v_L = \frac{Q_L}{A}$$

Dónde:

- $Q_L = 0,834 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ (equivalente al volumen del medio filtrante)

$$v_L = \frac{0,834 \text{ m}^3/h}{0,456 \text{ m}^2}$$

$$v_L = 1,829 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ h}}$$

- **Cálculo del tiempo de lavado**

Ecuación 3.1.3.11.9

$$2,303 \frac{L}{kq} = \frac{\theta}{\log c_0 - \log c}$$

Dónde:

- $k =$ constante característica (0,3 – 0,5)
- $L =$ espesor de la torta 0,27 m
- $c_0 =$ Dureza al comienzo (135ppm)
- $c =$ Dureza al final (1ppm)

$$\theta_L = \frac{2,303L}{k * v_L} \log \frac{c_0}{c}$$

$$\theta_L = \frac{2,303 * 0,27}{0,4 * 1,829} \log \frac{135}{1}$$

$$\theta_L = 1,81 \text{ h}$$

- **Cálculo del volumen de lavado**

Ecuación 3.1.3.12.10

$$V_L = Q_L * \theta_L$$

$$V_L = 0,834 * 1,81$$

$$V_L = 1,51 \text{ m}^3$$

Tabla 3.1.3.13.14 Parámetros de diseño para el sistema de filtración

<i>Resultado</i>	<i>Valor</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>
Caudal	0,022	Q	$\frac{m^3}{\text{día}}$
Resistencia específica de la torta	258998,91	α	$\frac{h^2}{Kg}$
Resistencia específica del medio filtrante	30816,12	β	$\frac{h^2}{m^2}$
Tiempo de filtración	42,79	θ	h
Velocidad de lavado	1,829	v_L	$\frac{m}{h}$
Tiempo de lavado	1,81	θ_L	H
Volumen de lavado	1,51	V_L	m^3

FUENTE: JUAN, DEMERA. 2013

3.1.3.2 CÁLCULO DEL ABLANDADOR

- **Volumen del tanque de ablandador**

Ecuación 3.1.3.2.1

$$V_T = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h_T$$

Dónde:

- $V_T = \text{volumen del tanque de tratamiento}$
- $d = \text{diámetro del tanque } 0,762 \text{ m}$
- $h_T = 1,82 \text{ m}$

$$V_T = \pi * \left(\frac{0,762 \text{ m}}{2}\right)^2 * 1,82 \text{ m}$$

$$V_T = 0,829 \text{ m}^3$$

Cálculo del área del filtro

Ecuación 3.1.3.2.2

$$A = \frac{\pi * \phi_i^2}{4}$$

Dónde:

- $\phi_i = 0,762 \text{ m}$
- $A = \text{Área}$

$$A = \frac{\pi * 0,762^2}{4}$$

$$A = 0,456 \text{ m}^2$$

Cálculo del área total de filtración

Ecuación 3.1.3.2.3

$$A_{MF} = 2 * \pi * r * h_{FM} + 2 * \pi * r^2$$

Dónde:

- $A_{MF} = \text{Área total de filtración}$
- $h_{FM} = \text{Altura del material filtrante}$

$$A_{MF} = 2 * \pi * 0,381 \text{ m} * 1,82 \text{ m} + 2 * \pi * (0,381 \text{ m})^2$$

$$A_{MF} = 5,27 \text{ m}^2$$

Cálculo de la tasa media de filtración

Ecuación 3.1.3.2.4

$$tasa\ media\ de\ filtración = \frac{Q_f}{A}$$

Dónde:

- $Q_f = 144 \frac{m^3}{día}$; caudal diario requerido.
- $A = 0,456 m^2$

$$tasa\ media\ de\ filtración = \frac{144 m^3/día}{0,456 m^2}$$

$$tasa\ media\ de\ filtración = 315,79 \frac{m^3}{m^2 * día}$$

Tabla 3.1.3.2.1 Parámetros de Diseño de un Filtro de Zeolitas

<i>Resultado</i>	<i>Valor</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>
Volumen del filtros	0,829	V_F	m^3
Área del filtro	0,456	A	m^2
Área total de filtración	5,27	A_{MF}	m^2
Tasa media de filtración	315,79	A_0	$\frac{m^3}{m^2 * día}$

FUENTE: DEMERA, Juan J. 2013

3.2 RESULTADOS

Tabla 3.2. 1 Caracterización final del agua

CALIDAD DEL AGUA DEL ABLANDADOR						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Dureza total	mg/l	0,0	1,5	0,5	1,0	0,75
CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Conductividad	μS/cm	220	150	250	180	200
Sólidos totales disueltos	mg/l	110	75	125	90	100
Dureza total	mg/l	0,0	1,00	0,22	1,00	0,56
CALIDAD DEL AGUA DE PURGA						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Conductividad	μS/cm	4750,80	7120,35	4369,55	5602,68	5460,85
Sólidos totales disueltos	mg/l	2375,40	3560,18	2184,78	2801,34	2730,43
CALIDAD DEL CONDENSADO						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Conductividad	μS/cm	12	15	10	12	12,25
Dureza total	mg/l	0,0	0,2	0,0	0,5	0,18

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Tabla 3.2. 2 Caracterización del agua del ablandador

<i>PARÁMETO</i>	<i>LIMITE SUGERIDO</i>	<i>ANTES</i>	<i>DESPUÉS</i>
Dureza mg/L	0,0	19,39	0,75

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Gráfico 3.2. 1 Agua del ablandador

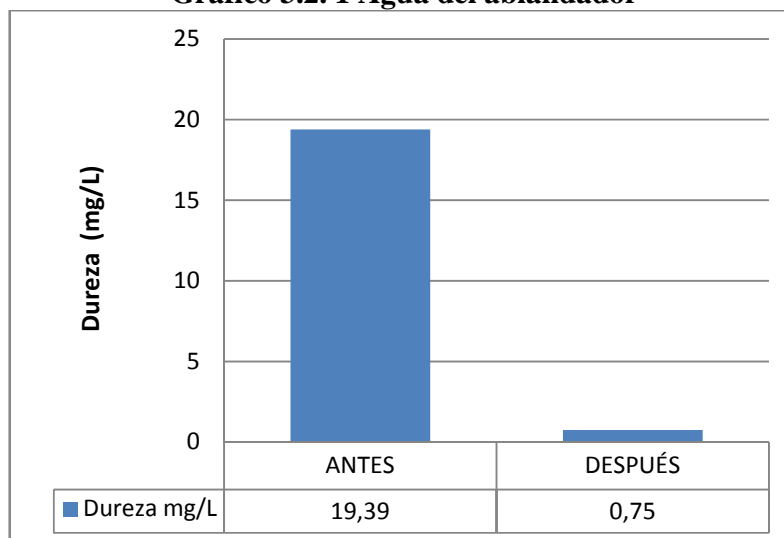


Tabla 3.2. 3 Caracterización final del agua de alimentación

<i>PARÁMETO</i>	<i>LIMITE MÁXIMO</i>	<i>ANTES</i>	<i>DESPUÉS</i>
Dureza mg/L	<1	12,6	0,56
Conductividad mg/L	<300	511,67	200
Sólidos totales disueltos mg/L	<150	255,83	100

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Gráfico 3.2. 2 Agua de alimentación

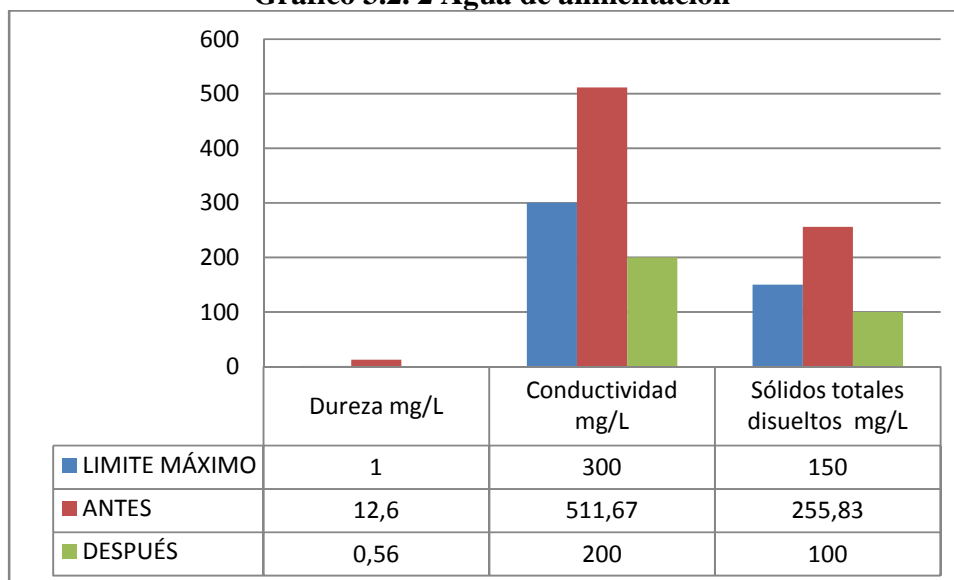


Tabla 3.2. 4 Caracterización final del condensado

<i>PARÁMETO</i>	<i>LIMITE MÁXIMO</i>	<i>ANTES</i>	<i>DESPUÉS</i>
Dureza mg/L	<0,20	5,58	0,18
Conductividad μ S/cm	<20	26,67	12,25

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Gráfico 3.2. 3 Agua de condensado

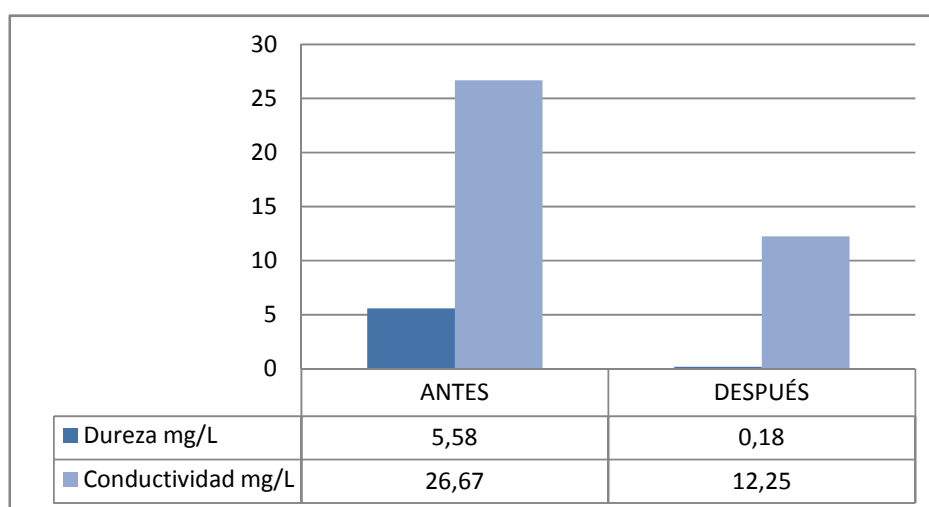
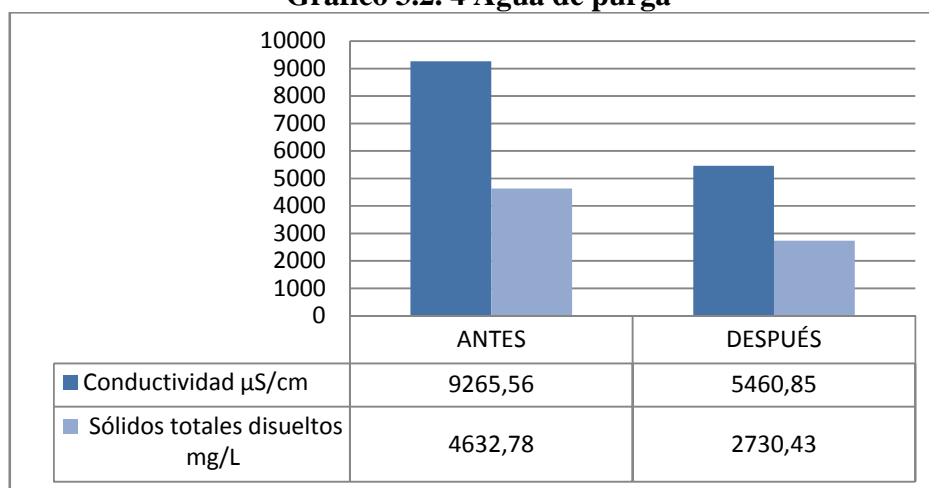


Tabla 3.2. 5 Caracterización final de la purga

<i>PARÁMETO</i>	<i>LIMITE MÁXIMO</i>	<i>ANTES</i>	<i>DESPUÉS</i>
Conductividad $\mu\text{S/cm}$	<7000	9265,56	5460,85
Sólidos totales disueltos mg/L	<3500	4632,78	2730,43

FUENTE: DEMERA, Juan, J. 2013

Gráfico 3.2. 4 Agua de purga



3.3. PROPUESTA

El agua de alimentación de calderas de la empresa Contrachapados de Esmeraldas S.A presenta tendencia incrustante, además de una cantidad de sólidos totales disueltos y conductividad por encima de la norma, al igual que el condensado y purga. De acuerdo a estos datos se establece la corrección los procesos que permitan optimizar la calidad del agua de alimentación.

Para el mejoramiento de la calidad del agua de alimentación se establece la corrección de diferentes puntos del tratamiento, especialmente el ablandador el cual funciona con resina catiónica de alta capacidad que debe ser regenerada cada dos días con una concentración de cloruro de sodio al 20%.

Para la optimización también es necesario el uso de productos químicos que permitan reducir la dureza que se fuga del ablandador en este caso el producto químico con el que la empresa trabaja en el Nexguard 22300 cuya dosificación debe ser 0,033mL por cada ppm de dureza.

La aplicación correcta de la purgas es otro factor importante que va a permitir mejorar la calidad del agua de la caldera y a la vez la calidad del condesado.

Una segunda alternativa es el uso de otro ablandador que permita el abastecimiento permanente de agua cuando los requerimientos de la misma son mayores especialmente cuando la producción es mayor y el uso de dos calderas es necesario e imprescindible.

3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de realizar las respectivas pruebas de regeneración a escala de laboratorio y llevarlas a la práctica en el ablandador, aplicar las purgas con rigurosidad y dosificar de manera apropiada el producto químico que permite evitar que la dureza que fuga del ablandador llegue al interior de la caldera para producir incrustaciones, se logra notar que los valores obtenidos en la caracterización final del agua de alimentación de calderas al ser comparados con aquellos valores de la caracterización inicial que no cumplían con lo estipulado en el catálogo de la caldera se corrigieron de manera satisfactoria, en otras palabras, se logró que los parámetros que inicialmente estaban fuera de rango pudieran llegar a sus respectivos puntos de control.

La administración correcta de la concentración de sal en el ablandador en el momento de la regeneración debe ser del 20% (15 libras de sal por cada pie cúbico de resina) según los

ensayos realizados en el laboratorio con una muestra de resina del lecho, al ser llevado a la práctica esto resulta ser cierto de modo que en el tanque de salmuera se administran 4,5 sacos de 50 kilogramos y se los diluye en 1 metro cúbico de agua para asegurar que dicha concentración llegue al lecho de resina en el momento de regenerar, la regeneración debe darse por lo menos durante 1,5 horas. El tiempo de residencia del agua durante el ablandamiento no debe ser menor a 10 minutos para que sea eficiente su ablandamiento y la regeneración se debe llevar a cabo cada dos días para mantener los valores de dureza dentro de los parámetros establecidos.

Es importante el uso de un producto químico para compensar la dureza que se pueda fugar del ablandador en ciertas ocasiones, en este caso el Nexguard 22300 según el estudio realizado debe administrarse 35ppm de ese producto por cada ppm de dureza que presente el agua de alimentación, es decir se debe dosificar 0,033mL de este producto a cada litro de agua por cada ppm de dureza que pueda contener.

La aplicación de las purgas es indispensable, en este estudio se propuso la realización de tres purgas por turno, es decir 6 purgas diarias que permitan reducir la cantidad de sólidos totales disueltos que puedan provocar arrastre del agua de la caldera hacia las líneas de vapor provocando contaminación del mismo y por tanto contaminación del condensado que es mezclado con el agua ablandada para alimentar a la caldera. El régimen de purgas disminuye según disminuya la concentración de sólidos, es decir que cuando los sólidos se encuentran dentro de los puntos de control se recomienda realizar las purgas una vez cada turno para evitar pérdidas de energía en la caldera y caídas de presión de la misma.

De igual manera el planteamiento de un segundo ablandador con una capacidad de 6 metros cúbicos de agua es de vital importancia para abastecer la totalidad del agua que requiere el sistema con la suma del condensado recuperado correspondiente a 5,64 metros cúbicos por hora dando un total de 11,64 metros cúbicos hora para alimentar las dos calderas sin ningún inconveniente, además el segundo ablandador puede ser usado en los casos en que la regeneración del primer ablandador es inevitable por agotamiento de la resina.

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

CAPÍTULO IV

4.1. CONCLUSIONES

1. De los parámetros analizados en el agua de alimentación de calderas se evidenció que sólo tres parámetros no cumplían con la norma del catálogo de calderas, la dureza promedio fue de 12,6ppm, sólidos totales disueltos con 255,83ppm y una conductividad alta de 511,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
2. El agua de caldera presentaba un alto contenido de sólidos 4632,78ppm y conductividad de 9265,56 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por último presencia de dureza en el condensado de 5,58ppm, conductividad de 26,67 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
3. Para mejorar la calidad del agua de alimentación de calderas se necesitó corregir variables como; concentración de sal en la regeneración, tiempo entre regeneraciones, aplicación del régimen de purgas, dosificación del producto químico que permite inhibir dureza.
4. Al realizar la caracterización final del agua de alimentación de calderas se determinó que la dureza fue de 0,5 ppm cuyo valor es corregido hasta un valor de cero mediante la adición de Nexguard 22300, la cantidad de sólidos totales disueltos fue de 100ppm, mientras que la conductividad fue de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con lo que se asegura la calidad necesaria para alimentar a la caldera.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Es necesario que el monitoreo de los parámetros del agua en el ablandador, agua de alimentación, purga y condensado se lleven a cabo de diariamente para corregir los parámetros que se puedan encontrar fuera de rango, este monitoreo se debe llevar a cabo por personal técnico.
2. La revisión y administración de la dosificación de químicos en el caldero debe ser diario según la variación de los parámetros medidos, a mayor dureza en el agua de alimentación, mayor será el consumo de producto para inhibir este problema.
3. Poner énfasis en el proceso de ablandamiento y regeneración ya que estos procesos son vitales para el mejoramiento de la calidad de agua de alimentación, controlar la concentración de salmera, realizar la regeneración hasta que la dureza llegue a cero mediante la aplicación de un buen enjuague.
4. El control y aplicación de las purgas en cada turno debe ser estricto ya que de esto depende la calidad del agua dentro del caldero y calidad del condensado que posteriormente al ser mezclado con el agua ablandada pasará a alimentar a la caldera. Del mismo modo las purgas no deben ser mayores a 12 segundos para evitar caídas de presión de la caldera reduciendo la producción de vapor.
5. Es necesaria la instalación de medidores de flujo en línea para conocer el consumo diario de agua de las calderas para el control más eficiente de dosificaciones y consumo de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. ALBEZ M., Y OTROS.,** Análisis de Riesgos del Tratamiento de Aguas para Calderas., 1.a.ed., México D.F., México., Editorial Plaza y Valdés, S.A. de C.V., 1999., Pp.66-74.
- 2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.,**Manual de Aguas para la industria.,1.a.ed., México D.F., México., Editorial Limusa., 1987.,Pp. 69-75; 203-278.
- 3. AMERICAN WATERWORKS ASSOCIATION.,** Agua su Calidad y Tratamiento., 1.a.ed., México D.F., México.,Editorial Hispano-Americana., 1968.,Pp. 301-309; 332-361.
- 4. DEPARTAMENTO DE SANIDAD DE NUEVA YORK.,** Manual de Tratamiento de Aguas, 1.a.ed., México D.F., México., Editorial Limusa, S.A. de C.V., 1991., Pp. 11-17; 105-107.
- 5. KOHAN A.,**Manual de Calderas., 1.a.ed., Madrid., España., Editorial Mc Graw-Hill., 2000., Pp.509-565.

6. PORT R., Guía NALCO para el Análisis de Fallas en Calderas.,1.a.ed.,México D.F., México.,Editorial Mc Graw-Hill, 1997. Pp. 1-19.

7. SEPPARD T. POWELL.,Acondicionamiento de Aguas para la Industria, 1.a.ed., México D.F., México.,Editorial Limusa-Wiley, S.A., 1970. Pp.35-52; 181-194;225-233;287-310; 409-423; 467-491.

ANEXOS

Anexo N° 1 Caldero Bremer HBFS 6.5



Fuente: Juan José Demera Ch

Anexo N° 2 Incrustaciones del caldero Bremer



Fuente: Juan José Demera Ch

Anexo N° 3 Parámetros de la calidad del agua

CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN		
Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible
pH	mg/l	8,3-10,5
Conductividad	μS/cm	<300
Sólidos totales disueltos	mg/l	<150
Dureza total	mg/l	<1,0
Hierro	mg/l	<0,1
Oxígeno disuelto	mg/l	0,0
Sílice	mg/l	<50
CALIDAD DEL AGUA DE PURGA		
pH	mg/l	10,50 – 11,50
Conductividad	μS/cm	< 7000
Sólidos totales disueltos	mg/l	< 3500
Hierro	mg/l	< 3,0
Sílice	mg/l	< 150
Alcalinidad, M	mg/l	< 700
Alcalinidad, OH ⁻	mg/l	< 450
Sulfito	mg/l	30 - 60
CONDENSADO		
pH	mg/l	8,8 – 9,20
Conductividad	μS/cm	< 20
Dureza total	mg/l	<0,20
Hierro	mg/l	<0,10

Fuente: Catálogo de caldera Bremer

Anexo N° 4 Catálogo resina Purolite C-100



PUROLITE C-100 E

RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO FUERTEMENTE ÁCIDA
(PARA USAR EN LA DESCALCIFICACIÓN DEL AGUA)

HOJA TÉCNICA

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

PUROLITE C-100 E es una resina catiónica de poliestireno sulfonado tipo gel, de elevada pureza, diseñada especialmente para el tratamiento de alimentos, bebidas, aguas potables, y agua empleada en la manipulación de alimentos.

C 100 E cumple con la normativa de la **U.S. Food and Drug Administration** sección 21, párrafo 173.25 sobre empleo de resinas en el tratamiento de alimentos para el consumo humano.

C 100 E está inscrita en el **Registro General Sanitario de Alimentos del Ministerio de Sanidad y Consumo**, con el N° 31.01108/B-11046, para el tratamiento de aguas potables.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estructura del polímero	poliestireno reticulado con DVB
Forma física y aspecto	perlas esféricas transparentes
Grupo funcional	Poliestireno sulfonado
Forma de suministro	Na ⁺
Densidad aparente (aprox.)	800-840 g/l (50-52.5 lb/ft ³)
Tamaño de malla, U.S. estándar Mesh (húmeda)	16-50
Rango tamaño de partícula	1.2 mm < 5% - 0.3 mm < 1%
Retención humedad, forma Na ⁺	46-50%
Hinchamiento, Ca ²⁺ → Na ⁺ (max.)	+8%
Densidad forma Na ⁺ (húmeda)	1.27
Capacidad total, forma Na ⁺ , húmeda (min.)	1.9 eq/l
Temperatura de trabajo, forma Na ⁺ (max.)	140°C (285°F)
Rango estabilidad pH	0 - 14
Rango operativo pH, ciclo Na ⁺	6 - 10

CONDICIONES DE TRABAJO ESTÁNDAR (DESCALCIFICACIÓN EN CO - CORRIENTE)

OPERACION	CAUDAL	DISOLUCION	MINUTOS	CANTIDAD
Servicio	8- 40 BV/h	Agua entrada		
Contralavado	7 - 12 m/h	Agua entrada	5 - 20	1,5 - 4 BV
Regeneración	2 - 7 BV/h	8 - 20% NaCl	15 - 60	60 - 320 g/l
Lavado (lento)	2 - 7 BV/h	Agua entrada	30 (aprox.)	2 - 4 BV
Lavado rápido)	8- 40 BV/h	Agua entrada		3 - 10 BV

1 BV = 1 Volúmen/Volúmen resina

Anexo N° 5 Sistema de ablandamiento



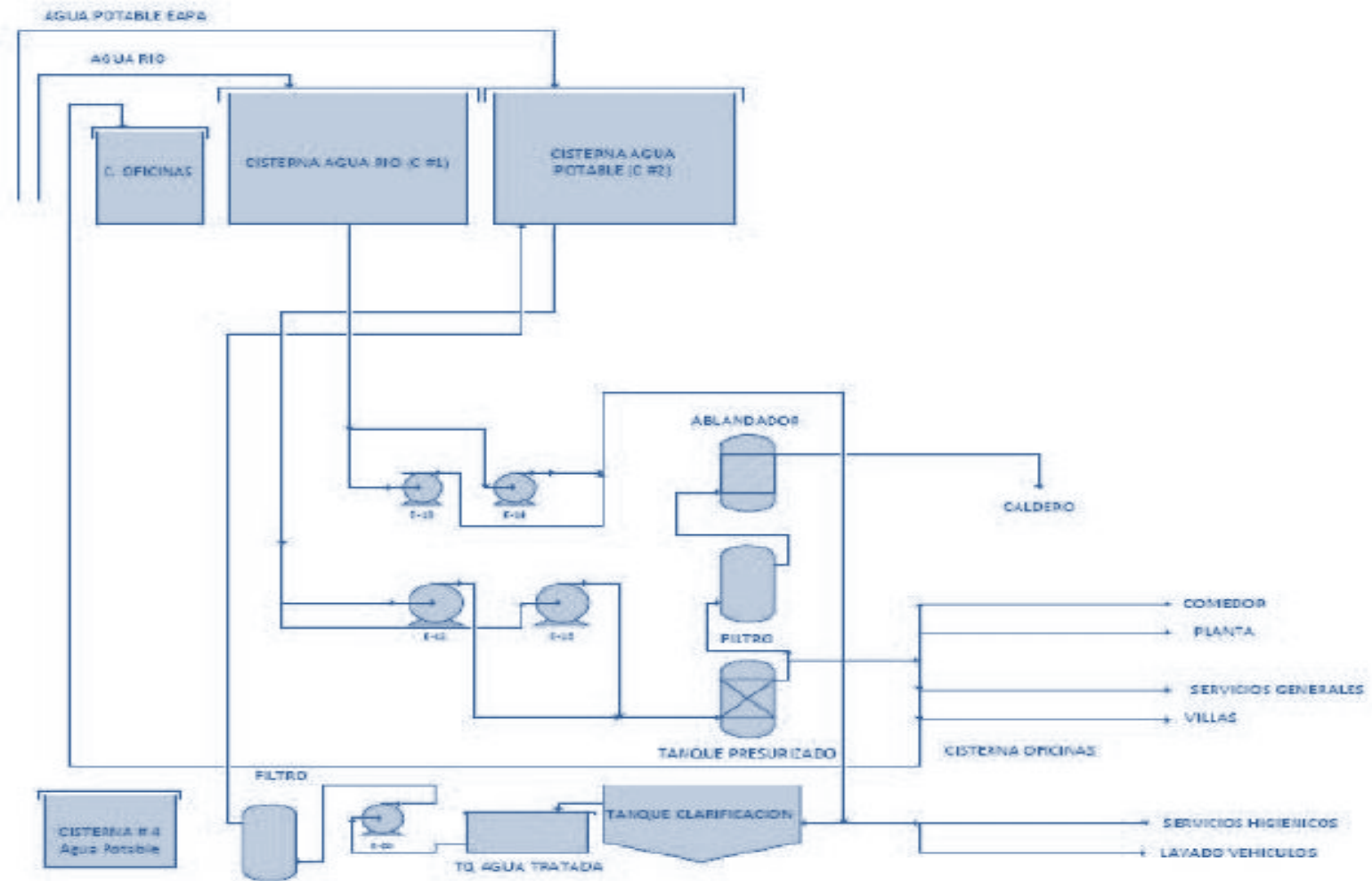
Fuente: Juan José Demera Ch

Anexo N° 6 Pruebas de dureza luego de optimización

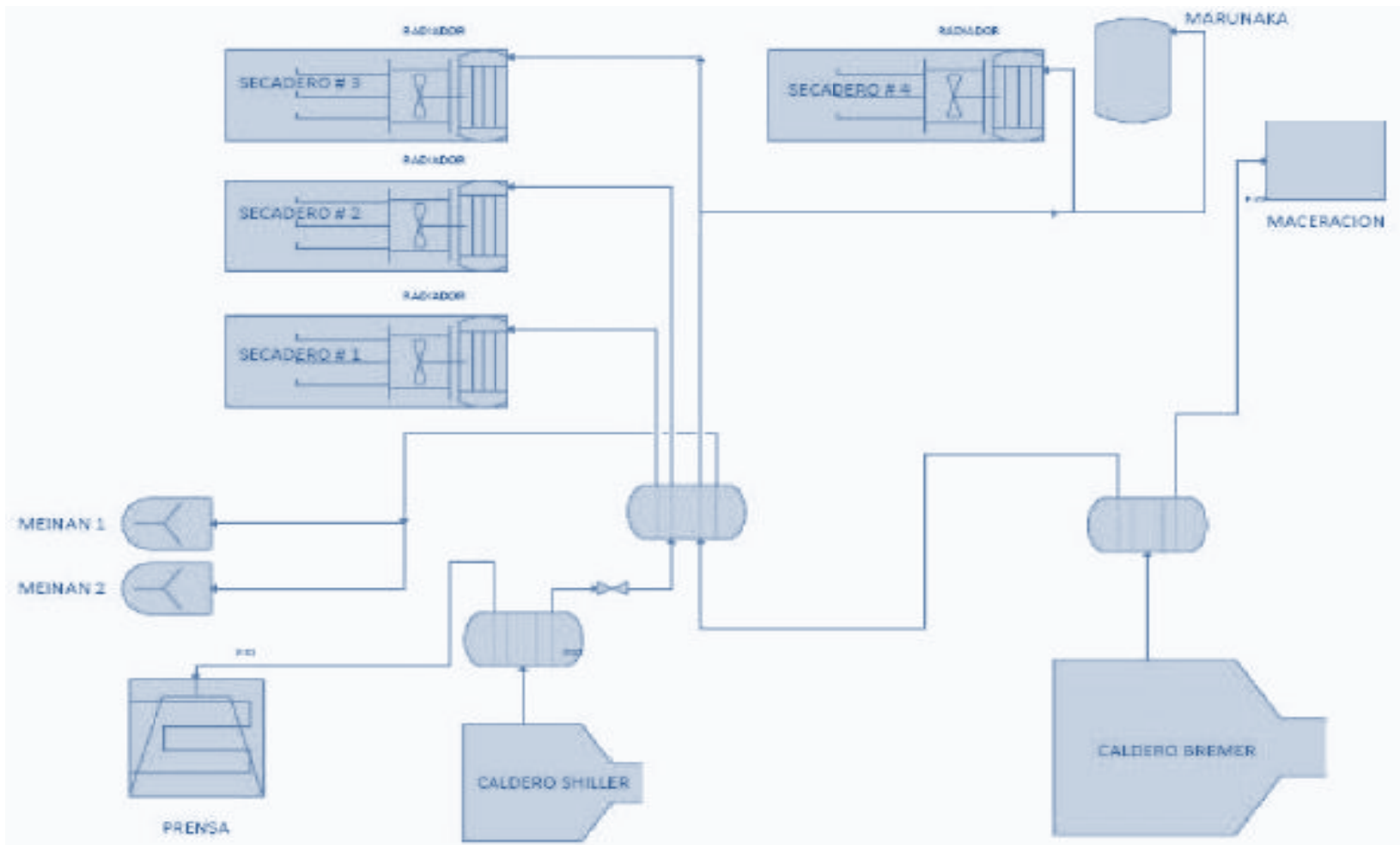


Fuente: Juan José Demera Ch

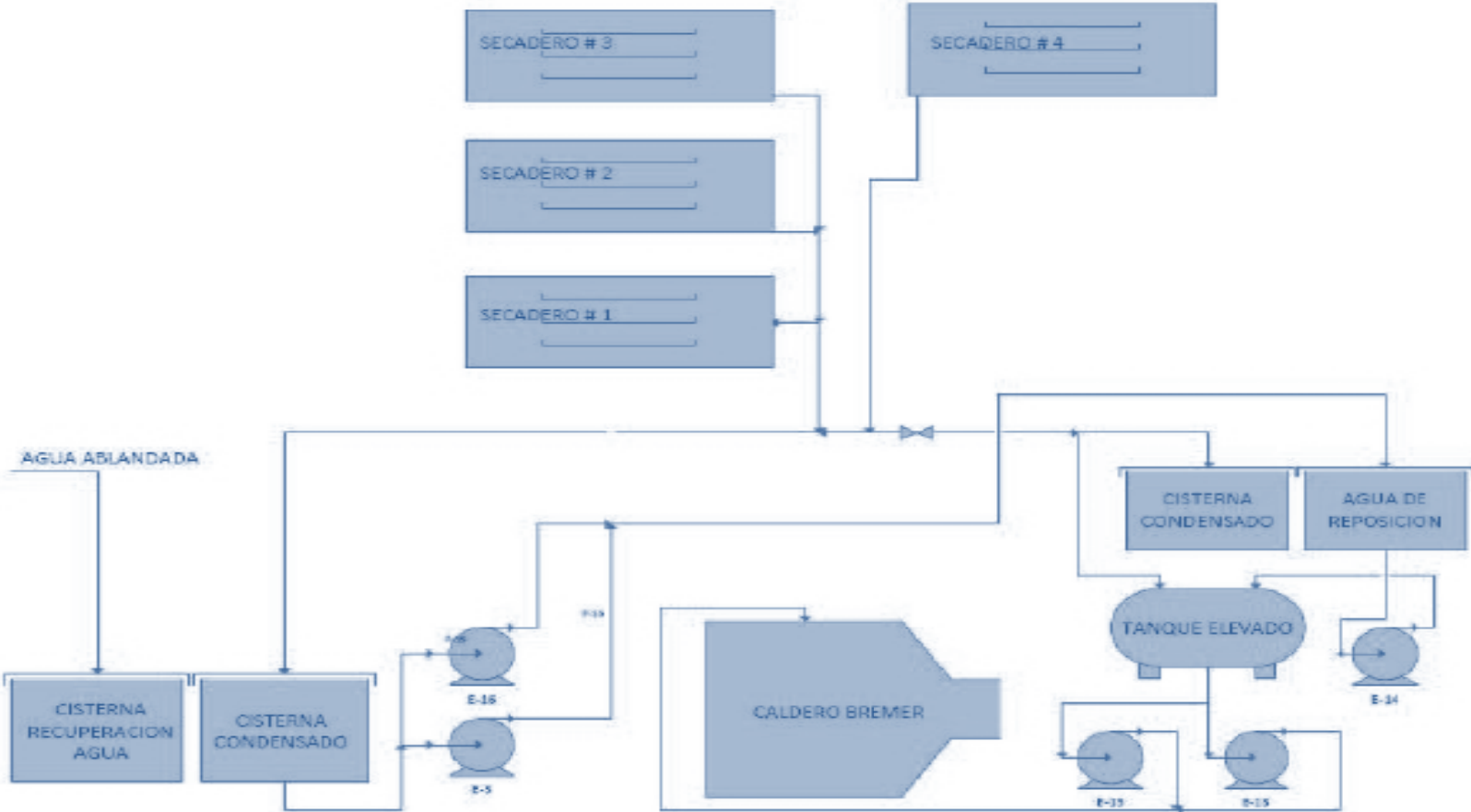
Anexo N° 7 Diagrama potabilización - ablandamiento



Anexo N° 8 Diagrama distribución de vapor



Anexo N° 9 Diagrama retorno de condensados



Anexo N° 10 Costos por Productos Químicos

PRODUCTO QUÍMICO	Costo por kilo (\$)	Consumo Kg/Día (Sujeto a variación)	Subtotal \$
Boiler Clean (Limpiador Incrustaciones)	5,54	10,00	55,40
Boiler Control (Regulador de pH)	0,80	10,00	8,00
Nalco 19 (Secuestrante de Oxígeno)	5,22	8,00	41,76
Nalco 1820 (Inhibidor de Corrosión de Condensado)	6,74	8,00	53,92
Nalco 22300 (Dispersante)	4,85	1,60	7,76
Polichem Px 24-44 (Floculante)	0,88	5,76	5,07
Hipoclorito de Sodio	0,40	3,60	1,44
		Total \$	173,35

Anexo N° 11 Verificación de purgas
HOJA DE VERIFICACIÓN DE PURGAS

Nombre Operador:..... **Fecha:**.....

Caldera:..... **Turno:**.....

Hora	Tiempo de purgado	Sólidos totales disueltos en purga
08:30		
12:30		
16:30		
20:30		
00:30		
04:30		

Firma del Operador

Firma del Ingeniero Responsable