

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE  
ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN  
PARA LAS CALDERAS Y CONDENSADORES EVAPORATIVOS  
EN UNA INDUSTRIA ALIMENTICIA DE EMBUTIDOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el T.S.U. Padrón T., Carlos A.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2008.

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN PARA LAS CALDERAS Y CONDENSADORES EVAPORATIVOS EN UNA INDUSTRIA ALIMENTICIA DE EMBUTIDOS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María Rincones.  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Virgilio Cordero.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el T.S.U. Padrón T., Carlos A.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico.

Caracas, Noviembre de 2008

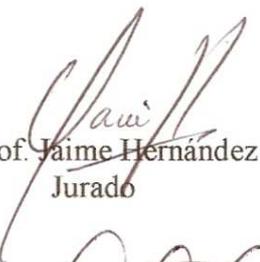
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el T.S.U. Carlos A. Padrón T., titulado:

**“Evaluación y mejoramiento del sistema de acondicionamiento del agua de alimentación para las calderas y condensadores evaporativos en una Industria Alimenticia de Embutidos”**

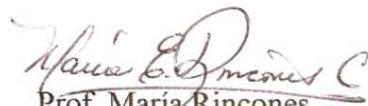
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



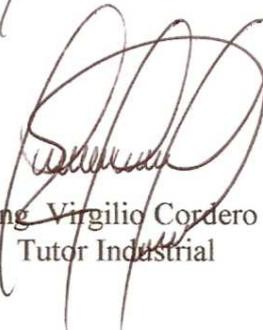
Prof. Francisco Yanez  
Jurado



Prof. Jaime Hernández  
Jurado



Prof. María Rincones  
Tutor Académico



Ing. Virgilio Cordero  
Tutor Industrial

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a Dios, a mis padres y a mis hermanos, ya que han sido el apoyo y la fuerza necesaria a lo largo de toda mi carrera universitaria.*

***Carlos A. Padrón T.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los siguientes por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo:

- A Dios, por estar conmigo en todo momento y sacarme de todos los problemas que he tenido en mi vida.
- A la Universidad Central de Venezuela, por ser nuestra casa durante los últimos cinco años y medio y por todas las experiencias vividas en ella.
- A mis tutores María Rincones y Virgilio Cordero, por todo el apoyo prestado.
- A mis padres, por haberme apoyado y permitido terminar otra carrera universitaria en mi vida.
- A Sinaí Alvarado (Chiki), por todo el amor y apoyo que he recibido de tu parte.
- A las personas que conocí durante mi carrera universitaria, especialmente a Tupa, El Negro, Puchi, Nacho, Nahomy, El Cocho y a Los Tigres de Los Altos Mirandinos.
- A todo el personal del Laboratorio de Control de Calidad de la Industria Alimenticia de Embutidos, por permitirme realizar la investigación en sus instalaciones, muy especialmente a Félix Pagés, gracias por toda tu colaboración y el apoyo técnico prestado.
- A Néstor Maita, por toda la información técnica suministrada.

**Carlos Alberto Padrón Toro.**

**Padrón T., Carlos A.**

**EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE  
ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN  
PARA LAS CALDERAS Y CONDENSADORES EVAPORATIVOS  
EN UNA INDUSTRIA ALIMENTICIA DE EMBUTIDOS**

**Tutor Académico: Prof. María Rincones. Tutor Industrial: Ing. Virgilio  
Cordero. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería  
Química. Año 2008, 110 p.**

**Palabras Claves:** Aguas Industriales, Tratamiento de Aguas, Equipos de Transferencia de Calor.

**Resumen.** A partir de la evaluación del sistema de acondicionamiento del agua requerida para calderas y condensadores evaporativos en una Industria Alimenticia de Embutidos, mediante la caracterización de las fuentes de abastecimiento de agua y establecimiento de los rangos de operación del sistema existente y sus posibles mejoras, se obtuvo que la fuente de abastecimiento de agua con condiciones más desfavorables fue la del Pozo #4, que los tiempos de servicio de los filtros así como el volumen de ruptura de los suavizadores de Planta Actual son mucho menores que los de Planta Nueva y que el tratamiento químico no se realizaba por completo para ambos sistemas; por lo cual se concluye que el lecho de intercambio iónico de los suavizadores de Planta Actual debe ser cambiado, que se deben agregar y/o sustituir equipos de los dos sistemas y realizar la dosificación del tratamiento químico en su totalidad. Se recomienda caracterizar las fuentes de abastecimiento de agua dos veces al año y evaluar la capacidad de la resina anualmente, así como implementar en el menor tiempo posible las mejoras propuestas en este estudio.

## ÍNDICE

	<i>Página N°</i>
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
CAPÍTULO II. OBJETIVOS.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
Aguas naturales y sus impurezas.....	5
Descripción de equipos de transferencia de calor.....	7
Calderas.....	7
Condensador evaporativo.....	8
Sistema de acondicionamiento del agua para calderas.....	9
Sistema de acondicionamiento del agua para condensadores evaporativos..	10
Tratamiento Físico (Externo).....	11
Filtración.....	11
Filtración de una capa.....	12
Filtros de dos o tres capas.....	12
Tipos de filtros.....	13
Filtros a presión.....	13
Intercambio iónico.....	14
Capacidad de la resina.....	15
Tipos de resina.....	16
Resinas catiónicas.....	16
Resinas aniónicas.....	17
Suavización.....	17
Ciclos del suavizador.....	18
Retrolavado.....	19
Inyección de salmuera .....	19

Lavado lento.....	19
Lavado rápido .....	19
Desaireación del agua de alimentación.....	21
Desaireación mecánica.....	21
Ionización.....	21
Presiones parciales.....	21
Temperatura.....	22
Agitación.....	22
Remoción de gases.....	22
Tratamiento Químico (Interno).....	23
Incrustaciones o depósitos en una caldera.....	23
Programa fosfato orgánico-polímero (antiincrustante).....	25
Control del programa.....	26
Eliminación química de oxígeno (anticorrosivo).....	26
Control de arrastre (antiespumante).....	28
Factores mecánicos.....	28
Factores químicos.....	29
Tratamiento microbiológico.....	30
Control de los microorganismos.....	30
Purga.....	31
Purga de fondo o manual.....	32
Purga continua.....	32
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	33
Procedimiento Experimental.....	33
Fase 1: Identificación de fuentes de abastecimiento de agua.....	33
Fase 2: Parámetros de diseño de los equipos.....	34
Fase 3: Parámetros óptimos de operación de los equipos.....	34
Fase 4: Mejoras al sistema de tratamiento de aguas.....	36
Fase 5: Selección de la propuesta más adecuada.....	36
Materiales.....	37

Resina.....	37
Medios filtrantes.....	37
Reactivos.....	37
Material de vidrio.....	38
Equipos.....	38
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>45</b>
Identificación de las fuentes de abastecimiento de agua.....	45
Parámetros de diseño de los equipos.....	52
Parámetros óptimos de operación de los equipos.....	71
Caída de presión de los filtros de arena y carbón.....	71
Capacidad de la resina de los suavizadores.....	71
Dosificación de químicos en los tanques de alimentación.....	75
Capacidad de los tanques de alimentación de las calderas.....	76
Frecuencia y duración de las purgas de fondo.....	76
Verificación de la relación entre los sólidos disueltos y la conductividad del agua.....	77
Mejoras al sistema de acondicionamiento de agua.....	79
Diseño de un tanque de alimentación para las calderas de Planta Nueva.....	79
Diseño de un nuevo suavizador para los condensadores evaporativos de Planta Actual.....	83
Diseño de filtros de arena y carbón para el sistema de acondicionamiento de Planta Actual.....	86
Implementación de retorno de condensado en el sistema de acondicionamiento de agua para las calderas de la empresa.....	88
Implementación de un sistema de purga continua en las calderas.....	89
Diseño de sistema de Control Automático.....	92
Selección de la propuesta más adecuada.....	94
Mejoras a corto plazo.....	94
Mejoras a mediano plazo.....	94

Mejoras a largo plazo.....	95
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	96
CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	102
Anexo N° 1. Procedimiento experimental y expresión de resultados para la determinación de la capacidad de la resina.....	102
Anexo N° 2. Propiedades físico-químicas de la resina Bayer Lewatit S-100.....	103
Anexo N° 3. Características físico-químicas del agua del Pozo #2 por un periodo de 20 días.....	104
Anexo N° 4. Características físico-químicas del agua del Pozo #4 por un periodo de 20 días.....	105
Anexo N° 5. Características físico-químicas del agua de HIDROCAPITAL por un periodo de 20 días.....	106
Anexo N° 6. Características físico-químicas del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Actual por un periodo de 20 días.....	107
Anexo N° 7. Características físico-químicas del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Nueva por un periodo de 20 días.....	108
Anexo N° 8. Resultados obtenidos del volumen de ruptura para las resinas catiónicas fuertes de la empresa con caudal de 58 mL/min y una conductividad de la solución de NaOH de 17590 $\mu$ S.....	109
Anexo N° 9. Determinación de la relación TDS/ $\mu$ S para las calderas de la empresa por un periodo de 11 días.....	110

## LISTA DE TABLAS Y GRÁFICOS

	<i>Página N°</i>
Tabla N° 1. Parámetros recomendados para el agua utilizada en calderas, a una presión de 150 psi.....	6
Figura N° 1. Esquema de una caldera tipo pirotubular.....	7
Figura N° 2. Esquema de un condensador evaporativo.....	8
Tabla N° 2. Etapas del Tratamiento Físico del agua de alimentación para calderas.....	9
Tabla N° 3. Etapas del Tratamiento Químico del agua de alimentación para calderas.....	9
Figura N° 3. Acondicionamiento del agua para calderas.....	10
Figura N° 4. Acondicionamiento del agua para condensadores evaporativos...	11
Figura N° 5. Sección transversal de un filtro de presión típico.....	14
Figura N° 6. Curva de Capacidad de Intercambio Iónico.....	16
Figura N° 7. Representación esquemática de una resina de intercambio catiónico fuerte.....	17
Figura N° 8A. Esquema de una unidad típica de intercambio iónico.....	20
Figura N° 8B. Unidad típica de intercambio iónico.....	20
Tabla N° 4. Ventajas y desventajas del Programa fosfato orgánico-polímero (antiincrustante).....	26
Tabla N° 5. Ventajas y desventajas del sulfito de sodio (anticorrosivo).....	28
Figura N° 9. Filtro de arena de la empresa.....	38
Figura N° 10. Filtro de carbón de la empresa.....	39
Figura N° 11. Suavizador de la empresa.....	39
Figura N° 12. Suavizador de la empresa.....	40
Figura N° 13. Suavizador de la empresa.....	40
Figura N° 14. Caldera CYMSA de 150 HP de la empresa.....	41
Figura N° 15. Caldera DISTRAL de 150 HP de la empresa.....	41
Figura N° 16. Caldera SUPERIOR DE 80 HP de la empresa.....	42

Figura N° 17. Bomba dosificadora de químicos de la empresa.....	42
Figura N° 18. Espectrofotómetro del Laboratorio.....	43
Figura N° 19. Conductímetro del Laboratorio.....	43
Figura N° 20. pH-metro del Laboratorio.....	44
Figura N° 21. Esquema del abastecimiento y distribución del agua dentro de la empresa.....	46
Tabla N° 6. Características principales de los tanques australianos y de fibra de la empresa.....	47
Tabla N° 7. Características principales de los tanques subterráneos de la empresa.....	47
Tabla N° 8. Características principales de los pozos de agua subterráneos de la empresa.....	48
Tabla N° 9. Caracterización del agua proveniente del Pozo #2.....	48
Tabla N° 10. Caracterización del agua proveniente del Pozo #4.....	49
Tabla N° 11. Caracterización del agua proveniente de HIDROCAPITAL.....	49
Tabla N° 12. Caracterización del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Actual.....	50
Tabla N° 13. Caracterización del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Nueva.....	50
Tabla N° 14. Tiempo determinado entre cada retrolavado de los filtros de la empresa.....	71
Figura N° 22. Comportamiento de las resinas catiónicas de los suavizadores de Planta Actual, Planta Nueva y Bayer Industrial.....	72
Tabla N° 15. Volumen de ruptura y capacidad para un lecho de resina de 12,8 g.....	73
Tabla N° 16. Volumen de ruptura actual de los suavizadores comparado con un lecho de resina nuevo.....	74
Tabla N° 17. Tiempo de servicio de los suavizadores.....	74
Figura N° 23. Comportamiento del factor de relación TDS/ $\mu$ S en el período de análisis.....	78

Tabla N° 18. Factor de relación TDS y conductividad obtenidos para las calderas de la empresa.....	78
Tabla N° 19. Características físicas del tanque de alimentación para las calderas de Planta Nueva.....	80
Tabla N° 20. Características principales del serpentín diseñado.....	82
Figura N° 24. Esquema básico del tanque de alimentación de Planta Nueva...	83
Figura N° 25. Distribución del lecho de intercambio iónico del suavizador diseñado.....	85
Tabla N° 21. Características principales del suavizador diseñado.....	90
Figura N° 26. Distribución del lecho filtrante de los filtros de arena y carbón diseñados.....	88
Figura N° 27. Comportamiento de los sólidos disueltos en calderas, para purga continua y discontinua.....	90
Tabla N° 22. Cantidad de agua que debe ser purgada para cada caldera.....	91
Figura N° 28. Diagrama ISA de control de temperatura dentro de los tanques.	92
Figura N° 29. Diagrama ISA de control de nivel dentro de los tanques.....	93

## INTRODUCCIÓN

El fluido más utilizado para transferir energía en los procesos industriales como intercambiadores de calor, hornos en las industrias alimenticias y plantas termoeléctricas, entre otras, es el agua, ya que es la única sustancia capaz de transportar grandes cantidades de energía, tanto para entregar como absorber calor. Las aguas naturales, independientemente de su suministro (superficiales o subterráneas), no son puras, por lo que es necesario realizar el acondicionamiento del agua antes de usarla en los sistemas de generación de vapor o en los sistemas de enfriamiento, para evitar problemas de corrosión e incrustación en los equipos principales de estos sistemas, como calderas y condensadores evaporativos. Es por ello que el objetivo primordial de este trabajo es evaluar el acondicionamiento del agua requerida para calderas y condensadores evaporativos de una industria alimenticia de embutidos.

Para lograr cumplir con el objetivo planteado, primero se identificarán las fuentes de suministro de agua que posee la empresa y se caracterizarán por medio de análisis físico-químicos (basándose en las normas COVENIN correspondientes) los principales parámetros a controlar, tales como: alcalinidad, dureza total, sólidos suspendidos y disueltos, cloruros y pH. Luego se realizará un estudio detallado de las condiciones de operación de todos los equipos que forman parte del acondicionamiento del agua, entre los cuales se encuentran: filtros y suavizadores; por otra parte, se evaluará si el tratamiento químico aplicado es el más conveniente para proteger estos equipos de transferencia de calor. Finalmente, se propondrá una solución que garantice el funcionamiento óptimo de ambos sistemas, ya sea diseñando un nuevo equipo o reemplazando por algún existentes en la empresa.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La necesidad de vapor de agua para diversos procesos industriales tales como generación de energía eléctrica, fluido de servicios en intercambiadores de calor, hornos para la cocción de diversos productos en las industrias alimenticias, entre otros, ha llevado a las plantas actuales al desarrollo de sistemas sencillos de acondicionamiento de agua, conformado por una serie de equipos que tienen como objetivo primordial abastecer de vapor con características especiales a cada uno de los sectores de la planta. El agua utilizada en estos sistemas posee una serie de parámetros como sólidos suspendidos y disueltos, dureza del agua, pH, sílice, alcalinidad, entre otros, que deben estar controlados para garantizar una buena generación de vapor, sobre todo para evitar daños y/o paradas no programadas de la caldera. Para lograr un control efectivo de los parámetros antes mencionados, se deben realizar tratamientos físicos, como filtración e intercambio iónico, y químicos, como la adición de sulfito de sodio y aminotriometileno ácido fosfónico para el tratamiento preventivo antiincrustante y anticorrosivo, respectivamente.

La empresa donde se realizó este trabajo especial de grado posee tres calderas, las cuales proporcionan vapor de agua a todos los hornos para la cocción de la gran variedad de productos elaborados por la misma. Estos equipos de generación de vapor han tenido grandes problemas de incrustaciones debido al mal acondicionamiento (tanto químico como físico) del agua de alimentación, por lo tanto se evaluará por completo el sistema de acondicionamiento de la misma para evitar paradas no programadas y daños en los tubos por fatiga del metal.

Por otro lado, en los sistemas de enfriamiento y refrigeración, el fluido más utilizado es el agua, el cual debido a sus características requiere de tratamientos físicos, como filtración y ablandamiento, y químicos, como adición de amonio

cuaternario, para controlar y minimizar problemas de corrosión, incrustaciones, ensuciamiento, microbiológicos y formación de lodos en los condensadores evaporativos, a fin de mantenerlos en condiciones operativas confiables, preservando la eficiencia de los mismos. La empresa posee siete condensadores evaporativos, los cuales forman parte del ciclo de refrigeración para las cavas y congeladores de materia prima y producto terminado. Estos equipos son utilizados para condensar totalmente el amoníaco (fluido refrigerante) por medio del intercambio de calor con agua a temperatura ambiente, pero al igual que las calderas, los condensadores evaporativos poseen grandes problemas de incrustación a lo largo de todos los tubos, los cuales perjudican enormemente la eficiencia del equipo, por lo que se evaluarán y propondrán mejoras al acondicionamiento del agua de alimentación para estos equipos.

## **CAPÍTULO II**

### **OBJETIVOS**

A continuación se presentan los objetivos a ser alcanzados durante la realización de este trabajo:

#### ***Objetivo General***

- Evaluar el acondicionamiento del agua requerida para calderas y condensadores evaporativos en una Industria Alimenticia de Embutidos.

#### ***Objetivos Específicos***

- Identificar y caracterizar las fuentes de abastecimiento de agua de la empresa.
- Identificar los parámetros de diseño de todos los equipos que forman parte del sistema de acondicionamiento de agua para las calderas y condensadores evaporativos de la empresa.
- Establecer los rangos óptimos de operación en todos los equipos que forman parte del sistema de acondicionamiento de agua para las calderas y condensadores evaporativos de la empresa.
- Proponer mejoras al sistema de acondicionamiento de agua para las calderas y condensadores evaporativos existentes de la empresa.
- Seleccionar la propuesta más adecuada para un funcionamiento óptimo del sistema de acondicionamiento de agua para las calderas y condensadores evaporativos de la empresa.

## CAPÍTULO III

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se presentan los conceptos necesarios para comprender el desarrollo del trabajo en estudio.

#### *Aguas naturales y sus impurezas*

El agua en su estado puro es un líquido insípido, inodoro e incoloro, el cual es conocido como el solvente universal, ya que es capaz de disolver y acarrear una gran cantidad de compuestos químicos y microorganismos, conteniendo generalmente gases y materias sólidas en suspensión.

Además de darle al agua usos sanitarios y potables, existe una infinidad de aplicaciones, siendo las más importantes desde el punto de vista industrial el agua para enfriamiento y la generación de vapor; debido a que se puede conseguir en abundancia y a condiciones de operación convenientes para ser convertida en vapor, el agua resulta un medio ideal para la generación de potencia e intercambio de calor. El agua que circula por calderas y otros sistemas de conducción de vapor pertenece al grupo denominado Aguas Industriales, las cuales también incluyen el agua de enfriamiento y de procesos.

Las características físico-químicas del agua son muy variables, dependiendo de su origen (superficial o subterránea). Cualquiera que sea la fuente de abastecimiento, el agua poseerá diversos contenidos de sustancias químicas suspendidas y solubles las cuales, dadas las condiciones de trabajo de los equipos (temperatura y presión), ocasionan que las mismas corroan las paredes internas de las calderas o se depositen, formando una capa aislante térmica que evita una buena transferencia de calor y provoca fatiga en los tubos. Es por ello que, antes de circular el agua por equipos generadores de vapor y sistemas de enfriamiento, se debe realizar una serie de análisis físico-químicos, para así establecer los tratamientos adecuados.

En el caso de los condensadores evaporativos, los problemas de un agua de calidad inadecuada para ser alimentada a este equipo pueden ocasionar incrustaciones y corrosión en las paredes externas de los tubos.

El agua ideal para alimentar calderas y condensadores evaporativos es aquella que cumpla con los siguientes requisitos:

- Debe ser clara y transparente.
- El contenido de iones de calcio y magnesio (dureza total) debe tender a cero.
- Una alcalinidad total baja.
- Bajo contenido de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ).
- Bajo contenido de sólidos disueltos.
- Baja concentración en  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ , tal que no afecte las propiedades mecánicas del equipo.

Tomando en cuenta la opinión de diversos autores respecto al tema, en la Tabla 1 se presenta una comparación de los parámetros que debe cumplir el agua para calderas, para una presión de 150 psi. Se fijó esta presión debido a que es la máxima presión de diseño de las calderas de la empresa en cuestión.

**Tabla 1. Parámetros recomendados para el agua utilizada en calderas, a una presión de 150 psi.**

	NALCO *	AWWA **	AMBA ***	Empresa
<b>Dureza (ppm <math>\text{CaCO}_3</math>)</b>	0	0	0	0
<b>Sílice (ppm <math>\text{SiO}_2</math>)</b>	<100	100-133	<125	-
<b>TDS (ppm)</b>	<4000	3000-5000	<3500	1500-3000
<b>pH</b>	-	9,5	-	10,5-11,5
<b>Sulfito (ppm <math>\text{Na}_2\text{SO}_3</math>)</b>	30-60	30-60	30-60	30-60
<b>Fosfato (ppm <math>\text{PO}_4</math>)</b>	30-60	40-80	-	30-60
<b>Hidróxido (ppm <math>\text{CaCO}_3</math>)</b>	300-400	150-300	-	250-600
<b>Alcalinidad total (ppm <math>\text{CaCO}_3</math>)</b>	-	<700	<600	350-750

(NALCO\*) Kemmer, 1987.

(AWWA\*\*) American Water Works Association, 1987.

(AMBA\*\*\*) American Boiler Manufacturers Association.

Para lograr el cumplimiento de estos parámetros, existen diversos métodos de acondicionamiento de aguas que se realizan mediante análisis químicos del agua de alimentación, así como del agua de los equipos involucrados (calderas, suavizadores, filtros y tanques de almacenamiento de agua), los cuales sirven para rectificar periódicamente las dosificaciones y tratamientos que se hagan sobre las aguas. (González, Peña, & Susial, 2000).

### *Descripción de equipos de transferencia de calor*

#### *Calderas*

Una caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería que está diseñado para generar vapor saturado. Éste vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado.

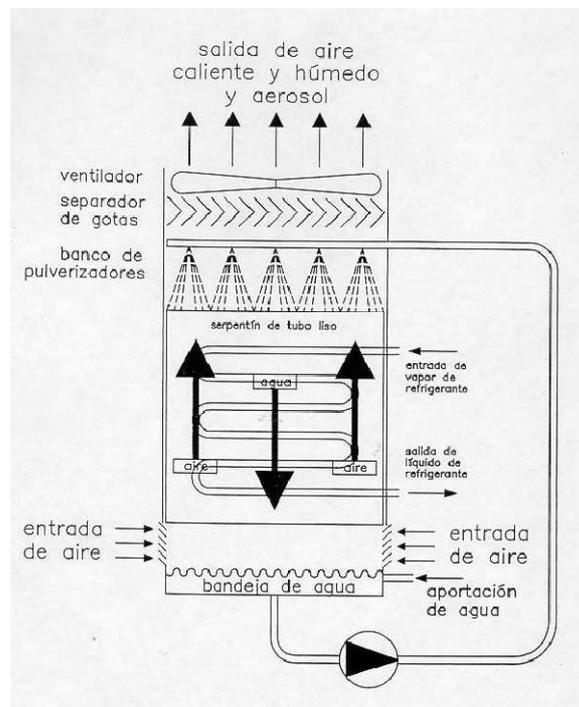
Las calderas son un caso particular de intercambiadores de calor, en las cuales se produce un cambio de fase. Además son recipientes a presión, por lo cual son construidas en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. Entre los tipos de calderas se encuentran las pirotubulares y las aquatubulares. En la Figura 1 se puede observar un esquema de una caldera pirotubular.



**Figura 1. Esquema de una caldera tipo pirotubular**  
(Fuente: Torre, Salazar & Fernández, 2005).

### Condensador evaporativo

Este tipo de condensador es una combinación de condensador y torre de enfriamiento. En él se emplea tanto aire como agua. El agua es bombeada hacia arriba desde un tanque hasta una serie de rociadores o boquillas de atomización situadas en la parte superior de los tubos del condensador, por donde circula el fluido refrigerante. Las finas gotitas que se rocían sobre los tubos producen el efecto de enfriamiento de los tubos. Al mismo tiempo, el aire que es introducido en el interior del condensador por medio del ventilador, y que pasa sobre el condensador, produce un efecto de eliminación adicional de calor. Parte de esa agua se evapora, de donde grandes cantidades de aire son movidas por uno o más ventiladores y le extraen calor al vapor de agua, el cual se condensa y cae sobre el depósito para volver a ser utilizada. El separador de gotas, que es una placa que contiene pequeños orificios, está situado encima de los rociadores para prevenir que se escapen gotitas de agua. En la Figura 2 se presenta el esquema de un condensador evaporativo (Mateos, 2001).



**Figura 2. Esquema de un condensador evaporativo**  
(Fuente: Viti, 2002).

### ***Sistema de acondicionamiento del agua para calderas***

Este sistema consta de un tratamiento físico y uno químico: cada fase involucra una serie de etapas que darán como resultado la obtención de agua adecuada para ser utilizada en calderas. Dichas etapas se presentan en las Tablas 2 y 3, y se pueden observar esquemáticamente en la Figura 3, en donde se muestra el sistema de acondicionamiento del agua de alimentación para calderas.

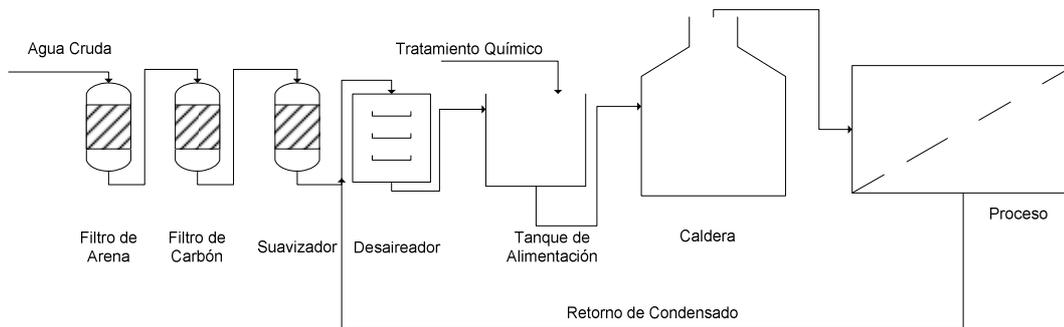
**Tabla 2. Etapas del Tratamiento Físico del agua de alimentación para calderas.**

<b>Etapas</b>	<b>Equipo utilizado</b>
Eliminación de sólidos suspendidos	Filtro de arena
Eliminación de cloro libre	Filtro de carbón
Eliminación de dureza total	Suavizador
Disminución de oxígeno disuelto	Desaireador

**Tabla 3. Etapas del Tratamiento Químico del agua de alimentación para calderas.**

<b>Etapas</b>	<b>Producto utilizado</b>
Disminución de oxígeno disuelto	Producto anticorrosivo
Suspensión de los sólidos disueltos	Producto antiincrustante
Control de espuma formada (interfase líquido-vapor)	Producto antiespumante

Una vez que el agua es acondicionada para alimentar a la caldera, ésta es destinada al proceso para el cual es requerido. Por último, el agua en estado líquido es retornada al desaireador (retorno de condensado), para disminuir la concentración de oxígeno disuelto adquirida en el proceso. El retorno de condensado es una parte muy importante del sistema de generación de vapor, ya que al utilizar el vapor producido en la caldera (bajo la forma de condensado) y retornarlo nuevamente a ésta se completa el ciclo, haciéndolo más eficiente. En la Figura 3 se presenta el sistema de acondicionamiento del agua de alimentación para calderas.



**Figura 3. Acondicionamiento del agua para calderas.**

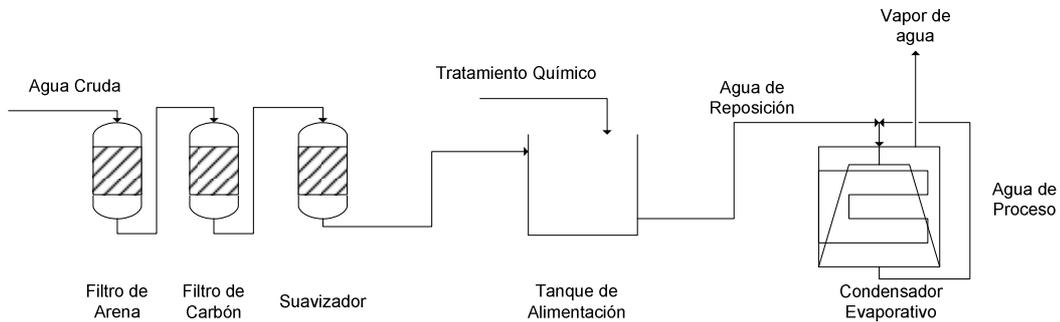
Debido a la importancia que tiene el condensado para aumentar la eficiencia del ciclo de generación de vapor, la recuperación de éste en mayor cantidad y calidad incide en dicha eficiencia; por lo tanto, el condensado debe ser tratado químicamente para lograr los siguientes objetivos:

- Evitar que la superficie metálica del sistema de condensado se corroa.
- Evitar que los subproductos de la corrosión entren a la caldera y causen problemas de depósitos en ésta.

Los contaminantes más comunes que están presentes en el condensado son el hierro y el cobre, los cuales afectan su calidad ocasionando pérdidas de energía y agua, además de los daños que producen en las calderas los depósitos originados por estos contaminantes. (The American Water Works Association, Inc, 1987).

### ***Sistema de acondicionamiento del agua para condensadores evaporativos***

Básicamente, la separación física del agua de alimentación para este tipo de equipos es la misma que se utiliza en el agua de calderas, exceptuando el uso del desaireador. En cuanto al tratamiento químico, es similar al aplicado a las calderas, excluyendo el uso de antiespumante y añadiendo un producto a base de amonio que controla el crecimiento microbiológico en el agua. En la Figura 4 se muestra el sistema de acondicionamiento del agua de alimentación para condensadores evaporativos.



**Figura 4. Acondicionamiento del agua para condensadores evaporativos.**

### ***Tratamiento Físico (Externo)***

A continuación se explicará como funciona cada uno de los equipos involucrados en el tratamiento físico del agua.

#### ***Filtración***

El proceso de filtración consiste en pasar el agua a través de un medio poroso, para remover los sólidos suspendidos y coloidales presentes en el agua y producir un efluente con una turbidez de hasta menos de 1 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez). Una vez que las partículas llegan al medio filtrante, son retenidas por una fuerza de atracción. El medio poroso puede ser arena, antracita, carbón y otros tipos de minerales granulares.

Es evidente que las características del medio filtrante constituyen una variable muy importante. El tamaño y la forma de las partículas determinan la eficiencia con la cual el medio remueve los sólidos: las partículas que son agudas forman espacios vacíos grandes, de manera tal que remueven menos sólidos finos que las formas redondeadas. Una vez que el medio filtrante cumple su tiempo de operación establecido (corrida de servicio), se deben remover las partículas adheridas al lecho del filtro, a través de lo que se conoce como retrolavado, el cual consiste en invertir el sentido del flujo de agua, es decir, el agua entra por la parte inferior del filtro, remueve y saca del filtro el material acumulado, para luego ser llevado al drenaje de

la empresa. (AWWA, 1987). La corrida de servicio del filtro puede ser determinada mediante la lectura de la turbidez en línea del agua filtrada o por la pérdida de carga presentada por el lecho filtrante en el equipo en cuestión.

Los filtros pueden tener uno, dos o tres tipos de medios filtrantes, estos últimos denominados multicapas.

*Filtros de una sola capa.* Como su nombre lo indica, este tipo de filtro tiene un solo medio filtrante, el cual es soportado por grava. Esta capa de grava se denomina sobrelleno o soporte del lecho, y tiene diferentes tamaños.

La filtración ocurre por el entrapamiento de los sólidos suspendidos dentro de los espacios vacíos de los granos filtrantes. Los sólidos penetran el lecho de 5 a 10 cm y cuando más del 90% del material suspendido está entrapado, se produce un incremento de la caída de presión entre la entrada del agua al filtro y su salida durante la corrida. Para filtros con un solo medio filtrante, la pérdida de carga normalmente es de 3,5 m de agua, lo que indica el final de la corrida del filtro y éste es puesto fuera de servicio para ser lavado (retrolavado). (Lipesa, 1998).

*Filtros de dos o tres capas.* Estos filtros se caracterizan por la distribución de su medio filtrante, de acuerdo con su tamaño y densidad. El menos denso está en la parte superior y el más denso en la parte inferior. Generalmente están constituidos por una proporción aproximada de 60% antracita, 30% arena y 10% garnet.

El flujo de la filtración es descendente, lo que permite una penetración más uniforme para las partículas, mayor velocidad de filtración y corridas más largas. Debido a las diferencias de densidades de los medios filtrantes, la distribución de sus capas se mantiene aún después de altos caudales de retrolavado.

Como un filtro de dos capas es más efectivo que uno simple, con la introducción de una tercera capa más pesada de arena se obtiene una mayor calidad de agua filtrada. Los filtros multicapas pueden operar a un caudal de 5 a 6 gpm/pie<sup>2</sup> de área de lecho y producir una calidad de agua de 0,5 NTU. Este valor de turbidez

puede ser igual o mejor que para un filtro de arena, pero con una producción de agua mucho mayor.

En relación con el retrolavado, es importante hacer la correcta selección del tamaño de arena y antracita para que la fluidización (expansión del lecho) durante el retrolavado se realice totalmente; por lo tanto, para el tamaño más pequeño del lecho de grava (el tamaño de partícula del cual el 90% son finos) su caudal de retrolavado debe ser igual o menor que para el tamaño más pequeño del lecho de antracita (90% del tamaño son finos). Para filtros multicapas, una pérdida de carga de 4,6 a 6 m de agua indica que finaliza la corrida de servicio y se debe realizar un retrolavado. (Lipesa, 1998).

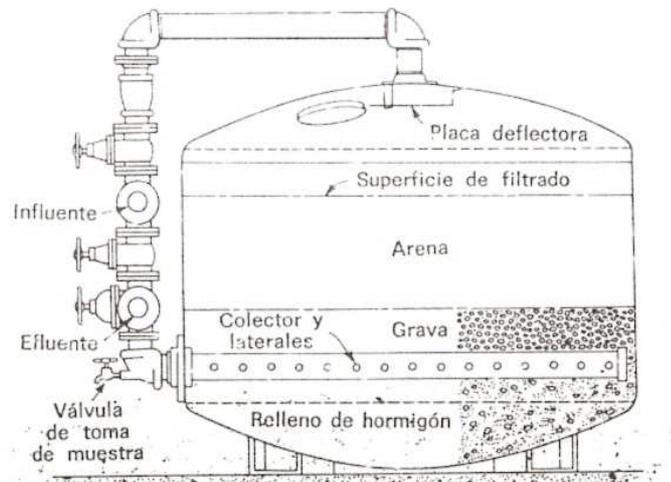
*Tipos de Filtros.* Existen tres tipos con medio filtrante granular: gravedad, flujo ascendente y presión, siendo este último el más utilizado en el tratamiento de aguas industriales y el que se encuentra en la empresa en estudio.

*Filtros a presión.* Estos filtros son fabricados en unidades verticales y horizontales; su principal uso es en la industria. Tiene una serie de ventajas entre las que destacan: su bajo costo de inversión, largas corridas de filtro, ocupan poco espacio y pueden ser totalmente automatizados.

Los filtros verticales pueden ser de 0,3 a 30,5 m de diámetro, con una capacidad de filtrado máximo de 300 gpm y una carga hidráulica de 3 gpm/pie<sup>2</sup>, para una sola capa, y de 6 a 8 gpm/pie<sup>2</sup> para dos capas o multicapas.

El retrolavado para filtros de una o dos capas y multicapas se realiza cuando la caída de presión es de 0,35 a 0,56 kg/cm<sup>2</sup> o cuando la turbidez del agua filtrada alcanza su límite. A temperatura ambiente, el caudal del retrolavado es de 6 a 8 gpm/pie<sup>2</sup> para antracita y de 13 a 15 gpm/pie<sup>2</sup> para arena.

A continuación se muestra la sección transversal de un filtro de presión típico (Figura 5):



**Figura 5. Sección transversal de un filtro de presión típico (Fuente: AWWA, 1987).**

### *Intercambio iónico*

Existen procesos industriales como los sistemas de enfriamiento, generación de vapor, efluentes, etc., donde se requiere un acondicionamiento del agua muy específico relacionado cuantitativa y cualitativamente con los sólidos disueltos presentes. Para realizar este acondicionamiento específico se utiliza el intercambio iónico, por medio de resinas o como también son conocidas, zeolitas.

Las resinas son macromoléculas insolubles en el agua, compuestas por una alta concentración de grupos ácidos o básicos integrados por una matriz de un polímero sintético. La naturaleza de los grupos iónicos unidos a la estructura de la resina determina el comportamiento de ésta, el número total de grupos por unidad de peso de resina determina la capacidad de intercambio y el tipo de grupo afecta el equilibrio del intercambio iónico y la selectividad iónica.

Una resina de intercambio iónico tiene como objetivo intercambiar ciertos tipos de iones indeseables que están presentes en el agua por iones deseables que están presentes en la resina. El agua que va ser acondicionada, independientemente de la fuente de suministro, contiene distintas concentraciones de sales disueltas, las cuales están disociadas en forma de iones: los iones positivos son los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.) y los negativos son los aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,

etc.). (Kemmer, 1987). Una vez realizado el intercambio y por agotamiento en la resina de los iones deseables, se procede a realizar el proceso de regeneración, con una solución concentrada de iones deseables, para que éstos se queden en la resina y se reinicie el ciclo. Todo este proceso se realiza continuamente, en lo que se denomina unidad de intercambio iónico y cuyas características se describirán posteriormente.

*Capacidad de la resina.* Se define como capacidad de la resina el valor de la concentración de iones que pueden ser retenidos por una unidad de peso de resina. Suele expresarse como meq de soluto retenidos/g resina seca. La capacidad de la resina es un parámetro para la selección del intercambiador, ya que generalmente se requieren capacidades altas para la separación o purificación a realizar.

La determinación de la capacidad máxima de una resina catiónica se realiza intercambiando ésta con una disolución básica: se produce una reacción irreversible entre el catión saliente de la resina con los iones  $\text{OH}^-$  de la disolución, de tal forma que si existe suficiente concentración de soluto llega a agotarse la capacidad total de la resina.

Para el cálculo de la capacidad de la resina en lecho fijo en unas condiciones determinadas, es necesario conocer cuál es la cantidad total de soluto retenido por la misma. Este valor se puede determinar a partir de la curva de ruptura del sistema en función del volumen eluído (Figura 6), calculando el área de la zona comprendida entre la curva de ruptura y la línea recta horizontal correspondiente a la concentración de la disolución de entrada. Dividiendo este valor entre el peso total de resina contenido en la columna, se determina la capacidad de la resina utilizada en ciertas condiciones. (Universidad Autónoma de Madrid, 2006).

$$q_0(\text{meq/g}) = \frac{\text{Área(L)} \times C_0(\text{meq/L})}{P_R(\text{g})}$$

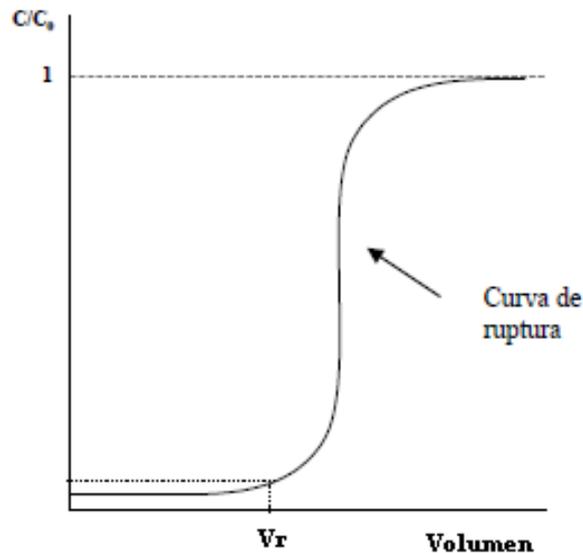
donde:

$q_0$  = Capacidad de la resina

Área = Área sobre la curva de ruptura

$C_0$  = Concentración inicial de NaOH

$P_R$  = Peso del lecho de resina

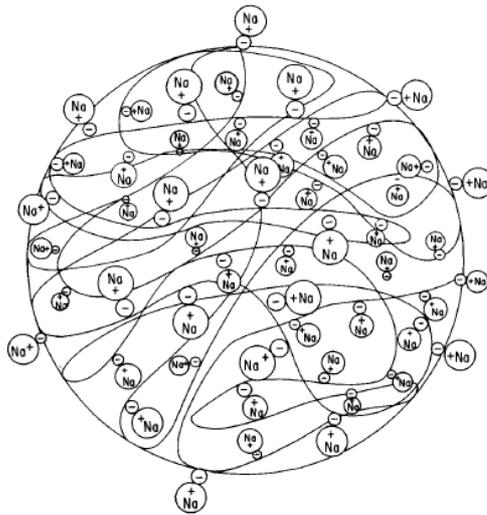


**Figura 6. Curva de Capacidad de Intercambio Iónico.**  
(Fuente: Universidad Autónoma de Madrid, 2006).

*Tipos de resina.* Esta clasificación se basa en los grupos ionizables que se encuentran en la resina. De acuerdo con esto, su clasificación es:

*Resinas catiónicas.* Como lo dice su nombre, las resinas catiónicas tienen cationes para ser intercambiados. Los grupos funcionales son ácidos tales como:  $R-SO_3H$  (sulfónico),  $R-OH$  (fenólico),  $R-COOH$  (carbóxico) y  $R-PO_3$  (fosfónico). La letra R representa la red orgánica de la resina. Las resinas catiónicas fuertes contienen grupos funcionales derivados de un ácido fuerte ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ) y las débiles contienen grupos funcionales derivados de un ácido débil ( $H_2CO_3$ ).

A continuación se muestra la representación esquemática de una perla de resina de intercambio catiónico fuerte (Figura 7):

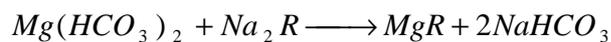
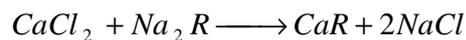


**Figura 7. Representación esquemática de una resina de intercambio catiónico fuerte (Fuente: Kemmer, 1987).**

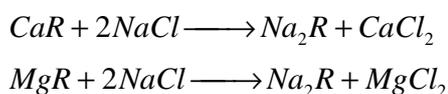
*Resinas aniónicas.* Las resinas aniónicas tienen aniones para ser intercambiados, y sus grupos funcionales son: R-NH<sub>2</sub> (amina primaria), R-R'NH (amina secundaria), R-R'<sub>2</sub>N (amina terciaria) y R-R'<sub>3</sub>N<sup>+</sup>OH<sup>-</sup> (amonio cuaternario). La letra R' representa radicales libres como el metilo (CH<sub>3</sub>). Las resinas aniónicas que contienen grupos derivados de aminas débiles se denominan resinas aniónicas débiles, y las derivadas de compuestos de amonio cuaternario son aniónicas fuertes. (Lipesa, 1998).

### *Suavización*

La suavización es uno de los procesos más antiguos y usados de intercambio iónico. En la suavización se remueve la dureza presente en el agua, inclusive el hierro y el manganeso. El agua que va ser suavizada pasa por una columna de resina, donde son removidos los iones de calcio y magnesio de acuerdo a la siguiente reacción:



Como los procesos no son 100% eficientes, siempre existirá una pequeña fuga de dureza. Esta fuga dependerá principalmente de la dureza del agua cruda, de la concentración de sodio en la resina y de la regeneración del suavizador. En el momento en que se agota la resina, se produce la fuga de la dureza en el efluente del suavizador. En este punto, se debe sacar de servicio la unidad y realizar la regeneración. La resina agotada es tratada con una solución concentrada de cloruro de sodio (aproximadamente al 10% en peso), obteniéndose la siguiente reacción (Kemmer, 1987):



Normalmente, la resina libera más fácilmente sodio (reacción de suavización) que calcio y magnesio (reacción de regeneración); es por ello que se recomienda realizar la regeneración con un exceso de iones de sodio, es decir, la cantidad de sodio en la salmuera debe ser equivalente a la cantidad de calcio y magnesio presente en la resina agotada, en la salmuera y a una concentración adecuada (por ejemplo, al 10%). De esta forma, los iones sodio pueden desplazar más fácilmente a los iones calcio y magnesio que salen de la unidad, a través de los fluidos de desechos de salmuera y agua de enjuague.

*Ciclos del suavizador.* Un suavizador de sodio funciona mediante dos ciclos: el de suavización, que produce agua suave para su uso, y el de regeneración, que consiste en restaurar la capacidad de intercambio de la resina. Durante el ciclo de servicio, el agua entra al suavizador a través de un distribuidor, fluye a lo largo del lecho de resina, sale de éste y es transferida al lugar donde se usa. El flujo debe ser lo más constante posible, para evitar valores muy altos y operaciones discontinuas. (AWWA, 1987).

El ciclo de regeneración se realiza cuando la resina se agota. La señal que indica que la unidad debe ser sacada de servicio para realizar la regeneración se obtiene mediante pruebas del operador, después de cumplir el tiempo de servicio o

cuando ha suavizado un determinado volumen de agua (el cual puede ser estimado mediante el cálculo de la capacidad de la resina, explicado anteriormente). Un monitoreo más preciso se alcanza a través de análisis continuos de la dureza del agua producida.

La regeneración se realiza en cuatro pasos, por medio de la unidad de intercambio iónico o suavizador (ver Figuras 8A y 8B):

- *Retrolavado:* terminando el ciclo de servicio por agotamiento de la resina, se inicia el retrolavado, expandiendo el lecho un 50% mínimo para liberar aire atrapado, aflojar el lecho, reclasificar el tamaño de las partículas de resina y remover del lecho material insoluble.
- *Inyección de salmuera:* una vez finalizado el retrolavado, una solución de salmuera de 5 a 10% de concentración es inyectada durante 30 minutos. La máxima capacidad de intercambio de la resina se logra con 10% de concentración de salmuera; ésta es suministrada al suavizador a través de un distribuidor, colocado sobre la parte superior del lecho de resina.
- *Lavado lento:* finalizado el paso anterior, la solución de sal que permanece en el interior del suavizador es desplazada lentamente al mismo caudal de inyección de salmuera al menos por 15 minutos, y el volumen mínimo usado en esta operación debe ser de 10 gal/pie<sup>3</sup> de resina.
- *Lavado rápido:* este lavado se realiza para remover el exceso de salmuera de la resina, y finaliza cuando la concentración de cloruros en el efluente es igual al del agua a la entrada y dureza total igual a cero ppm, como CaCO<sub>3</sub>.

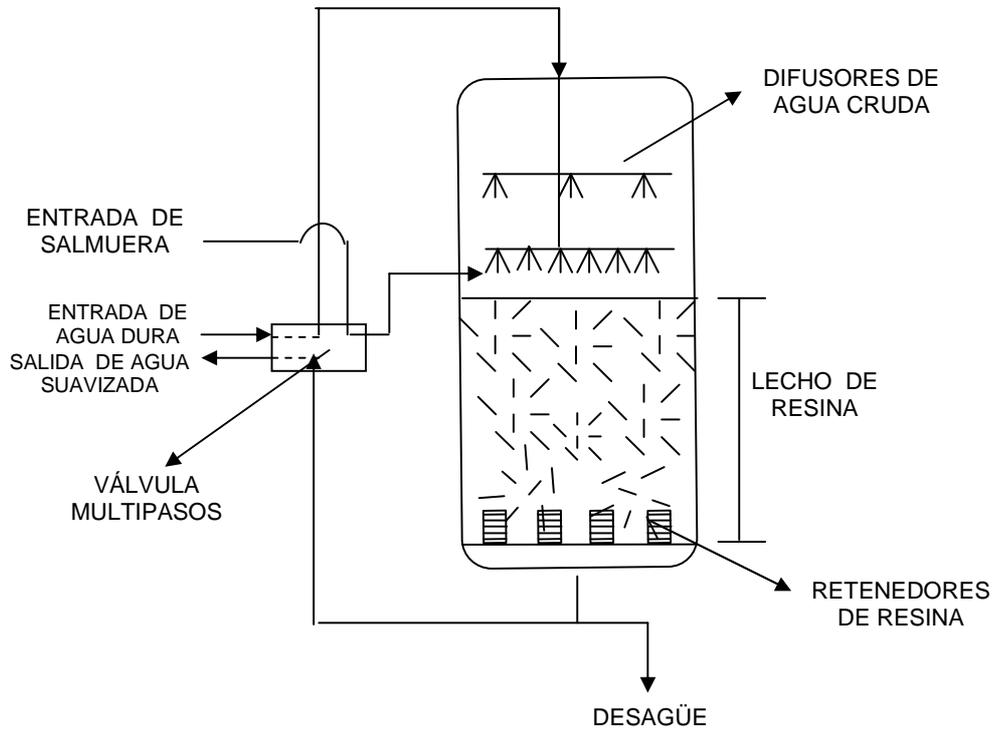


Figura 8A. Esquema de una unidad típica de intercambio iónico.

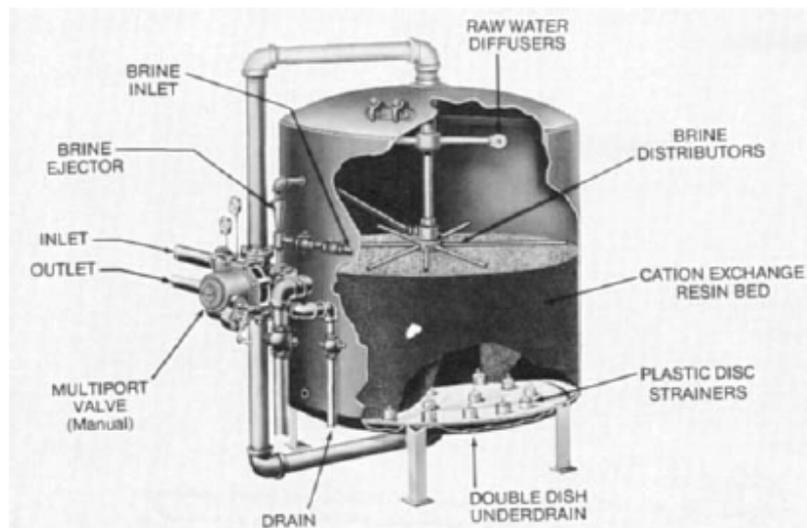


Figura 8B. Unidad típica de intercambio iónico (Fuente: Kremmer, 1987).

Al concluir el último paso de la regeneración, la unidad está disponible para entrar al ciclo de servicio.

#### *Desaireación del agua de alimentación*

El agua contiene gases disueltos, siendo los más comunes el oxígeno y el dióxido de carbono, que causan problemas de corrosión. El oxígeno produce corrosión localizada y el dióxido de carbono corrosión generalizada en metales ferrosos y sus aleaciones, y se incrementa en presencia de oxígeno.

Debido a que la corrosión es un problema bastante grave en cualquier sistema, es importante poseer conocimientos acerca de ésta. Una forma sencilla de definirla es simplemente como el proceso mediante el cual un metal puro (estado de alta energía) retorna a su forma natural como óxido o sales metálicas (estado de baja energía). Esto significa que los metales son inestables con respecto a su medio ambiente y tienen tendencia a volver a su estado original, es decir, corroerse. (Lipesa, 1998). Entre las medidas preventivas para evitar la corrosión de equipos industriales, se encuentra la eliminación de los gases presentes en el agua, mediante la desaireación (forma mecánica) y el uso de secuestrantes (forma química).

*Desaireación mecánica.* La desaireación mecánica es un procedimiento muy usado para la eliminación física de los gases disueltos en el agua. En un desaireador se pueden eliminar el oxígeno (el más importante en remover) y el dióxido de carbono.

La desaireación mecánica está basada en los siguientes aspectos:

- *Ionización.* Un gas puede ser desaireado dependiendo del grado de ionización en que se encuentre, es decir, mientras menos ionizado esté, hay mayor posibilidad de removerlo. De los tres gases mencionados, el oxígeno no está ionizado, por lo tanto, es más fácil remover el dióxido de carbono si cumple con la siguiente ecuación:



Los gases que se encuentren en forma molecular (CO<sub>2</sub>) pueden ser removidos. Para lograr una mayor remoción de estos gases, debe desplazarse hacia la izquierda la reacción de equilibrio, agregando ácido.

- *Presiones parciales.* Un gas ionizado estará disuelto en el agua solamente hasta un punto en que la presión parcial del gas en el agua sea igual a la presión parcial del gas en la atmósfera en contacto con él. En la desgasificación se aprovecha la propiedad porque se modifica el equilibrio, usando vapor que contiene poco o nada de oxígeno y se pone en contacto con el agua, por lo tanto el oxígeno del agua se desplaza hacia el vapor hasta lograr el equilibrio de su presión parcial entre los dos gases.
- *Temperatura.* La solubilidad de estos gases en el agua disminuye a medida que la temperatura aumenta, en consecuencia, la temperatura del agua se debe incrementar hasta su punto de ebullición, donde la solubilidad para el caso del oxígeno es igual a cero. Sin embargo, esto no asegura una remoción total del oxígeno, debido a que en la interfase vapor-líquido el agua estará más fría que el vapor, por lo tanto, algo de oxígeno quedará disuelto en el agua.
- *Agitación.* La remoción de los gases disueltos puede incrementarse si el agua a desairear es dispersa en pequeñas gotas, ya que de esta forma se calienta fácilmente. La interfase líquido-vapor es continuamente alterada, por lo que disminuye la posibilidad de los gases de quedarse disueltos en la zona fría del líquido. Mientras más pequeñas son las gotas, mejor y más rápido es la remoción, debido a que los gases tienen que desplazarse menos para llegar a la superficie y salir de la fase agua.
- *Remoción de gases.* Para evitar la resolución de los gases en el agua, éstos deben ser removidos del desgasificador. La remoción se produce cuando el vapor que usa para el calentamiento y que pasa por las gotas de agua es sacado inmediatamente del agua desaireada.

Para que la desaireación mecánica sea efectiva debe cumplirse lo siguiente:

- Calentamiento del agua en la sección de desaireación entre 0,6 y 2 °C por debajo de la temperatura de entrada del vapor.
- Eliminación de un 95% o más de los gases no condensables en la sección de calentamiento primario y posteriormente la mayor remoción posible en la

zona de íntimo contacto vapor-agua, del oxígeno y otros gases no condensables.

- Continua eliminación de los gases no condensables dentro del desaireador, para evitar que éstos pasen a través de la unidad desgasificadora hacia el sistema de generación de vapor.

### ***Tratamiento Químico (Interno)***

El agua tiene sólidos disueltos y suspendidos, removiendo estos últimos mediante clarificación y filtración. Sin embargo, los sólidos disueltos permanecen en el agua y si ésta va a ser usada como agua de alimentación para calderas debe ser acondicionada, es decir, se deben eliminar los gases y sólidos disueltos.

La eliminación de los sólidos disueltos es un proceso donde la efectividad de remoción no es del 100%, por lo tanto, algunos sólidos que quedan en el agua irán vía agua de alimentación a la caldera. Dependiendo de las condiciones de presión de operación de la caldera, es decir, calderas de baja, media o alta presión, el agua requerida deberá ser más pura a medida que la presión de operación aumente.

A pesar de que el agua de alimentación de una caldera es acondicionada, sus pocos sólidos disueltos presentes se concentran en el agua de caldera, produciendo depósitos o incrustaciones que originan graves problemas, para cuya solución se necesita realizar gastos de mantenimiento y, como una consecuencia adicional, paradas de planta no programadas con sus respectivas pérdidas de producción. Por lo tanto, es necesario asegurarse de que el agua de caldera tenga el tratamiento químico adecuado para evitar todos los problemas y sus consecuencias mencionadas. Antes de detallar el tratamiento químico interno en una caldera, se referirán los pormenores relacionados con las incrustaciones o depósitos en una caldera. (Kemmer, 1987).

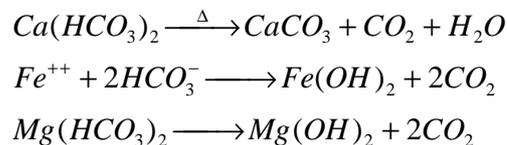
### ***Incrustaciones o depósitos en una caldera***

Los depósitos o incrustaciones consisten en una acumulación de material sobre la superficie de la caldera, la cual ocasiona sobrecalentamiento y restricciones en la circulación del agua; estas dos condiciones causan daños en el equipo,

ocasionando paradas no programadas. Un sitio adecuado para que se forme la incrustación lo representan las zonas de alta transferencia de calor, esto debido a que existe elevada temperatura y una alta evaporación, lo que incrementa en forma significativa la concentración de los sólidos disueltos.

La importancia de un tratamiento interno adecuado del agua de calderas es fundamental, debido a que las calderas con agua de alimentación de 0,01 a 2 ppm de dureza total y sin tratamiento químico interno no aseguran una operación libre de depósitos. Algunos sólidos que están solubles en el agua de alimentación precipitan en el agua de caldera, fundamentalmente por dos razones: una es por el cambio químico del agua y la otra por la disminución de la solubilidad de algunas sales.

En cuanto al cambio químico del agua de alimentación, cuando pasa por la caldera se produce una conversión de bicarbonato a carbonato; éste se combina con el calcio para formar carbonato de calcio. La conversión de hierro a hidróxido ferroso y magnesio a hidróxido de magnesio representa cambios químicos. En los tres casos los cambios químicos producen compuestos altamente incrustantes, debido a que para ellos al aumentar la temperatura se disminuye su solubilidad en el agua. Las reacciones involucradas se detallan a continuación: (Kemmer, 1987)



Los contaminantes más comunes son el calcio, magnesio, sílice, hierro, cobre, aluminio y, en menor grado, lodo y aceite; todos éstos pueden estar presentes en un agua de alimentación de caldera y pueden formar depósitos. La concentración de cada uno de ellos en los depósitos varía de caldera a caldera, dependiendo de variables tales como la calidad del agua de alimentación y el tratamiento químico interno.

La presencia de incrustaciones y depósitos en los tubos de una caldera ocasiona una serie de problemas en ésta, tales como disminución de la eficiencia, altos costos de mantenimiento, paradas no programadas, equipos fuera de servicio y

pérdidas en la producción. Para evitar o minimizar los problemas mencionados, es necesario realizar el tratamiento químico interno.

El continuo avance del desarrollo de polímeros en el área de acondicionamiento de aguas ha permitido colocar en el mercado una variedad de polímeros y elaborar programas de tratamiento químico interno denominados “todo orgánico”, cuya ventaja principal consiste en obtener calderas más limpias sin el potencial de corrosión y con superficies metálicas pasivas.

Existen diversos programas de tratamiento interno para calderas, los cuales previenen las incrustaciones y se mencionan a continuación: coagulación, fosfato-polímero, quelato-polímero, sólo polímeros y los programas especiales de baja alcalinidad para calderas de alta presión. (AWWA, 1987).

*Programa fosfato orgánico-polímero (antiincrustante).* De todos los programas mencionados anteriormente, el más utilizado es el fosfato orgánico-polímero, ya que se obtienen calderas más limpias y, comparando con el tratamiento quelato-polímero, no es corrosivo.

El principio de este programa se basa en el uso de fosfato orgánico (fosfonatos), que son una familia de compuestos organofosforados y que poseen una serie de propiedades secuestrantes y dispersantes, las cuales son útiles en el acondicionamiento de aguas de calderas, ya que dichas propiedades ayudan a que las purgas del equipo sean más efectivas, lo que resulta en la inhibición de la incrustación y corrosión. Los fosfonatos tienen enlace P-C y los polifosfatos un enlace P-O-P, lo que les da una diferencia estructural, que es la responsable de la alta estabilidad de los fosfonatos en condiciones extremas de temperatura y pH.

Los fosfonatos usados para este tratamiento son los siguientes (Lipesa, 1998):

- 1-hidroxi etilideno 1,1 ácido difosfónico (HEDP).
- Aminotriometileno ácido fosfónico (ATMP).
- Hexametenodiamina tetra-ácido metileno fosfónico (HMDTMP).

La comparación entre las ventajas y desventajas que presenta este programa se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4. Ventajas y desventajas del Programa fosfato orgánico-polímero (antiincrustante).**

Ventajas	Desventajas
Calderas limpias.	Sólo puede ser usado en calderas de hasta 1000 psi de presión.
No es corrosivo.	Ataca el cobre o sus aleaciones.
Acepta variaciones de dureza en el agua de alimentación.	El aceite en el agua debe ser eliminado.
No produce lodos.	No se debe usar en calderas incrustadas o sucias.
Remueve los depósitos existentes en la caldera.	-

*Control del programa.* Los parámetros que puede controlar este programa son: alcalinidad, sílice y sólidos disueltos. Debido a que los fosfonatos son corrosivos al cobre y sus aleaciones, es importante que el punto de aplicación del producto se realice posterior al sitio donde se encuentren estos metales (tanque de agua de alimentación, bomba de agua de alimentación, etc.).

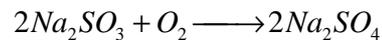
También es importante señalar que estos productos tienen propiedades solubilizantes, por lo tanto, pueden remover especies químicas que están incrustadas o formando depósitos en un caldera. Por ello no es recomendable usarlos en calderas que tengan incrustaciones o realizar limpiezas químicas de las calderas en servicio. En cuanto a la concentración residual de fosfato en el agua de calderas, ésta es presentada en la Tabla 1, por lo que al mantener dicha concentración se puede minimizar los efectos de la incrustación en los equipos.

*Eliminación química de oxígeno (anticorrosivo)*

La desaireación mecánica no elimina el 100% del oxígeno disuelto presente en el agua. Para el caso de los desaireadores, éstos reducen el oxígeno hasta 7 ppb o menos. Aun con estos valores tan bajos de oxígeno, el potencial corrosivo de éste en

el sistema de generación de vapor es muy alto, debido a las altas temperaturas existentes. Por lo tanto, para la eliminación total del oxígeno se deben usar secuestradores químicos, los cuales reaccionan con el oxígeno para producir compuestos químicos no perjudiciales al sistema; posteriormente estos productos son removidos de la caldera mediante la purga. (González, Peña & Susial, 2000)

El sulfito de sodio es uno de los productos más usados para la eliminación química del oxígeno, cuya reacción química es la siguiente:



El producto de la reacción es el sulfato de sodio, una sal muy soluble que no causa problemas en el sistema y se puede eliminar por la purga. De la estequiometría de la reacción se determina que se requieren 7,88 ppm de sulfito de sodio al 100% por 1 ppm de oxígeno disuelto en el agua; pero estableciendo una concentración residual de este compuesto en el agua de calderas, según lo planteado en la Tabla 1, se puede garantizar la protección de este gas corrosivo. Como toda reacción química, ésta va a depender de una serie de variables:

- pH: su velocidad de reacción aumenta cuando el pH incrementa; su valor óptimo es entre 8 y 10.
- Temperatura: al igual que el pH, la velocidad de reacción aumenta cuando la temperatura se incrementa.
- Catalizador: como en los casos anteriores, la reacción es hasta 500 veces más rápida cuando se utilizan catalizadores tales como sales de cobalto, níquel y manganeso.

El sulfito de sodio tiene una serie de ventajas y desventajas, las cuales se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5. Ventajas y desventajas del Sulfito de sodio (anticorrosivo).**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reacciona rápidamente con el oxígeno a bajas y altas temperaturas.	Requiere de altos residuales de sulfitos en el agua de caldera.
Fácil de analizar su residual en el agua.	Adiciona sólidos al agua de caldera, por lo tanto puede requerir mayor cantidad de purgas.
Es un producto bastante seguro y de fácil manejo.	No puede ser usado en agua para atemperación o sobrecalentadores.
Bajo costo.	No debe ser usado en sistemas de condesado.
-	Se descompone sobre los 1500 psig, produciendo gases ácidos como el H <sub>2</sub> S y el SO <sub>2</sub> .

*Control de arrastre (antiespumante)*

El vapor no contiene sólidos, teóricamente es agua pura en estado gaseoso. Sin embargo, el vapor producido por una caldera no siempre es agua pura, porque en determinados momentos contiene sólidos provenientes del agua de caldera, y esta contaminación del vapor es lo que se denomina arrastre. Debe diferenciarse el hecho de que gases tales como CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y aminas volátiles para protección del condesado, cuando están presentes en el vapor, no se considera arrastre. (González, Peña & Susial, 2000). Los factores que afectan la completa separación del vapor en una mezcla líquido-vapor son de tipo mecánico y químico.

*Factores mecánicos.* El diseño de la caldera, insuficientes equipos de separación, altos niveles de agua y carga de caldera son los factores típicos que afectan una buena separación líquido-vapor.

En calderas modernas del tipo agua por los tubos, pueden tener problemas de arrastre del tipo mecánico, ya que el agua cambia de fase en menos de 15 minutos. Este proceso de generación de vapor es de severa turbulencia en el domo superior. En algunos diseños de caldera, los tubos ascendentes descargan por debajo del nivel de

agua, causando una gran turbulencia en el tambor superior. El caso contrario sucede en unidades donde los tubos generadores de vapor descargan cerca o sobre el nivel del agua, produciendo una agitación mínima. La solución a esta situación es el uso de separadores de vapor, que disminuyan efectivamente el severo efecto de turbulencia.

Las condiciones de operación, tales como de la carga, altos niveles de agua en el domo superior o durante el soplado de la caldera, son situaciones que favorecen el arrastre de agua de caldera en el vapor. (Lipesa, 1998)

*Factores químicos.* Los dos mecanismos básicos de arrastre químico son por espuma y por arrastre selectivo del vapor. La espuma consiste en la formación de burbujas sobre la superficie del agua de caldera. Cuando estas burbujas estallan, las gotas pequeñas se van con el vapor. El arrastre selectivo del vapor ocurre fundamentalmente con la sílice, ya que se puede presentar en un amplio rango de presión. El arrastre selectivo de sílice es un problema bastante grave, debido a que afecta el funcionamiento de equipos.

Los factores más importantes que afectan la formación, cantidad y estabilidad de la espuma en las calderas son las siguientes:

- Contaminantes químicos: compuestos orgánicos tales como aceites y grasas que se saponifican con la alcalinidad del agua de caldera, formando espuma y, como consecuencia de esto, el arrastre.
- pH: el agua de caldera con alto contenido de sólidos y alto pH tiene mayor tendencia a formar espuma que el agua de caldera con bajo pH y bajo contenido de sólidos.
- Temperatura: la estabilidad de la espuma normalmente disminuye cuando la temperatura aumenta. Si hay presencia de espuma en estas condiciones, su estabilidad es menor.
- Tamaño de la burbuja: mientras más grande sea el tamaño de la burbuja, su estabilidad será menor.
- Sólidos: la estabilidad y la formación de espuma aumenta cuando el contenido de sólidos se incrementa.

- Hidróxido: el potencial de formación de espuma se incrementa cuando el contenido de iones hidróxido aumenta.

La presencia de sólidos suspendidos y materia orgánica en el agua de alimentación tiene un gran efecto sobre el arrastre; sin embargo, no debe hacerse una generalización sobre la concentración máxima permisible. Lo más práctico y recomendable es que la concentración de éstos sea cero o tan cerca de cero como sea posible, mediante un buen control en el tratamiento externo del agua.

En muchos casos, el problema de arrastre no puede ser corregido mediante ajuste en el agua de caldera o en el tratamiento interno o externo del agua, ya que estos resultan muy costosos, por lo tanto, es recomendable la aplicación o uso continuo de un efectivo antiespumante para reducir el arrastre. Los antiespumantes más usados son los de tipo orgánico, tales como ésteres, alcoholes y amidas. Ellos actúan modificando la tensión superficial de la película de la burbuja haciéndolas más débiles y, por lo tanto, se rompen rápidamente y con mayor facilidad en la superficie del agua de caldera.

#### *Tratamiento microbiológico*

Los sistemas de enfriamiento y, en particular, los sistemas recirculantes abiertos, son medios muy favorables para el crecimiento microbiológico, lo que contribuye a la formación de depósitos, ensuciamiento y corrosión del sistema. El hecho de que los sistemas de enfriamiento recirculantes abiertos tengan actividad microbiológica, radica en que una variedad de microorganismos son introducidos continuamente al sistema, a través del aire usado para el enfriamiento o a través de la reposición. (Adroer & Ignacio, 2000). Entre los microorganismos más comunes se encuentran las algas, las cuales pueden vivir a temperaturas entre 50 y 60 °C y a temperatura ambiente; además, no son muy sensibles a los cambios de pH.

*Control de los microorganismos.* Un control de microorganismos para los sistemas de enfriamiento abiertos es indispensable, ya que estos operan a condiciones altamente

favorables para el crecimiento de los mismos tales como: agua saturada con oxígeno, luz solar, temperaturas entre 30 y 60 °C. y pH de 6 a 9. (Adroer & Ignacio, 2000).

La presencia y crecimiento de materia orgánica viva se conoce con el nombre de ensuciamiento microbiológico. Esto produce en el sistema de enfriamiento interferencia con el flujo de agua, disminución de la transferencia de calor, promueve la corrosión, incrementa el consumo de inhibidores de corrosión e incrustación, etc. La falta de control microbiológico, las condiciones favorables de estos sistemas y la rápida velocidad de reproducción de los microorganismos permiten predecir que un sistema bajo estas condiciones presentará problemas graves de transferencia de calor y deterioro del mismo en un lapso de tiempo relativamente corto.

El control microbiológico en un sistema de enfriamiento se realiza mediante el uso de microbiocidas. Si se requiere inhibir el crecimiento se aplican bacteriostáticos, y si se desea eliminar microorganismos se usan biocidas. En ambos casos se limita el número de bacterias a valores inocuos.

### ***Purga***

Se define como el drenado del agua de equipos de transferencia de calor con alto contenido de sólidos disueltos y suspendidos. Con ello se logra mantener bajo control los parámetros establecidos para dichas aguas y minimizar el potencial de incrustaciones, corrosión, arrastre (en el caso de calderas) y cualquier otro problema. Cada vez que se purga uno de estos equipos, la reposición se debe realizar con agua de alimentación que contenga una baja concentración de sólidos suspendidos.

La purga siempre debe realizarse porque los sólidos se concentran, debido a que el agua se evapora, mientras que éstos se depositan en la caldera o en la piscina de los condensadores evaporativos, según sea el caso. El control se logra extrayendo cierta cantidad de agua, mediante la purga continua (sólo aplicado a calderas) o la purga de fondo. Un exceso de ésta significa pérdida innecesaria de agua, productos químicos y energía. Por otro lado, poca purga implica mantener condiciones críticas en el agua de caldera que ocasionan problemas de depósitos y arrastre. (Perry & Green, 2001).

Los sólidos disueltos pueden determinarse por medio de la conductividad ( $\mu\text{S}$ ) que posea el agua, ya que existe una relación entre esta propiedad y el contenido de sólidos disueltos (ppm); según “*Secretaría de Energía. (2008)*” dicha relación es la siguiente:

$$1000\mu\text{S} = 0,67 \text{ ppm}$$

Otros autores establecen una relación distinta entre la conductividad y los sólidos disueltos del agua (como por ejemplo  $1000\mu\text{S} = 0,5 \text{ ppm}$ ), lo cual va a depender del tipo de sales presentes en ella. (Lenntech, 2008).

Por otra parte, una vez conocida la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua, se puede establecer la frecuencia y duración de las purgas realizadas a los equipos de transferencia de calor, esto con el fin de mantener los sólidos disueltos en los rangos presentados en la Tabla 1.

#### *Purga de fondo o manual*

La purga de fondo se realiza para el control de los sólidos disueltos, suspendidos y drenado de lodos en las calderas de fuego por los tubos o pirotubulares y en las calderas de agua por los tubos; se utiliza principalmente para eliminar lodo presente en el tambor de lodo y, como efecto secundario, el control de sólidos disueltos. (Perry & Green, 2001). En el caso de los condensadores evaporativos, al igual que en las calderas, las purgas de fondo se realizan para el control de los parámetros antes mencionados.

#### *Purga continua*

Con este tipo de purga se mantiene un drenaje continuo de agua en la caldera. La purga continua debe estar ubicada aproximadamente 10,2 cm por debajo del nivel mínimo de agua en el tambor de vapor, y el flujo de la misma dependerá de los límites establecidos para el agua de la caldera. Las principales ventajas de la purga continua son: (Perry & Green, 2001).

- Ahorro de agua, energía y productos químicos por un mejor control de la purga.
- Nivel de agua en el domo superior más constante.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

En este apartado se presentan los materiales, equipos y metodología que se utilizó para la realización del proyecto en cuestión.

#### ***Procedimiento Experimental***

Las fases seguidas para lograr los objetivos propuestos son las siguientes:

##### ***Fase 1: Identificación de fuentes de abastecimiento de agua***

- Se identificó la cantidad de tanques de almacenamiento de agua presentes en la empresa, estableciendo la cantidad y capacidad de cada uno de ellos, el tipo y la cantidad de agua con que se alimentan, es decir, si es de algún pozo subterráneo o de la red local de suministro (HIDROCAPITAL).
- Para caracterizar las fuentes de abastecimiento de agua se realizaron los análisis físico-químicos pertinentes como: pH, sólidos disueltos, dureza total, cloruros, alcalinidad, sílice, por un período de 20 días para establecer un valor promedio de cada uno de los parámetros antes mencionados. Estos análisis físico-químicos se realizaron bajo las Normas Venezolanas COVENIN, las cuales se detallan a continuación:
  - 2461-87: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de sólidos.
  - 2462-02: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de pH.

- 2737-06: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de sílice por colorimetría.
- 2771-91: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de dureza.
- 2780-02: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de la alcalinidad.
- 3141-95: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de cloruro.

### *Fase 2: Parámetros de diseño de los equipos*

Se revisaron las hojas de especificaciones de cada uno de los equipos que forman parte del sistema de acondicionamiento de aguas para calderas y condensadores evaporativos, para establecer los parámetros de diseño, entre los cuales se encuentran:

- Filtros de arena y carbón.
- Suavizador de intercambio iónico.
- Tanques de alimentación.

Así mismo se revisaron las hojas de especificaciones de los equipos de transferencia de calor involucrados: caldera y condensador evaporativo. Al no existir dichas hojas, se procedió a la elaboración de las mismas.

### *Fase 3: Parámetros óptimos de operación de los equipos*

- Una vez que se realizó la fase anterior, se establecieron los parámetros óptimos de operación de todos los equipos que forman parte del sistema de acondicionamiento de agua para calderas y condensadores evaporativos, así como de los equipos de transferencia de calor involucrados; estos parámetros son los relacionados con la calidad del agua dentro y fuera de dichos equipos, basándose en los siguientes puntos:

- Caída de presión de los filtros de arena y carbón, con lo que se logró establecer el tiempo de retrolavado apropiado.
- Capacidad de la resina de cada suavizador, en donde se evaluó la capacidad de retención de iones calcio y magnesio que tenga cada resina, con lo que se pudo establecer el volumen de agua cruda que puede ser manejado por el suavizador antes de ser regenerado, basándose en la práctica de Intercambio Iónico propuesta por la Universidad Autónoma de Madrid.
- Se estableció la dosificación de químicos en los tanques de alimentación, considerando los residuales de fosfatos y sulfitos que presente el agua de la caldera y del condensador evaporativo.
- Se verificó si la capacidad del tanque de alimentación a las calderas es apropiada al momento de realizar las purgas de fondo, observando que el nivel del tanque al finalizar cada purga sea mayor al 25% de la capacidad total del mismo.
- Se estableció la frecuencia y duración de purgas de fondo, por medio de análisis de Sólidos Totales Disueltos (TDS) en el agua de la caldera y del condensador evaporativo.
- Se verificó si la relación establecida en el marco teórico entre la conductividad del agua y los TDS es la correcta, por medio de la lectura del conductividad de la muestra a analizar y la toma de una alicuota (10 mL) la cual se pesará antes y después de su secado en una estufa a 180 °C para determinar la cantidad exacta de TDS.
- Se determinaron los ciclos de concentración de las calderas, mediante el análisis de cloruros, para determinar la cantidad de veces que este equipo logra evaporar su volumen total de almacenamiento en un tiempo determinado.

#### *Fase 4: Mejoras al sistema de acondicionamiento de aguas*

Evaluando el sistema de acondicionamiento de agua para las calderas y condensadores evaporativos se determinó que el mismo puede ser mejorado, por lo que se propusieron las siguientes mejoras:

- Diseño de un tanque de alimentación de las calderas para la caldera de Planta Nueva.
- Diseño de dos nuevos filtros, uno de arena y otro carbón activado para el sector de Plana Actual
- Diseño de un suavizador para los condensadores evaporativos de Planta Actual.
- Implementación del retorno de condensado, para incrementar la eficiencia energética del sistema de generación de vapor.
- Implementación de un sistema de purga continua en las calderas.
- Diseño de un sistema de control automático de nivel y temperatura para los tanques de alimentación de agua de las calderas de la empresa.

#### *Fase 5: Selección de la propuesta más adecuada*

Por último, de todos los diseños y soluciones propuestas, se seleccionará el más atractivo para mejorar el funcionamiento de los sistemas a corto, mediano y largo plazo.

## *Materiales*

### *Resina*

Catiónica fuerte (resina industrial) Bayer Lewatit S-100.

### *Medios filtrantes*

- Grava número 2, 3, 4 y 5.
- Arena 12-20.
- Arena 30-40.
- Carbón Activado (antracita).

### *Reactivos*

- Ácido Sulfúrico al 95-97%, ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
- Carbonato de Sodio. ( $\text{NaCO}_3$ ).
- Indicador Fenolftaleína, ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ).
- Indicador Anaranjado de Metilo, ( $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ ).
- Etanol al 95%, ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ).
- Indicador Negro de Eriocromo T ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{N}_3\text{NaO}_7\text{S}$ ).
- Indicador Murexida, ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_6\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).
- Solución tampón a base de cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) concentrado.
- Hidróxido de sodio, ( $\text{NaOH}$ ).
- Etilendiaminotetraacético (EDTA), ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).
- Ácido clorhídrico al 35 %, ( $\text{HCl}$ ).
- Metavanadato de amonio, ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ).
- Molibdato de amonio, ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ).
- Solución Buffer de pH 4.
- Solución Buffer de pH 7.

- Cloruro de Potasio, (KCl).
- Almidón soluble.
- Ioduro de Potasio (KI).
- Iodato de Potasio, (KIO<sub>3</sub>).
- Sulfito de sodio, como metasulfito.
- Fosfato polímero.
- Amonio cuaternario.

#### *Material de vidrio*

- Buretas de 50 mL.
- Pipetas de 1, 2, 5, 10, 25 y 50 mL.
- Beacker de 250 mL.
- Balón aforado de 25, 50, 100, 250 y 500 mL.

#### *Equipos*

Los equipos a utilizar para llevar a cabo la parte experimental se mencionan a continuación:

- Filtro de arena de acero al carbón, con un volumen de 940 L., altura de 1,20 m. y diámetro de 1,10 m. (Planta Nueva, Sala de Máquinas).



**Figura 9. Filtro de arena de la empresa.**

- Filtro de carbón de acero al carbón, con un volumen de 940 L., altura de 1,20 m. y diámetro de 1,10 m. (Planta Nueva, Sala de Máquina).



**Figura 10. Filtro de carbón de la empresa.**

- Dos suavizadores de acero al carbón, con un volumen de 244 L., altura de 1,5 m. y diámetro de 0,5 m. (Planta Nueva, Sala de Máquina).



**Figura 11. Suavizador de la empresa.**

- Suavizador de acero al carbón, con un volumen de 269 L., altura de 0,5 m. y diámetro de 0,45 m. (Planta Actual, Sala de Máquina).



**Figura 12. Suavizador de la empresa.**

- Suavizador de acero al carbón, con un volumen de 290 L., altura de 1,8 m. y diámetro de 0,5 m. (Planta Actual, Sala de Máquina).



**Figura 13. Suavizador de la empresa.**

- Caldera marca CYMSA, modelo PM-3WBS, con una capacidad de generación de vapor de 150 HP y una presión máxima de operación de 150 psi. (Planta Nueva, Sala de Máquina).



**Figura 14. Caldera DISTRAL de 150 HP de la empresa.**

- Caldera marca DISTRAL, modelo CYM-150-2P, con una capacidad de generación de vapor de 150 HP y una presión máxima de operación de 150 psi. (Planta Nueva, Sala de Máquina).



**Figura 15. Caldera CYMSA de 150 HP de la empresa.**

- Caldera marca SUPERIOR, modelo PM-3VBS, con una capacidad de generación de vapor de 80 HP y una presión máxima de operación de 150 psi. (Planta Actual, Sala de Máquina).



**Figura 16. Caldera SUPERIOR DE 80 HP de la empresa.**

- Dos bombas dosificadoras, marca SISTEMA ADVANCE, modelo U005, con una capacidad de bombeo de 0,21 gph. (Planta Nueva y Actual, Sala de Máquina).



**Figura 17. Bomba dosificadora de químicos de la empresa.**

- Espectrofotómetro marca Baush and Lomb, modelo Spectronic 20, con una capacidad de transmitancia, absorbancia y longitud de onda de 0 a 100 %, 0 a 2 y 340 a 600 nm, respectivamente (Laboratorio Control de Calidad).



**Figura 18. Espectrofotómetro del Laboratorio.**

- Conductímetro marca Hanna Instruments, modelo HI 8038, con un rango de medida 0 a 19990  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (Laboratorio Control de Calidad).



**Figura 19. Conductímetro del Laboratorio.**

- pH-metro marca ORION, modelo SA-210, con un rango de medida de  $0-14 \pm 0,01$  (Laboratorio Control de Calidad).



**Figura 20. pH-metro del Laboratorio.**

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la identificación de fuentes de abastecimiento de agua, parámetros de diseño y de operación de los equipos, mejoras al sistema de acondicionamiento del agua y la selección de la propuesta más adecuada.

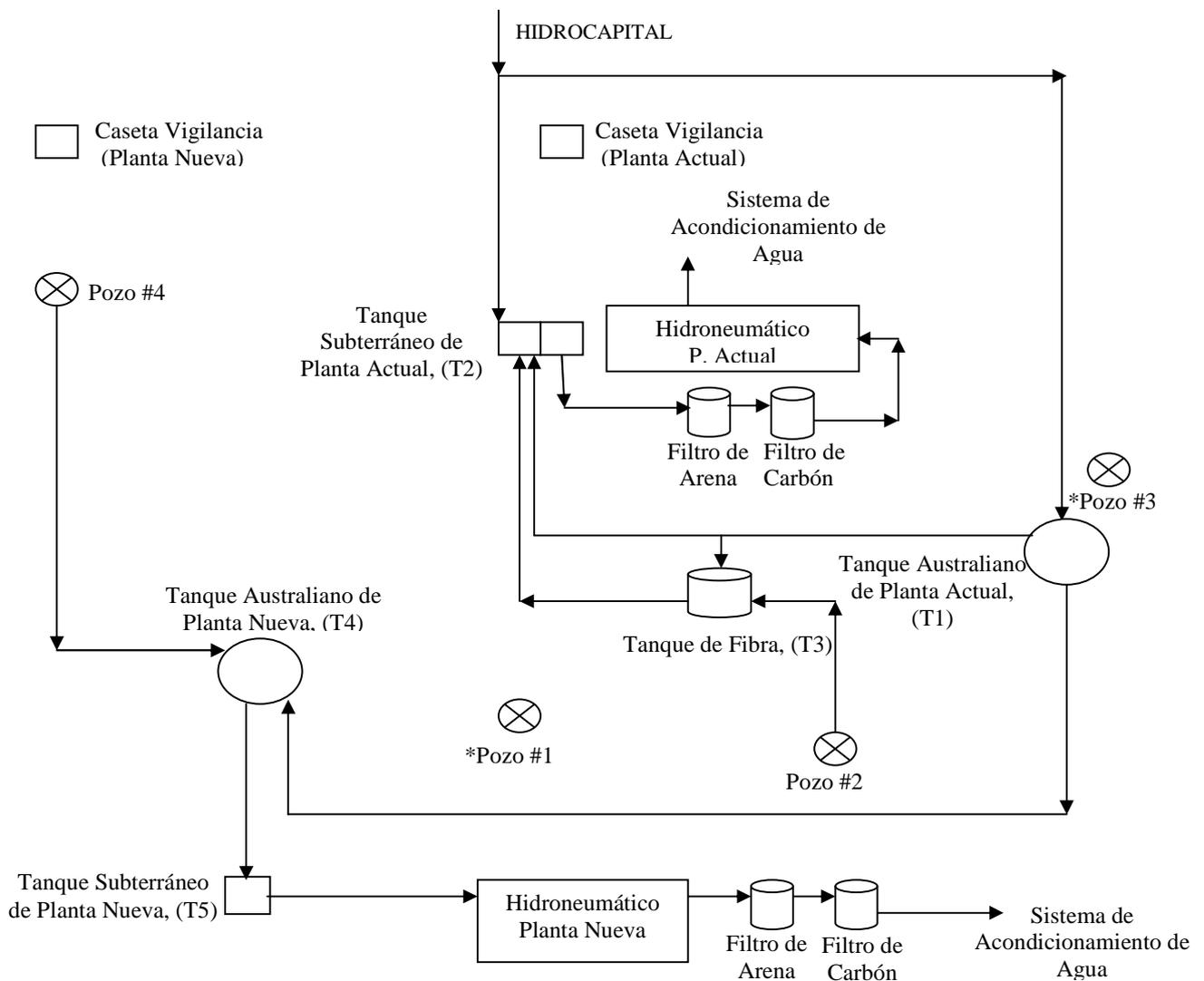
#### *Identificación de las fuentes de abastecimiento de agua*

Debido al aumento en la producción de embutidos, la empresa se encuentra actualmente dividida en dos sectores, los cuales son conocidos como Planta Actual y Planta Nueva. En el sector de Planta Actual se encuentran la caldera marca Superior y los condensadores evaporativos 1, 2, 3 y 4; mientras que en el sector de Planta Nueva están las calderas marcas Cyma, Distral y los condensadores 5 y 6. El sistema de acondicionamiento de agua para los equipos de transferencia de calor de la empresa posee cinco tanques de almacenamiento y tres fuentes de suministros.

El agua de alimentación para el sector de Planta Actual cuenta con dos fuentes de abastecimiento y tres tanques de almacenamiento. La principal fuente de agua es la proveniente de HIDROCAPITAL, que alimenta al tanque australiano de Planta Actual (T1) y al tanque subterráneo de Planta Actual (T2), el cual suministra agua cruda al sistema de acondicionamiento respectivo. Si el agua proveniente de la red local es escasa, T2 será abastecido por T1. La otra fuente de abastecimiento es un pozo subterráneo conocido por la empresa como el Pozo #2, que alimenta al tanque de fibra (T3) y este a su vez proporciona agua al tanque subterráneo antes mencionado (T2). Por último, si el Pozo #2 no se encuentra en funcionamiento o simplemente no se puede extraer más agua de éste, T3 será alimentado por T1.

Por otro lado, el agua que se acondiciona para el sector de Planta Nueva proviene de un pozo subterráneo, conocido por la empresa como Pozo #4, y la red de suministros local (HIDROCAPITAL). El Pozo #4 y el tanque australiano de Planta Actual (T1) son los encargados de abastecer de agua al tanque australiano de Planta Nueva (T4) y a su vez el tanque subterráneo (T5), el cual es la única fuente de suministro que posee el sector de Planta Nueva y por lo tanto del sistema de acondicionamiento de agua de dicho sector.

A continuación se presentan en la Figura N° 21 un esquema de las fuentes de abastecimiento y distribución del de agua dentro de la empresa.



**Figura N° 21. Esquema del abastecimiento y distribución del agua dentro de la empresa.**

En la Figura N° 21, se pueden observar la presencia pozos (#1 y #3), los cuales no se encuentran en funcionamiento debido a que ya cumplieron su tiempo de vida útil de operación,

Las Tablas N° 6 y 7, en donde se muestran las características principales de los tanques que forman parte del sistema de acondicionamiento de agua para calderas y condensadores evaporativos de la empresa.

**Tabla N° 6. Características principales de los tanques australianos y de fibra de la empresa.**

Tanque N°	Ubicación	Material	Fuente de Alimentación	Diámetro (m)	Altura (m)	Capacidad (m <sup>3</sup> )
1	Planta Actual	Acero Galvanizado	HIDROCAPITAL	10	3,05	240
3	Planta Actual	Fibra de Vidrio	Pozo #2 y T1	3,70	4,50	48,40
4	Planta Nueva	Acero Galvanizado	Pozo #4 y T1	11,50	2,50	260

**Tabla N° 7. Características principales de los tanques subterráneos de la empresa.**

Tanque N°	Ubicación	Material	Fuente de Alimentación	Ancho (m)	Altura (m)	Largo (m)	Capacidad (m <sup>3</sup> )
2	Planta Actual	Concreto	HIDROCAPITAL, T1 y T3	5,60	1,85	9,70	50,30
5	Planta Nueva	Concreto	T4	2,20	0,95	2,80	5,85

Así mismo, en la Tabla N° 8 se pueden observar las características de los pozos de agua subterráneos presentes en la empresa.

**Tabla N° 8. Características principales de los pozos de agua subterráneos de la empresa.**

<b>N° de Pozo</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Diámetro de la perforación (plg)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
2	Planta Actual	6	151	2,4
4	Planta Nueva	8 5/8	165	2

En las Tabla N° 9, 10 y 11 se mostrarán los resultados obtenidos de la caracterización de las diferentes fuentes de abastecimiento de agua de la empresa en el período de estudio.

**Tabla N° 9. Caracterización del agua proveniente del Pozo #2.**

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
Sólidos Totales, (mg/L)	235	242	230
pH	7,9	8,0	7,7
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	12,7	13,1	12,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	139	151	135
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	148	157	145
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	11,2	11,5	11,0

**Tabla N° 10. Caracterización del agua proveniente del Pozo #4.**

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
Sólidos Totales, (mg/L)	326	330	322
pH	8,0	8,1	7,8
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	11,9	12,5	11,1
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	251	256	245
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	181	198	178
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	24,6	25,3	24,5

**Tabla N° 11. Caracterización del agua proveniente de HIDROCAPITAL.**

<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
Sólidos Totales, (mg/L)	96	97	92
pH	7,5	7,7	7,4
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	6,7	6,8	6,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	126	131	123
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	127	128	122
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	21,3	21,5	20,9

También se realizaron los análisis físico-químicos del agua proveniente de los tanques subterráneos de Planta Nueva y Planta Actual, los cuales son los que suministran de agua a los sistemas de acondicionamiento de agua para calderas y condensadores evaporativos de la empresa. Las Tablas N° 12 y 13 muestran los resultados obtenidos en el periodo de estudio.

**Tabla N° 12. Caracterización del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Actual.**

Parámetros	Resultado	Valor máximo	Valor mínimo
Sólidos Totales, (mg/L)	242	245	239
pH	7,4	7,7	7,4
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	8,7	9,1	8,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	148	156	145
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	127	128	122
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	22,4	23,9	21,5

**Tabla N° 13. Caracterización del agua proveniente del tanque subterráneo de Planta Nueva.**

Parámetros	Resultado	Valor máximo	Valor mínimo
Sólidos Totales, (mg/L)	241	243	237
pH	7,5	7,9	7,3
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	8,5	9,2	8,0
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	178	184	173
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	98	101	96
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	15,3	15,9	14,9

El agua cruda no presenta las características ideales para ser alimentada directamente a los equipos de transferencia de calor de la empresa, lo cual se puede evidenciar en los datos presentados en las Tablas N° 12 y 13; entre todos los parámetros a tener en cuenta, la concentración de dureza es la que se debe controlar con mayor énfasis, teniendo para este caso que para Planta Actual se encuentra entre 145 y 156 mg/L CaCO<sub>3</sub>, mientras que para Planta Nueva oscila entre 173 y 184 mg/L CaCO<sub>3</sub>. Esta situación va en perjuicio de los intercambiadores de calor en estudio, debido a que dicha concentración puede provocar incrustaciones en las calderas y

condensadores, disminuyendo así su capacidad de transferencia de calor. Adicionalmente a esto, la concentración de dureza puede variar en el tiempo, dependiendo de la calidad y cantidad de las fuentes de abastecimiento de agua, afectando el tiempo de servicio de los suavizadores.

En cuanto a la concentración de  $\text{SiO}_2$  presente en el agua de alimentación se mantiene en los rangos de aceptables, por lo que con un buen tratamiento químico y un buen control de purgas en los equipos de transferencia de calor se podrá controlar fácilmente, a pesar que dos de las fuentes de abastecimiento son pozo subterráneos que por lo general presentan grandes cantidades de este metal.

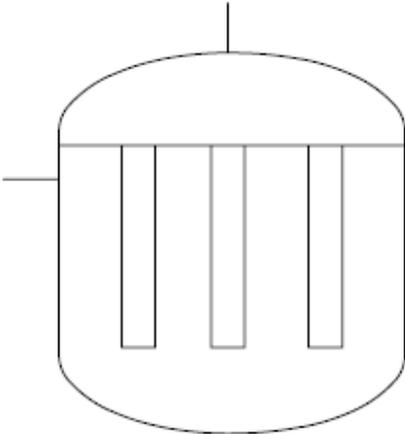
Con respecto al resto de los parámetros estudiados, no afectan directamente a los equipos en este punto, por lo que no amerita tener un control estricto para ellos.

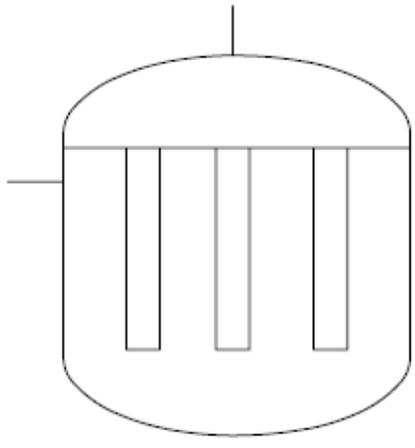
Una vez que se han estudiado las características físico-químicas de las fuentes de abastecimiento de agua de la empresa, se buscaron las hojas de especificaciones de los equipos involucrados, con el fin de determinar si dichos equipos eran los más adecuados; esto se explicará más detalladamente en la sección de *Parámetros óptimos de operación y Mejoras del sistema*. En vista de que las hojas de especificaciones de los equipos que forman parte del sistema de acondicionamiento de aguas, así como los de transferencia de calor no existían, se procedió a la elaboración de las mismas.

*Parámetros de diseño de los equipos*

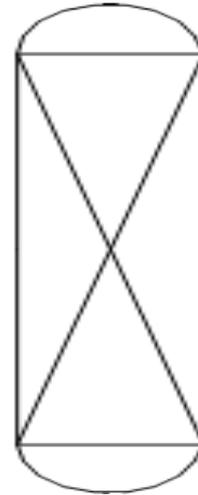
Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Filtro de Arena		Hoja 1/1		
	Sistema de Acondicionamiento de Agua				
<b>Detalles Generales</b>					
Ubicación	Planta Nueva				
Código Interno	130701219				
Volumen, m <sup>3</sup>	0,94				
Altura, m	1,2				
Diámetro, m	1,1				
Llaves y conexiones, plg	2				
Tipo	Cilíndrico				
Material de construcción	Acero al carbono				
Configuración	Vertical				
<b>Cantidad del material filtrante</b>					
<b>Grava N°</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>				
5	7				
4	1,5				
3	1,5				
2	1,5				
		<b>Condiciones de Proceso</b>			
<b>Arena N°</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>	Caudal máximo de filtrado, L/min	310		
Arena 12-20	8,5	Caída de presión del retrolavado	8		
Arena 30-40	8,5	Tiempo de retrolavado, min	10		
		Caudal del retrolavado, L/min	500		
<b>Observaciones:</b>		<b>Fecha:</b>			
Realizado por: Carlos Padrón		Fecha: 10/10/2008			
Revisado: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008			
Aprobado por: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008			
Especificación N° 1					

<b>Industria Alimenticia de Embutido</b>	<b>Hoja de Especificación</b>	<b>Hoja 1/1</b>	
<b>Dpto. de Aguas Industriales</b>	<b>Filtro de Carbón Activado</b>		
<b>Aguas Industriales</b>	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua</b>		
<b>Detalles Generales</b>			
Ubicación	Planta Nueva		
Código Interno	1308 - 01220		
Volumen, m <sup>3</sup>	0,94		
Altura, m	1,2		
Diámetro, m	1,1		
Llaves y conexiones, plg	2		
Tipo	Cilíndrico		
Material de construcción	Acero al carbono		
Configuración	Vertical		
<b>Cantidad del material filtrante</b>		<b>Condiciones de Proceso</b>	
<b>Grava N°</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>	Caudal máximo de filtrado, L/min	310
5	7	Caída de presión del retrolavado	8
4	1,5	Tiempo de retrolavado, min	10
3	1,5	Caudal del retrolavado, L/min	310
2	1,5		
<b>Otros medio</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>		
Arena 12-20	1,5		
Carbón Activado	17		
<b>Observaciones:</b>		<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>		<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>		<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>		<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 2</b>			

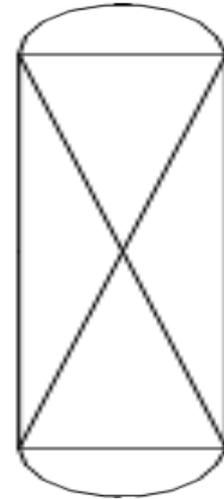
Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Filtro de Arena		Hoja 1/1		
	Sistema de Acondicionamiento de Agua				
<b>Detalles Generales</b>					
Ubicación	Planta Actual				
Código Interno	130701216				
Volumen, m <sup>3</sup>	0,94				
Altura, m	1,2				
Diámetro, m	1,1				
Llaves y conexiones, plg	2				
Tipo	Cilíndrico				
Material de construcción	Acero al carbono				
Configuración	Vertical				
<b>Cantidad del material filtrante</b>					
<b>Grava Nº</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>				
5	7				
4	1,5				
3	1,5				
2	1,5				
<b>Arena Nº</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>	<b>Condiciones de Proceso</b>			
Arena 12-20	8,5	Caudal máximo de filtrado, L/min	155,2		
Arena 30-40	8,5	Caída de presión del retrolavado	8		
		Tiempo de retrolavado, min	10		
		Caudal del retrolavado, L/min	500		
<b>Observaciones:</b>		<b>Fecha:</b>			
Realizado por: Carlos Padrón		Fecha: 10/10/2008			
Revisado: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008			
Aprobado por: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008			
Especificación N° 3					

Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Filtro de Arena		Hoja 1/1			
	Sistema de Acondicionamiento de Agua					
<b>Detalles Generales</b>						
Ubicación	Planta Actual					
Código Interno	130701216					
Volumen, m <sup>3</sup>	0,94					
Altura, m	1,2					
Diámetro, m	1,1					
Llaves y conexiones, plg	2					
Tipo	Cilíndrico					
Material de construcción	Acero al carbono					
Configuración	Vertical					
<b>Cantidad del material filtrante</b>						
<b>Grava N°</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>					
5	7					
4	1,5					
3	1,5					
2	1,5					
<b>Arena N°</b>	<b>Cantidad, pie<sup>3</sup></b>					
Arena 12-20	8,5					
Arena 30-40	8,5					
		<b>Condiciones de Proceso</b>				
		Caudal máximo de filtrado, L/min	155,2			
		Caída de presión del retrolavado	8			
		Tiempo de retrolavado, min	10			
		Caudal del retrolavado, L/min	500			
<b>Observaciones:</b>		<b>Fecha:</b>				
Realizado por: Carlos Padrón		Fecha: 10/10/2008				
Revisado: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008				
Aprobado por: Virgilio Cordero		Fecha: 17/10/2008				
Especificación N° 4						

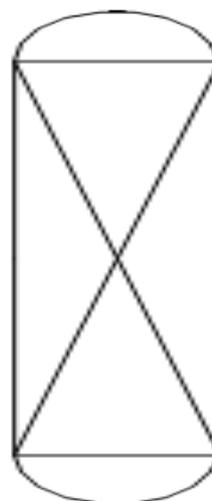
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Suavizador</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua para Calderas</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	SA1	
Volumen, m <sup>3</sup>	0,37	
Altura, m	1,83	
Diámetro, m	0,51	
Volumen del lecho, m <sup>3</sup>	0,18	
Llaves y conexiones, plg	1/2	
Tipo	Cilíndrico	
Material de construcción	Acero al carbono	
Configuración	Vertical	
<b>Tipo de Resina</b>		
Catiónica Fuerte (Resina Industrial)		
<b>Condiciones de Proceso</b>		
Concentración de la salmuera, %(p/v)	10	
Tiempo de retrolavado, min	30	
Volumen de retrolavado, L	400	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 5</b>		



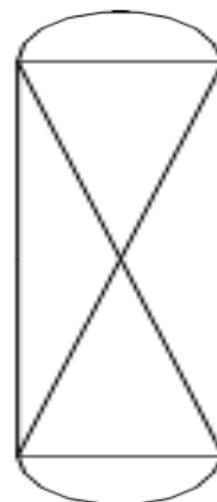
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Suavizador</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua para Calderas</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	SA2	
Volumen, m <sup>3</sup>	0,27	
Altura, m	1,65	
Diámetro, m	0,46	
Volumen del lecho, m <sup>3</sup>	0,15	
Llaves y conexiones, plg	1/2	
Tipo	Cilíndrico	
Material de construcción	Acero al carbono	
Configuración	Vertical	
<b>Tipo de Resina</b>		
Catiónica Fuerte (Resina Industrial)		
<b>Condiciones de Proceso</b>		
Concentración de la salmuera, %(p/v)	10	
Tiempo de retrolavado, min	30	
Volumen de retrolavado, L	290	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 6</b>		



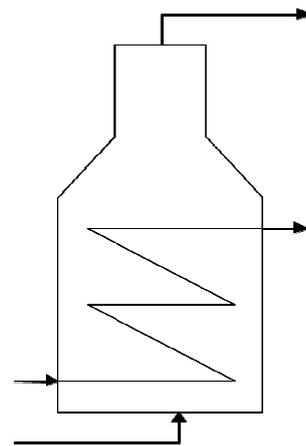
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Suavizador</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua para Calderas</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	SB1	
Volumen, m <sup>3</sup>	0,31	
Altura, m	1,68	
Diámetro, m	0,48	
Volumen del lecho, m <sup>3</sup>	0,16	
Llaves y conexiones, plg	1/2	
Tipo	Cilíndrico	
Material de construcción	Acero al carbono	
Configuración	Vertical	
<b>Tipo de Resina</b>		
Catiónica Fuerte (Resina Industrial)		
<b>Condiciones de Proceso</b>		
Concentración de la salmuera, %(p/v)	10	
Tiempo de retrolavado, min	30	
Volumen de retrolavado, L	332	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 7</b>		



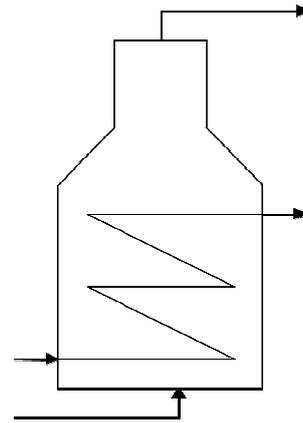
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Suavizador</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua para Calderas</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	SB2	
Volumen, m <sup>3</sup>	0,31	
Altura, m	1,68	
Diámetro, m	0,48	
Volumen de lecho, m <sup>3</sup>	0,16	
Llaves y conexiones, plg	1/2	
Tipo	Cilíndrico	
Material de construcción	Acero al carbono	
Configuración	Vertical	
<b>Tipo de Resina</b>		
Catiónica Fuerte (Resina Industrial)		
<b>Condiciones de Proceso</b>		
Concentración de la salmuera, %(p/v)	10	
Tiempo de retrolavado, min	30	
Volumen de retrolavado, L	332	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 8</b>		

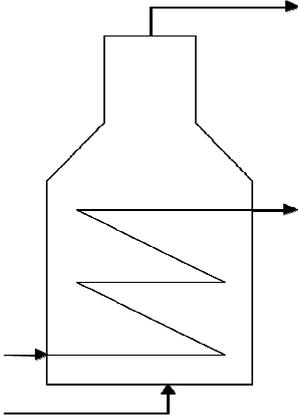


<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Caldera #1</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	131102159	
Marca	DISTRAL	
Modelo	PM- 3WBS	
Serial	A – 1241	
Tipo de caldera	Piro-tubular	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	71,26	
Capacidad, BHP	150	
Presión máxima, psi	150	
Presión de operación. psi	100	
Vapor generado, Kg/h	2400	
Año de Fabricación	1977	
Tipo de Combustible	Gas natural	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 9</b>		

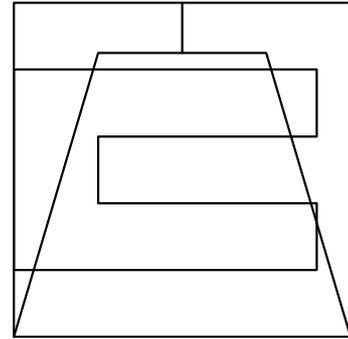


<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Caldera #2</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	131101158	
Marca	CYMSA	
Modelo	CYM-150-2P	
Serial	827/94-637	
Tipo de caldera	Piro-tubular	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	69,7	
Capacidad, BHP	150	
Presión máxima, psi	150	
Presión de operación, psi	100	
Vapor generado, Kg/h	2347	
Año de Fabricación	1994	
Tipo de Combustible	Gas natural	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Padrón Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N°: 10</b>	<b>Fecha:</b>	

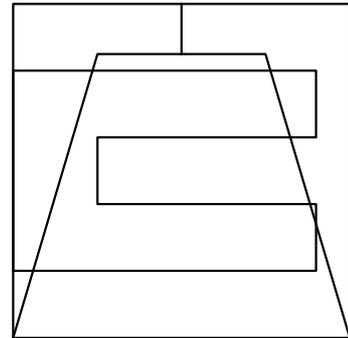


<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Caldera #3</b>	<b>Hoja 1/1</b>
<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>		
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	131103215	
Marca	SUPERIOR	
Modelo	PM 3VBS	
Serial	7103	
Tipo de caldera	Pilotubular	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	37,35	
Capacidad, BHP	80	
Presión máxima, psi	150	
Presión de operación, psi	100	
Vapor generado, Kg/h	1250	
Año de Fabricación	1976	
Tipo de Combustible	Gas natural	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 11</b>		

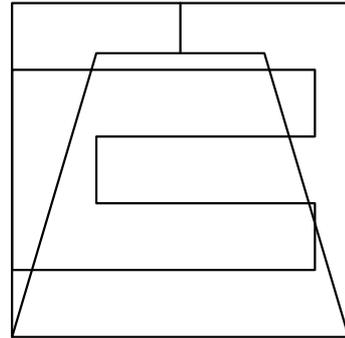
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Condensador #1</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	1306-01233	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	VC1-135 R	
Serial	R97117881	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	37,35	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1	
Capacidad de Refrigeración, Ton/h	82	
Fuente de Energía	Electricidad	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 12</b>		



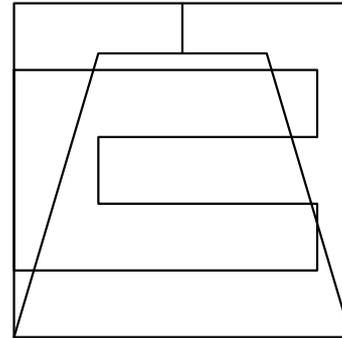
Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Condensador #2	Hoja 1/1
	Equipos de Transferencia de Calor	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	1306-01150	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	C – 1743-L	
Serial	R97117881	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	37,35	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1	
Capacidad de Refrigeración, Ton/h	82	
Fuente de Energía	Electricidad	
Observaciones:	Fecha:	
Realizado por: Carlos Padrón	Fecha: 10/10/2008	
Revisado: Virgilio Cordero	Fecha: 17/10/2008	
Aprobado por: Virgilio Cordero	Fecha: 17/10/2008	
Especificación N° 1 3		



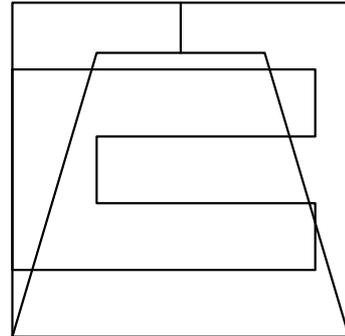
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Condensador #3</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	1306-01144	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	C – 1743-L	
Serial	R97117881	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	37,35	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1	
Capacidad de Refrigeración, Ton/h	82	
Fuente de Energía	Electricidad	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 1 4</b>		



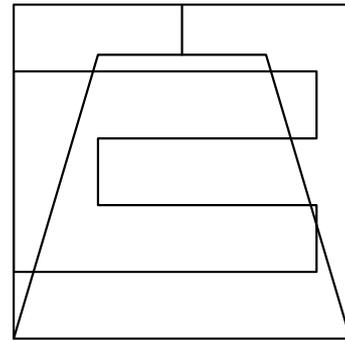
<b>Industria Alimenticia de Embutido</b> <b>Dpto. de Aguas Industriales</b> <b>Aguas Industriales</b>	<b>Hoja de Especificación</b> <b>Condensador #4</b>	<b>Hoja 1/1</b>
	<b>Equipos de Transferencia de Calor</b>	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Actual	
Código Interno	1306-011	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	VLC - 200	
Serial	NO	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	-	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1,5	
Capacidad de Refrigeración, Kcal/h	3000000	
Fuente de Energía	Electricidad	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 15</b>		



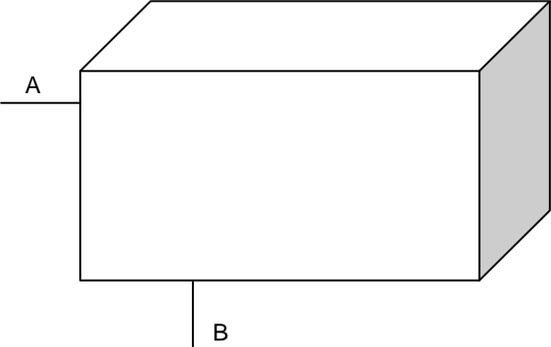
Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Condensador #5	Hoja 1/1
	Equipos de Transferencia de Calor	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	1306-01151	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	C - 1742-K	
Serial	93 - 101268	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	-	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1	
Capacidad de Refrigeración, Ton/h	135	
Fuente de Energía	Electricidad	
<b>Observaciones:</b>	<b>Fecha:</b>	
<b>Realizado por: Carlos Padrón</b>	<b>Fecha: 10/10/2008</b>	
<b>Revisado: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Aprobado por: Virgilio Cordero</b>	<b>Fecha: 17/10/2008</b>	
<b>Especificación N° 1 6</b>		



Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Condensador #6	Hoja 1/1
	Equipos de Transferencia de Calor	
<b>Detalles Generales</b>		
Ubicación	Planta Nueva	
Código Interno	1306-01222	
Marca	BALTIMORE AIRCOIL	
Modelo	C – 1742-K	
Serial	93 - 101267	
Tipo de Condensador	Evaporativo	
Superficie de calentamiento, m <sup>2</sup>	-	
Tipo de tiro	Forzado	
Motor de aire, HP	15	
Motor de agua, HP	1	
Capacidad de Refrigeración, Ton/h	135	
Fuente de Energía	Electricidad	
Observaciones:	Fecha:	
Realizado por: Carlos Padrón	Fecha: 10/10/2008	
Revisado: Virgilio Cordero	Fecha: 17/10/2008	
Aprobado por: Virgilio Cordero	Fecha: 17/10/2008	
Especificación N° 17		



Industria Alimenticia de Embutido Dpto. de Aguas Industriales Aguas Industriales	Hoja de Especificación Tanque de almacenamiento		Hoja 1/1	
	Sistema de Acondicionamiento de Agua			
<b>Detalles Generales</b>				
Identificación	TAPN			
N° de unidades requeridas	1			
Servicio	Agua			
Capacidad, m <sup>3</sup>	0,60			
Longitud, m	1,5			
Diámetro, m	0,75			
Tipo	Cilíndrico			
Material de construcción	Acero al carbono			
Configuración	Horizontal			
<b>Condiciones de Proceso</b>				
Temperatura de operación, °C	31			
Presión de operación, atm	1			
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	1000			
<b>Detalles mecánicos</b>			<b>Condiciones de Diseño</b>	
<b>Identificación</b>	<b>Tamaño, plg</b>	<b>Servicio</b>	Temperatura de diseño, °C	80
A	1	Entrada agua	Presión de diseño, atm	2
B	1 1/2	Salida agua	Espesor de la pared, mm	10
C	1 1/2	Salida agua		
Boca de Visita, plg		Si		
Drenajes, plg		Si		
<b>Observaciones:</b>			<b>Fecha:</b>	
Realizado por: Carlos Padrón			Fecha: 10/10/2008	
Revisado: Virgilio Cordero			Fecha: 17/10/2008	
Aprobado por: Virgilio Cordero			Fecha: 17/10/2008	
Especificación N°: 18				

<b>Industria Alimenticia de Embutido</b>	<b>Hoja de Especificación</b>		<b>Hoja 1/1</b>	
<b>Dpto. de Aguas Industriales</b>	<b>Tanque de almacenamiento</b>			
<b>Aguas Industriales</b>	<b>Sistema de Acondicionamiento de Agua</b>			
<b>Detalles Generales</b>				
Identificación	TAPA			
N° de unidades requeridas	1			
Servicio	Agua			
Capacidad, m <sup>3</sup>	0,82			
Altura, m	0,87			
Ancho, m	0,66			
Largo, m	1,59			
Tipo	Cúbico			
Material de construcción	Acero al carbono			
Configuración	Horizontal			
<b>Condiciones de Proceso</b>				
Temperatura de operación, °C	31			
Presión de operación, atm	1			
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	1000			
<b>Detalles mecánicos</b>			<b>Condiciones de Diseño</b>	
<b>Identificación</b>	<b>Tamaño, plg</b>	<b>Servicio</b>	Temperatura de diseño, °C	80
A	1 1/2	Entrada de agua	Presión de diseño, atm	2
B	1 1/2	Salida de agua	Espesor de la pared, mm	10
Boca de Visita, plg		Si		
Drenajes, plg		Si		
<b>Observaciones:</b>			<b>Fecha:</b>	
Realizado por: Carlos Padrón			Fecha: 10/10/2008	
Revisado: Virgilio Cordero			Fecha: 17/10/2008	
Aprobado por: Virgilio Cordero			Fecha: 17/10/2008	
Especificación N° 19				

Una vez realizadas las hojas de especificaciones, se establecieron los rangos óptimos de operación del sistema existente (comparando los de diseño con los de operación utilizados actualmente en la empresa), los cuales se detallan en el siguiente apartado.

### ***Parámetros óptimos de operación de los equipos***

#### *Caída de presión de los filtros de arena y carbón*

Basándose en la bibliografía consultada, se estableció un rango de caída de presión entre 5 y 8 psi para realizar el retrolavado de los filtros de arena y carbón activado de toda la planta. Considerando los ensayos realizados durante el período de estudio, en la Tabla N° 14 se presentan los tiempos determinados entre cada retrolavado de los filtros ubicados en ambos sectores de la planta.

**Tabla N° 14. Tiempo determinado entre cada retrolavado de los filtros de la empresa.**

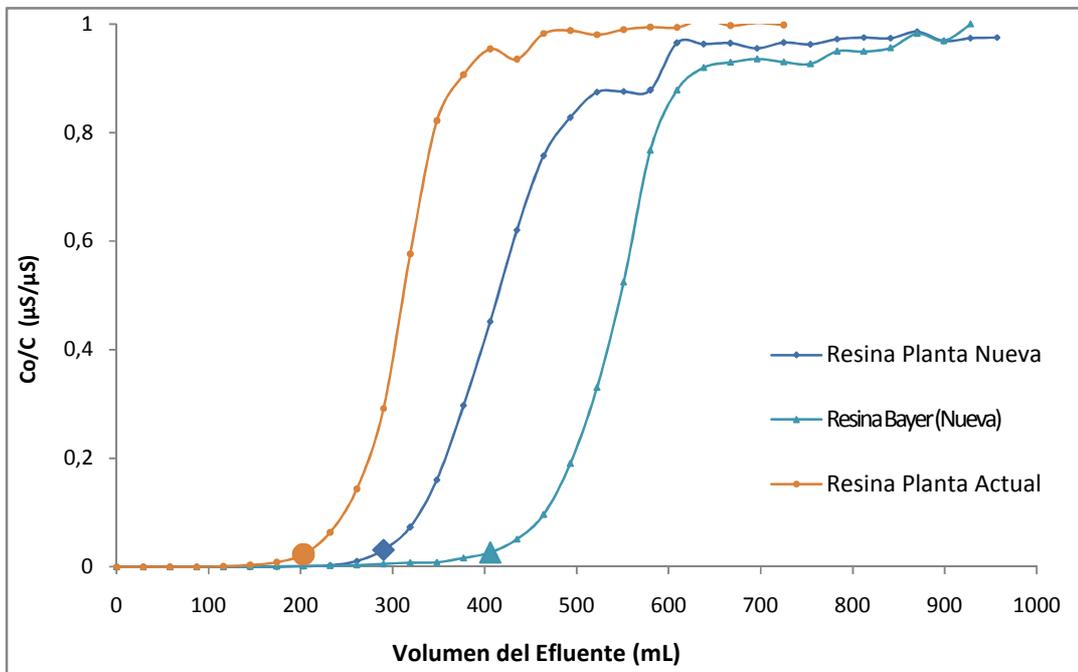
<b><math>\Delta P</math> (psi)</b>	<b>Ubicación de los Filtros</b>	<b>Tiempo entre cada retrolavado (h)</b>
5-8	Planta Actual	7
	Planta Nueva	36

Estos tiempos se obtuvieron a partir del comportamiento de la caída de presión que se observó en el manómetro instalado a la entrada de cada equipo, en un período de estudio de 36 horas. Es importante señalar que los filtros de Planta Actual son de menor tamaño que los de Planta Nueva y por lo tanto los lechos filtrantes de estos equipos alcanzan la caída de presión de retrolavado más rápido que los de Planta Actual.

#### *Capacidad de la resina de los suavizadores*

La capacidad de la resina catiónica en los suavizadores presentes en cada sector de la planta se evaluó tomando en cuenta el método planteado por la Universidad Autónoma de Madrid para la práctica de Intercambio Iónico, en donde el principio del ensayo es saturar la resina con iones  $H^+$  y luego hacer pasar una solución de NaOH para registrar la conductividad del efluente (Co) en intervalos de tiempos determinados; cuando las conductividades tanto a la entrada como a la salida

del lecho de la resina son iguales ( $C_o = C$ ), el ensayo ha llegado a su punto final. En la Figura N° 22 se puede observar el comportamiento de cada resina.



**Figura N° 22. Comportamiento de las resinas catiónicas de los suavizadores de Planta Actual, Planta Nueva y Bayer Industrial (Nueva).**

Observando los volúmenes de ruptura de cada resina analizada, se puede apreciar que la de los suavizadores de Planta Actual es la que posee menor volumen de ruptura con respecto a la de Planta Nueva y la Bayer Industrial. Esto se debe a que la resina de los suavizadores de Planta Actual lleva mayor tiempo en funcionamiento (se estima unos quince años) y debido a esto los iones de calcio y magnesio son más difíciles de remover con salmuera de regeneración. Adicionalmente a esto, la resina se pudo haber contaminado con las diferentes sustancias presentes en el agua de abastecimiento de la empresa, como hierro y carbonatos, que a pesar de encontrarse en pequeñas concentraciones ocasionan que la capacidad de retención de iones calcio ( $Ca^{2+}$ ) y magnesio ( $Mg^{2+}$ ) disminuya a través del tiempo.

Con respecto al volumen de ruptura obtenido en la resina de los suavizadores de Planta Nueva, se observó que fue un poco mayor al de Planta Actual; éste debería

ser muy parecido o cercano al de Bayer Industrial, ya que su tiempo de funcionamiento estimado es de apenas cuatro años, aunque existe la posibilidad de haber sido contaminada por alguna de las sustancias mencionadas anteriormente (hierro y carbonatos). Por otra parte, la resina Bayer Industrial es totalmente nueva, es decir, no ha tenido contacto con el agua de abastecimiento de la empresa, siendo dicha resina con la que se obtuvo mayor volumen de ruptura, debido a que no presenta ningún tipo de contaminantes.

A continuación, en la Tabla N° 15 se mostrarán tanto los volúmenes de ruptura como las capacidades de retención de las resinas analizadas.

**Tabla N° 15. Volumen de ruptura y capacidad para un lecho de resina de 12,8 g.**

<b>Tipo de resina</b>	<b>Volumen de ruptura, <math>V_R</math> (L)</b>	<b>Capacidad de la resina, <math>q_0</math> (meq/g)</b>
Planta Actual	0,203	1,35
Planta Nueva	0,290	1,93
Bayer Industrial	0,406	2,69

Ahora, conociendo las capacidades tanto de la resina de Planta Actual y Nueva como la de la resina Bayer, se pueden determinar los volúmenes de agua blanda que pueden manejar los suavizadores de ambos sectores de la planta con sus respectivas resinas y el volumen que podrían manejar si se realizara un cambio del lecho de intercambio por la resina Bayer Industrial. En la Tabla N° 16, se presentarán dichos resultados basándose en una concentración de dureza a la entrada de cada suavizador de 5,02 meq/L, ya que sería la condición más desfavorable de dureza asociada a una de las fuentes de abastecimiento de agua (Pozo #4).

**Tabla N° 16. Volumen de ruptura actual de los suavizadores comparado con un lecho de resina nuevo.**

<b>Suavizador</b>	<b>Volumen de ruptura actual, L</b>	<b>Volumen de ruptura con resina Bayer Industrial, L</b>
SA1	63287	126105
SA2	51486	102591
SB1	80146	111705
SB2	80146	111705

Observando la tabla anterior, se aprecia que un cambio del lecho de resina de intercambio iónico sería una solución viable para mejorar el funcionamiento de los equipos de intercambio iónico de la planta, ya que en el caso de los suavizadores de Planta Actual (SA1 y SA2) se duplicaría el volumen de ruptura (o volumen de agua suavizada), lo que conlleva a un mayor tiempo de operación y una disminución de los ciclos de regeneraciones.

En cuanto a los ciclos de regeneración para cada suavizador, se determinó el tiempo entre cada ciclo, basándose en el flujo másico de generación de vapor de la caldera y el volumen de ruptura. En la Tabla N° 17 se muestra cada cuanto tiempo se debería realizar la regeneración.

**Tabla N° 17. Tiempo de servicio de los suavizadores.**

<b>Suavizador</b>	<b>Tiempo entre cada ciclo de regeneración, h</b>
SA1	50,6
SA2	41,2
SB1	40,1
SB2	40,1

Como se mencionó anteriormente, los cálculos para la determinación entre cada ciclo de regeneración se realizaron considerando la capacidad máxima de generación de vapor de cada caldera, pero estos tiempos pudieran ser mayores debido

a que la demanda de vapor del proceso (cocción del embutido) no siempre es la máxima, ya que para el momento de realizar el estudio la empresa no trabajaba siete días a la semana ni laboraba los tres turnos; es por ello que se recomienda colocar un contador volumétrico que indique al operador cuando debe realizar cada regeneración.

#### *Dosificación de químicos en los tanques de alimentación*

Al inicio de la investigación, la empresa de embutidos se encontraba en búsqueda de un nuevo proveedor de productos químicos para la prevención de corrosión e incrustación para las calderas. Una vez que la empresa, a través del Supervisor de Aguas Industriales, seleccionó a dicho proveedor, se definieron los residuales de los químicos que debían estar presentes en este equipo de transferencia de calor. En base a esto se establecieron los rangos de residuales tanto para el sulfito (anticorrosivo) como para el fosfato (antiincrustante), los cuales deberían estar entre 30 y 60 ppm en la toma de muestra del equipo para así garantizar un tratamiento interno óptimo. Una vez definido dicho rango, se estableció que la dosificación del químico debía ser continua e igual a 5,3 mL/min (un 40% del flujo máximo de dosificación) de la bomba marca SISTEMA ADVANCE, modelo U005. Es importante señalar que esta dosificación puede variar con el tiempo, dependiendo de la demanda de vapor del proceso, por lo que se recomienda realizar los análisis con una frecuencia interdiaria para verificar que los residuales se encuentran en los rangos establecidos.

Por otro lado, el proveedor de químicos para los condensadores evaporativos ya estaba establecido por la empresa, teniendo que el único tratamiento químico recibido por estos equipos era uno a base de amonio cuaternario, el cual es un biocida no oxidante capaz de controlar el crecimiento de microorganismos en sistemas de refrigeración abiertos. Para garantizar un control microbiológico con el amonio cuaternario en el agua de los condensadores, se estableció que su residual en la piscina debería de estar entre 300 y 400 ppm, por lo que se dosificará 350mL/día para los de Planta Actual y 100 mL/día para los de Planta Nueva. El residual se

verificará por medio de una cinta colorimétrica, suministrada por el mismo proveedor.

El tratamiento químico recibido por los condensadores se encontraba incompleto, ya que los mismos no reciben ningún tratamiento para prevenir la corrosión y la incrustación. Es por ello que el tratamiento se debe completar, agregando un químico a base de fosfatos capaz de inhibir tanto la corrosión como la incrustación del sistema pero que a su vez no precipite en presencia de biocida no oxidante. El químico escogido puede trabajar en con aguas con alta alcalinidad y dureza, no contiene metales pesados y puede ser usado en conjunto con biocida oxidante y no oxidantes.

En cuanto a los residuales establecidos para un control químico antiincrustante y anticorrosivo efectivo en los condensadores evaporativos deberían encontrarse en 10 a 30 ppm.

#### *Capacidad de los tanques de alimentación de las calderas*

Las calderas ubicadas en el sector de Planta Nueva (calderas 1 y 2) poseen un tanque de alimentación que no cumple con la capacidad de almacenamiento al momento de efectuar las purgas de fondo, ya que si el operario desea purgar ambas calderas al mismo tiempo el tanque no podrá contener un volumen seguro agua, el cual se fijó en un 25% de la capacidad de almacenamiento del mismo. Es por ello que en la fase de mejoras del sistema de acondicionamiento de agua se propondrá y mostrará un tanque que cumpla con los requerimientos antes mencionados.

#### *Frecuencia y duración de las purgas de fondo*

El control de los sólidos disueltos, tanto en los condensadores evaporativos como para las calderas de la empresa es de gran importancia, ya que así se pueden evitar problemas de incrustación y depósitos en ellos. Para ello se realizaron medidas de dichos sólidos, por medio de la relación entre la conductividad del agua y la concentración de sólidos disueltos presentes en ellas en la toma de muestras de ambos equipos, lo que garantiza un buen funcionamiento de los equipos.

Basándose en la bibliografía y en experiencia aportada por el proveedor, se estableció que los sólidos disueltos para los condensadores evaporativos deberían de tener un máximo de 2500 ppm. Con respecto a las calderas, el rango aceptable de sólidos disueltos debe estar entre 1500-3000 ppm.

Una vez dicho lo anterior, la frecuencia de purga de fondo para las calderas será una purga cada 6 horas, ya que así se logran mantener los sólidos en el rango establecido. Con respecto a la duración de las purgas, se deben realizar de la siguiente manera: se abrirá la válvula por 10 segundos para remover los sólidos que están en los alrededores de la línea de purga, se cerrará por 10 segundos para que las turbulencias en la caldera produzcan una agitación de los sólidos en el tambor, y finalmente se abrirá la purga por 10 segundos más para remover la mayor cantidad de sólidos que, de otra forma, no puedan ser removidos. Esta manera de realizar la purga es mucho más efectiva en la remoción de sólidos con una mínima pérdida de agua, energía y productos químicos (Lipesa, 1998).

Con respecto a los condensadores evaporativos, se estableció que la purga de fondo se realizará cada 7 días, es decir, una vez por semana lavando la piscina del equipo, para remover la mayor cantidad de sólidos y evitar incrustaciones en los mismos.

#### *Verificación de la relación entre los sólidos disueltos y la conductividad del agua*

La relación de los sólidos disueltos (TDS) en ppm y la conductividad ( $\mu\text{S}$ ) presente en el agua puede variar dependiendo de los tipos de sales que se encuentren en ella, por lo que la relación expuesta en la bibliografía no es única, sino que puede cambiar con respecto al tipo de agua de abastecimiento o por las sales originadas en los equipos de transferencia de calor.

En la Figura N° 23 se muestra el comportamiento del factor de relación entre la conductividad y los TDS por un período de análisis de 11 días, realizados en las calderas de la empresa.

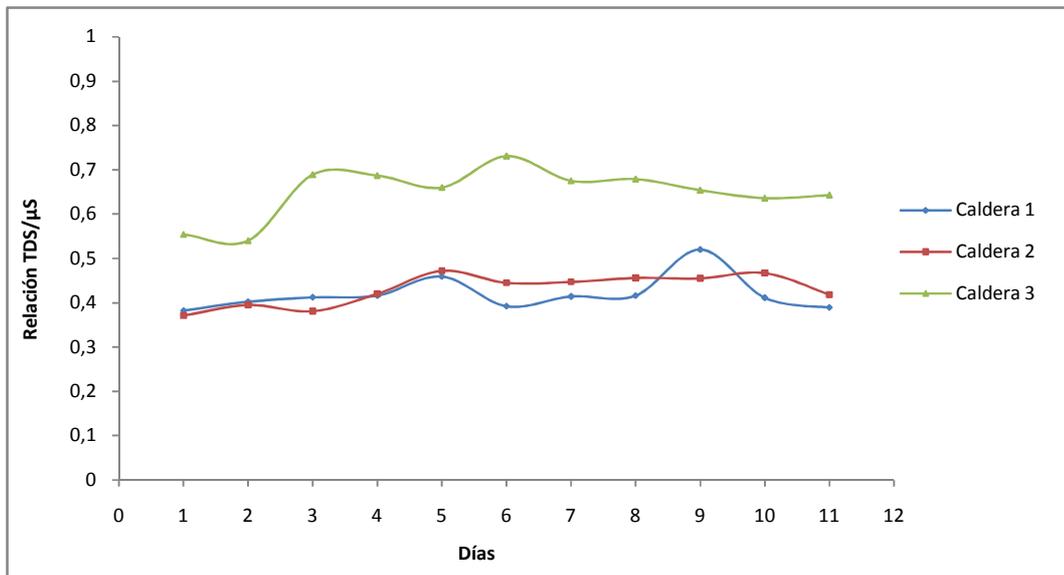


Figura N° 23. Comportamiento del factor de relación TDS/ $\mu$ S en el período de análisis.

En la Tabla N° 18 se mostrarán los valores promedio obtenidos del factor de relación en todas las calderas de la empresa.

Tabla N° 18. Factor de relación TDS y conductividad obtenidos para las calderas de la empresa.

Caldera	Relación promedio (TSD/ $\mu$ S)
1	0,419
2	0,430
3	0,650

La relación de las Calderas 1 y 2, las cuales trabajan en paralelo, fue muy distinta a la encontrada en la bibliografía, en tanto que la Caldera 3 si mostró cercanía al valor propuesto por la referencia teórica. Es posible que esta situación se atribuya a que las Calderas 1 y 2 utilizaban un tratamiento químico diferente al de la Caldera 3, además de que dicho tratamiento no era realizado por completo (no se agregaba ningún producto anticorrosivo); mientras que la Caldera 3, que sí recibía el

tratamiento químico completo, presentó una relación similar a la expuesta por la bibliografía.

Es importante destacar que la relación entre los sólidos disueltos y la conductividad se realizó únicamente para las calderas de la empresa, ya que estos equipos son los que presentan mayores problemas de incrustación y depósito comparado con los condensadores evaporativos, o en su defecto problemas de arrastre de sólidos al vapor del proceso contaminado, tantos a los equipos aguas arriba como al producto alimenticio cocinado.

Una vez establecidas las propuestas para el mejoramiento del sistema de acondicionamiento de aguas para intercambiadores de calor existente, se procedió a optimizar dicho sistema, con la adición y/o sustitución del tratamiento interno y externo.

### ***Mejoras al sistema de acondicionamiento de agua***

#### *Diseño de un tanque de alimentación para las calderas de Planta Nueva*

El sector de Planta Nueva posee un tanque de alimentación para las Calderas 1 y 2, que se hace insuficiente si el operador desea realizar las purgas de fondo de dichos equipos de transferencia de calor en un mismo instante de tiempo. Es por lo mencionado anteriormente que se decidió diseñar un nuevo tanque de alimentación, el cual debe contar con las siguientes características:

- Tanque cilíndrico horizontal, debido a que se dispone del espacio físico y de esta forma se facilita el acceso a la boca de visita, ubicada en la parte superior del mismo.
- Tres entradas de alimentación de agua de 1 ½ pulgada: una de aporte al tanque, otra para precalentar el agua y una última proveniente del retorno de condensado del proceso.
- Una entrada de 1/8 de pulgada para la dosificación del químico (tratamiento interno).

- Dos salidas de 2 de pulgadas, una para cada bomba que suministra de agua a las calderas 1 y 2.
- Un medidor de nivel, con su respectivo visor.
- Boca de visita horizontal de 60 cm de diámetro.
- Una salida de ½ pulgada, para la toma de muestra.
- Descarga de seguridad de una pulgada, ya que si se presenta algún problema en el control de nivel del agua el excedente se deseche por esta vía, y no por la boca de visita del tanque.
- Por último, un intercambiador de calor abierto, en el cual se usará parte del vapor generado en las calderas. Su configuración será en espiral, y su función principal será precalentar el agua de alimentación de los equipos antes mencionados.

Para determinar la capacidad del tanque de la alimentación para las calderas 1 y 2, se estimó que el volumen en la fase líquida dentro de cada caldera es de aproximadamente 550 litros (por medio del área de transferencia de calor y la longitud de la caldera), por lo que el tanque debería de poseer un volumen de 1100 litros o 1,1 m<sup>3</sup>. Este valor fue multiplicado por un factor de diseño de 1,5 previendo un aumento de la capacidad operativa de la empresa, ya sea añadiendo otra caldera al sistema o sustituyéndolas por unas de mayor generación de vapor, por lo que el volumen del tanque será de 1,65 m<sup>3</sup>, con una longitud de 1,5 m y diámetro de 1,1 m, el cual tendrá una capacidad de 1,56 m<sup>3</sup> para una relación altura diámetro (H/D) igual a 0,9 (Perry, 2001). En la Tabla N° 19 se presentaran las características físicas del tanque de alimentación a las calderas 1 y 2.

**Tabla N° 19. Características físicas del tanque de alimentación para las calderas de planta nueva**

Parámetro de diseño	Resultado
Diámetro del tanque, m	1,1
Longitud del tanque, m	1,5
Capacidad del tanque, m <sup>3</sup>	1,56

En cuanto al material de construcción del tanque, se empleará acero al carbono, ya que la sustancia a almacenar es agua, la cual no es tóxica. El aislamiento del tanque es importante, debido a que se precalentará el agua para aumentar la eficiencia térmica de las calderas y disminuir la concentración de los principales gases disueltos presentes, como oxígeno y dióxido de carbono, por lo que se usará fibra de vidrio con un espesor de 1 pulgada, ya que ofrece una gran resistencia a la transferencia de calor y es un material de bajo costo (Perry, 2001).

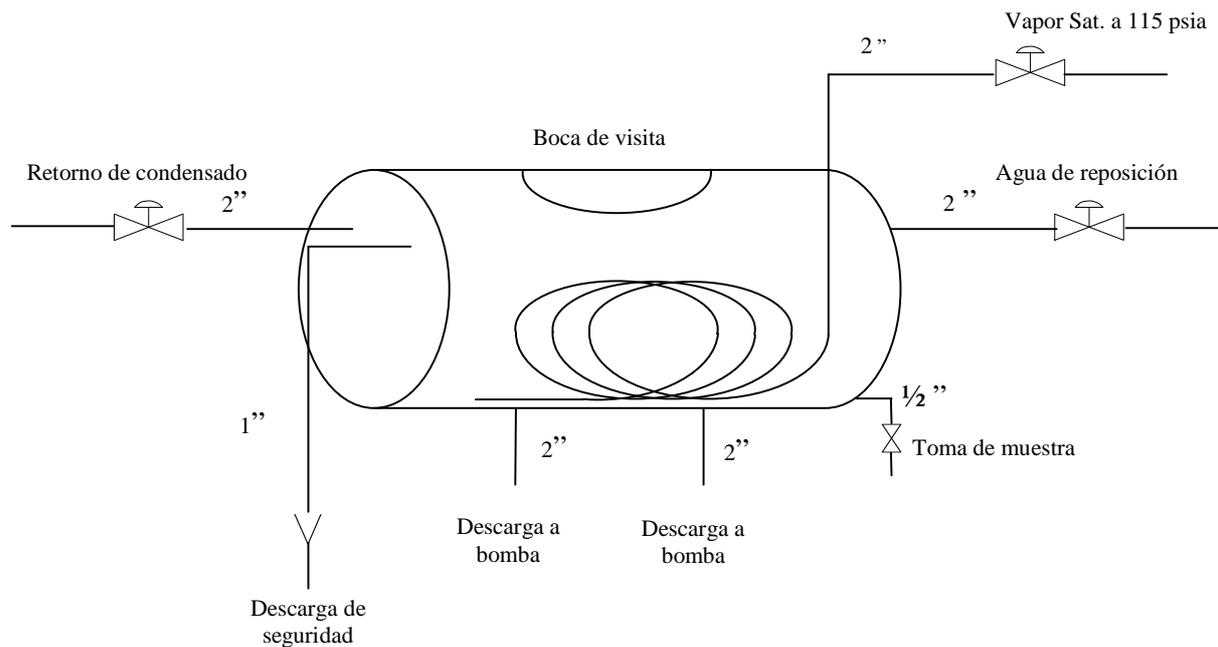
El agua de alimentación a las calderas de Planta Nueva y Planta Actual no recibe ningún tipo de precalentamiento, por lo que se diseñó un intercambiador de calor abierto para los tanques de Planta Nueva y Planta Actual, en donde se tomará parte del vapor generado por las calderas para lograr un precalentamiento del agua de 90 °C. Dicho vapor se encuentra en condiciones de vapor saturado, a una temperatura y presión de 169 °C y 115 psia, respectivamente. Ahora, basándose en la bibliografía (Perry, 2001), la cual establece los siguientes parámetros de diseño: calor transferido ( $q$ ), área equivalente ( $A_e$ ) y del serpentín ( $A_c$ ), temperatura inicial ( $t'$ ) y final dentro del tanque ( $T$ ) y coeficientes globales de transferencia de calor del serpentín ( $U_c$ ) y de las paredes laterales del tanque ( $U_s$ ), se determinó que el flujo de calor para el tanque de la Planta Nueva es de 939 KJ/h, ya que se estima que la temperatura de retorno del condensado al tanque de alimentación será de 70 °C, por lo que el serpentín tendrá un área de transferencia de calor de 0,60 m<sup>2</sup>, con una longitud de 3,76 m, un diámetro nominal de 2 pulgadas y flujo másico de 0,40 Kg/h. A simple vista, el flujo másico del serpentín parece pequeño, pero dadas las condiciones de calentamiento del tanque así como volumen del mismo, el vapor generado por la caldera (el cual posee una entalpía de 2767 KJ/Kg y la energía necesaria para elevar la temperatura a 90 °C), este valor resulta comprensible.

El serpentín deberá ubicarse en el fondo del tanque, en donde la entrada estará por encima del nivel del líquido sujeto con pernos sin holgura, con lo cual se logran una expansión y rigidez del tubo aceptables y en pendiente para facilitar su drenaje (Perry, 2001). En la Tabla N° 20 se presentaran las características principales obtenidas en el diseño del serpentín.

**Tabla N° 20. Características principales del serpentín diseñado**

<b>Parámetro de diseño</b>	<b>Resultado</b>
Diámetro, plg	2
Longitud, m	3,76
Área de transferencia de calor, m <sup>2</sup>	0,60
Flujo másico de vapor, Kg/h	0,40
Flujo de calor, KJ/h	939

Por otra parte, la capacidad del tanque de alimentación para la caldera de Planta Actual se encuentra en un parámetro de operación aceptable, ya que el mismo no presenta el problema de capacidad expuesto anteriormente, por lo que se procedió al diseño de un intercambiador de calor abierto para precalentar el agua y así aumentar la eficiencia energética de la caldera. Los parámetros de operación del sistema que se tomaron para el nuevo serpentín fueron los mismos expuestos en el caso anterior, obteniéndose una demanda de energía de 990, 44 KJ/Kg, y un área de transferencia de calor del serpentín de 0,63 m<sup>2</sup>, con una longitud de 3,95 m y flujo de vapor de 0,42 Kg/h. En cuanto a su ubicación, soporte y material de construcción, son los mismos mencionados en el diseño del intercambiador de calor para Planta Nueva. A continuación se muestra en la Figura N° 24 un esquema básico del diseño del tanque de alimentación para las calderas Planta Nueva.



**Figura N° 24. Esquema básico del tanque de alimentación de Planta Nueva**

Unas de las ventajas de precalentar el agua de alimentación de las calderas, es la desincorporación del desaireador del sistema de acondicionamiento de agua para calderas, ya que aumentando la temperatura en el tanque de alimentación se disminuye la solubilidad de los gases corrosivos presentes en el agua, tales como oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). También hay que destacar que este tipo de equipos se usa principalmente en planta generadoras de energía eléctrica a través de vapor, debido a que estos sistemas requieren de grandes caudales de agua acondicionada (alrededor de  $6 \cdot 10^5$  Kg/h) en comparación a los casi 6000 Kg/h de generación de vapor máximo de la empresa, por lo que instalar un equipo con estas características en el sistema acondicionamiento de agua no tendría ningún atractivo económico, ya que con el precalentamiento se logra el objetivo del desaireador de disminuir los gases corrosivos a un menor costo. Otra de las ventajas asociadas a es tipo de tanque es un aumento de la eficiencia de la caldera en un 10 %, con lo que se logra el ahorro de combustible.

### *Diseño de un nuevo suavizador para los condensadores evaporativos de Planta Actual*

En la actualidad el sistema de acondicionamiento de agua para los condensadores evaporativos de este sector de la planta no posee ninguna unidad de intercambio iónico para eliminar la dureza del agua, lo cual resulta perjudicial para estos equipos de transferencia de calor, ya que no hay manera de prevenir las incrustaciones por calcio y magnesio, por lo que se procedió al diseño de un suavizador para las demandas de agua cruda presentes en el sistema.

Cada condensador evaporativo de Planta Actual posee 1 bomba de 1 HP, la cual es capaz de producir un caudal volumétrico de 220 L/min, por lo que el agua requerida para este sector de la planta es de 1100 L/min (13,2 m<sup>3</sup>/h).

En la operación de torres de enfriamiento y condensadores evaporativos, la velocidad de evaporación de agua se puede fijar básicamente por la velocidad de remoción de calor sensible del agua (13,2 m<sup>3</sup>/h). De esta forma la pérdida por evaporación se puede aproximar, multiplicando el flujo total en GPM por el rango de enfriamiento en °F por 0,0008 (Marley, 1982). Por lo que la velocidad de evaporación es igual a 0,20 m<sup>3</sup>/h y la del agua de reposición (que depende directamente de los ciclos de concentración del equipo) es igual a 0,839 m<sup>3</sup>/h.

Una vez conocida la cantidad de agua de reposición para el sistema de acondicionamiento para los condensadores evaporativos, se podrá determinar el área transversal del suavizador, estableciendo una rata de suavización de 5 GPM/pie<sup>2</sup> (AWWA, 1987), por lo que resulta igual a 0,55 m<sup>2</sup> (para un diámetro igual a 0,41 m). La altura de la resina recomendada por la bibliografía es de 0,9 m (AWWA, 1987), con lo que se obtiene un volumen de resina igual a 0,49 m<sup>3</sup>.

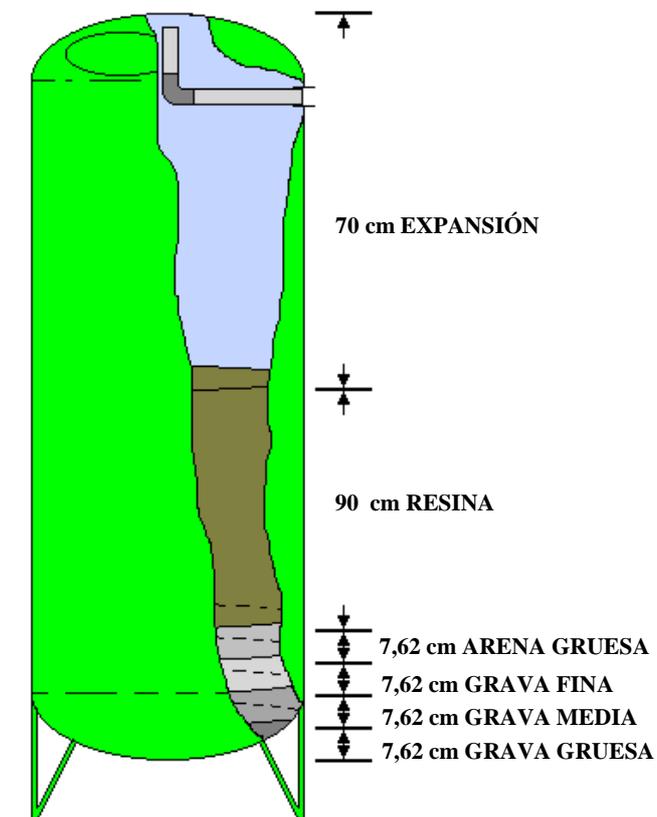
Es importante determinar el espacio libre del suavizador, ya que al momento de realizar el retrolavado el lecho de resina se expande, por lo que es recomendable multiplicar el lecho obtenido por 0,7 para garantizar que la resina no se pase al efluente, por lo tanto el volumen va a ser igual a 0,34 m<sup>3</sup>.

El lecho de resina tendrá un soporte de capas de grava graduada (gruesa abajo y fina arriba). Estas capas de grava y arena sirven para distribuir el agua de

retrolavado y coleccionar uniformemente el agua del efluente. Los requerimientos típicos para ellas son (Eskel, 1969):

- 3 pulgadas (7,62 cm) de grava gruesa (1/2" x 1").
- 3 pulgadas (7,62 cm) de grava mediana (1/4" x 1/2").
- 3 pulgadas (7,62 cm) de grava fina (1/8" x 1/4").
- 3 pulgadas (7,62 cm) de arena gruesa (0,8 a 1,2 mm de diámetro efectivo).

En la Figura N° 25 se muestra un esquema de cómo está distribuido el lecho de intercambio iónico dentro del suavizador



**Figura N° 25. Distribución del lecho de intercambio iónico en el suavizador diseñado**

- El consumo de sal para la regeneración es igual 5 Kg por cada pie<sup>3</sup> de resina, resultando igual a 86,5 Kg de NaCl.

- En cuanto a la rata de flujo de retrolavado establecida, fue de 12 GPM/pie<sup>2</sup>, resultando igual a 269 L/min.
- Por último, como material de construcción para el suavizador se puede elegir acero al carbono, siempre y cuando el mismo sea cubierto con una pintura anticorrosiva, debido a que para la regeneración se usará cloruro de sodio, el cual puede generar corrosión en las paredes internas del equipo.
- La construcción del suavizador debe realizarse por duplicado, ya que en el momento en que una unidad se encuentre en operación la otra debería estar en el ciclo de regeneración. En la Tabla N° 21 se muestra las características principales del suavizador diseñado.

**Tabla N° 21. Características principales del suavizador diseñado.**

<b>Parámetro de Diseño</b>	<b>Resultado</b>
Flujo de servicio, L/min	13,9
Altura del lecho, m	0,9
Área del lecho, m <sup>2</sup>	0,55
Volumen del lecho, m <sup>3</sup>	0,49
Caudal de retrolavado, L/min	269

#### *Diseño de filtros de arena y carbón para el sistema de acondicionamiento de Planta Actual*

Los filtros de arena y carbón ubicados en el sector de Planta Actual poseen un tiempo de operación muy cortos, comparados con los de Planta Nueva (ver Tabla N° 10). Esto se debe principalmente a dos factores:

- El caudal volumétrico (unos 7,5 m<sup>3</sup>/h aproximadamente) es demasiado alto para la capacidad de retención de sólidos de los filtros.
- El tipo de medio filtrante (cartuchos porosos) no es el adecuado para estos tipos de sistemas, ya que los mismos poseen un tiempo de vida útil corto y

los retrolavados no son tan eficientes comparados con un medio filtrante de arena.

Por lo dicho anteriormente, es recomendable sustituir los filtros por unos a presión de mayor capacidad, que utilicen como medio filtrante arena o carbón activado, según sea el caso.

En base al flujo volumétrico que maneja este sector de la planta, las principales características del diseño de los nuevos filtros serían las siguientes:

- Con una tasa de flujo de filtración de 4 GPM/pie<sup>2</sup> (AWWA, 1987), el área transversal de cada filtro debe ser de 0,77 m<sup>2</sup>, con un diámetro de 1 m.
- La altura del lecho filtrante de 0,6 m (AWWA, 1987).
- Volumen del lecho filtrante de 0,30 m<sup>3</sup>.
- Espacio para la expansión del lecho filtrante de 0,7 m (AWWA, 1987).
- Soporte del lecho filtrante por medio de grava con la siguiente granulometría:
  - 3 pulgadas (7,62 cm) de grava gruesa (1/2" x 1").
  - 3 pulgadas (7,62 cm) de grava mediana (1/4" x 1/2").
  - 3 pulgadas (7,62 cm) de grava fina (1/8" x 1/4").
  - 3 pulgadas (7,62 cm) de arena gruesa (0,8 a 1,2 mm de diámetro efectivo).
- El medio filtrante para el filtro de arena será de 0,24 m<sup>3</sup> de arena 12-20 y 0,24 m<sup>3</sup> de arena 30-40.
- El medio filtrante para el filtro de carbón será de 0,04 m<sup>3</sup> de arena 12-40 y 0,44 m<sup>3</sup> de carbón activado.
- Una tasa de retrolavado de 12 GPM/pie<sup>2</sup>, por lo que flujo debe ser igual a 35 L/min.
- Para el material de construcción se escogió acero al carbono, ya que es un material económico.
- Dos manómetros, uno a la entrada del equipo y otra a la salida, para determinar la caída de presión y establecer los tiempos de servicio. En la

Figura N° 26 se mostrará la distribución del medio filtrante para el filtro de arena y carbón activado.



Figura N° 26. Distribución del lecho filtrante en los filtros de arena y carbón

### *Implementación de retorno de condensado en el sistema de acondicionamiento de agua para las calderas de la empresa*

El retorno de condensado en el sistema de acondicionamiento de agua para las calderas es de gran importancia debido a su ahorro energético y a una disminución considerable en el agua de reposición al sistema.

Actualmente en los dos sectores de la empresa el agua condensada proveniente del proceso (hornos de cocción de producto) es desechada a la red de aguas negras, por lo que no se está aprovechando el condensado el cual posee gran cantidad de energía y con características físico-químicas de un agua prácticamente pura. Es por lo dicho anteriormente que el agua debería recibir un tratamiento químico anticorrosivo para eliminar parte de la concentración del oxígeno y dióxido de carbono adquiridos en el proceso de condensación.

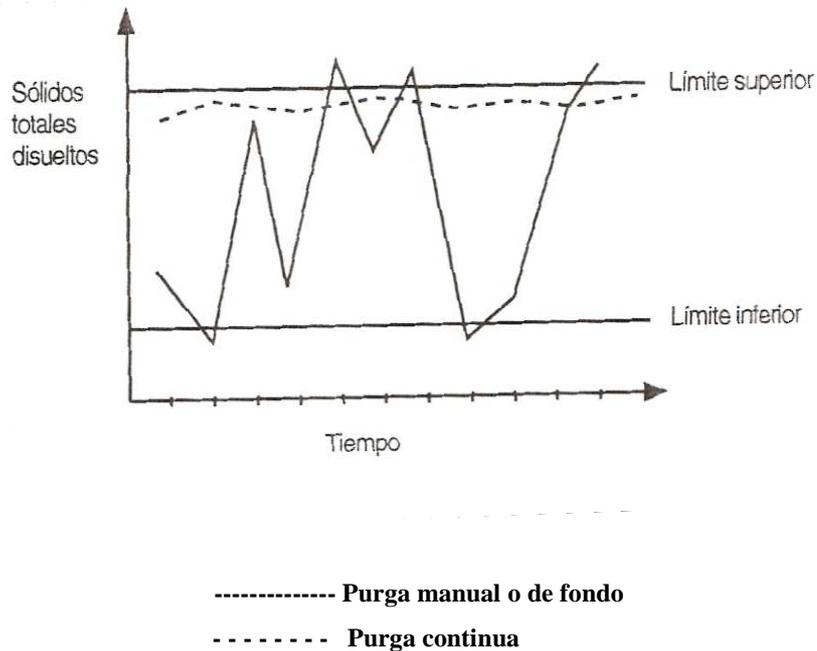
Evaluando con los operarios de la empresa se pudo constatar que la red de conexiones con su respectivo tanque de almacenamiento para el retorno de

condensado de Planta Nueva estaba instalada pero no en funcionamiento, debido a que la bomba que retornaba el agua a tanque de alimentación de las calderas presento una avería y nunca fue reparada, por lo que decidieron operar sin este retorno de condensado. Con lo dicho anteriormente, se recomienda que dicha bomba sea puesta nuevamente en funcionamiento, para lograr así aumentar la eficiencia de la caldera y se disminuir el consumo de agua al sistema.

Para el sector de Planta Actual, el sistema de acondicionamiento de agua no presenta retorno de condensado por lo que se recomienda instalar un tanque de almacenamiento del agua condensada por el proceso de  $1 \text{ m}^3$  ya que dicha caldera posee una generación de vapor máxima de 1200 Kg/h y una bomba de 1 HP de potencia. Se estima que la distancia de entre el tanque de alimentación de las calderas y el proceso de aproximadamente de 16 m por lo que se necesitará esta cantidad en tubos de 2 pulgadas de acero al carbono.

#### *Implementación de un sistema de purga continua en las calderas*

La purga continua es una manera muy eficiente de controlar los sólidos disueltos presentes dentro del agua de la caldera, ya que por medio de este mecanismo se logra mantener los sólidos en el rango deseado y se evitan grandes fluctuaciones de concentración dentro de la caldera. En la Figura N° 27 se puede observar el comportamiento de los sólidos disueltos dentro de la caldera, para purga discontinua y purga continua.



**Figura N° 27. Comportamiento de los sólidos disueltos en calderas, para purga continua y discontinua.**

La línea de purga continua debe ser instalada de manera que permita la remoción del agua concentrada en la caldera. Esta zona se encuentra a un nivel de 4 a 12 pulgadas (10,1 a 30,4 cm) por debajo del nivel mínimo de agua esperado. La posición de los orificios de la línea de purga debe estar ubicada en la parte superior, ya que así se logra una mejor remoción de agua de caldera y de sólidos suspendidos.

Otra situación a considerar es la que la línea de purga continua no debe estar cerca de la línea de agua de alimentación debido a que se estaría drenando agua de alimentación o lo que es igual agua con bajo contenidos de sólidos. Finalmente para que la línea tenga una buena distribución y no acumule lodos en una sección de tambor debe existir una caída de presión a través de la línea, (Lipessa, 1998). Las características principales que debe tener el tubo son las siguientes:

- Diámetro nominal del tubo 1/2 pulgada
- Diámetro de los orificios 1/8 de pulgada
- Número de orificios igual a 12

- Válvula de aguja para controlar el flujo de la purga de una conexión de 1 pulgada
- El tubo será de acero al carbono y estará sumergido a 10 cm de la interface líquido- vapor.

La Tabla N° 22 se muestra la cantidad de agua que debe ser purgada basándose en los ciclos de concentración, vapor máximo generado por cada caldera.

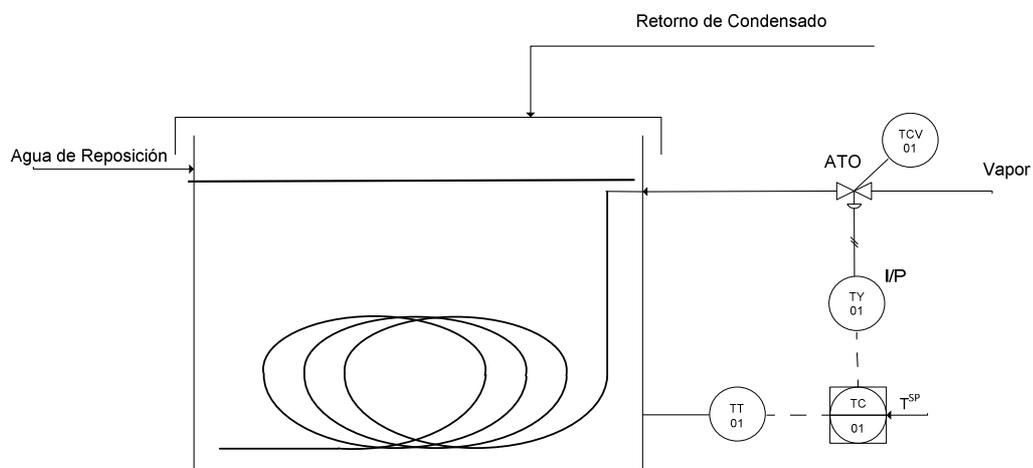
**Tabla N° 22. Cantidad de agua que debe ser purgada para cada caldera.**

<b>Caldera</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Vapor generador, (Kg/h)</b>	<b>Purga, (Kg/h)</b>
1	19	2400	133
2	18	2350	141
3	15	1250	85

### *Diseño de sistema de Control Automático*

Para el tanque diseñado en el sistema de acondicionamiento de agua para las calderas de Planta Nueva se debe controlar tanto la temperatura dentro del tanque como el nivel del mismo.

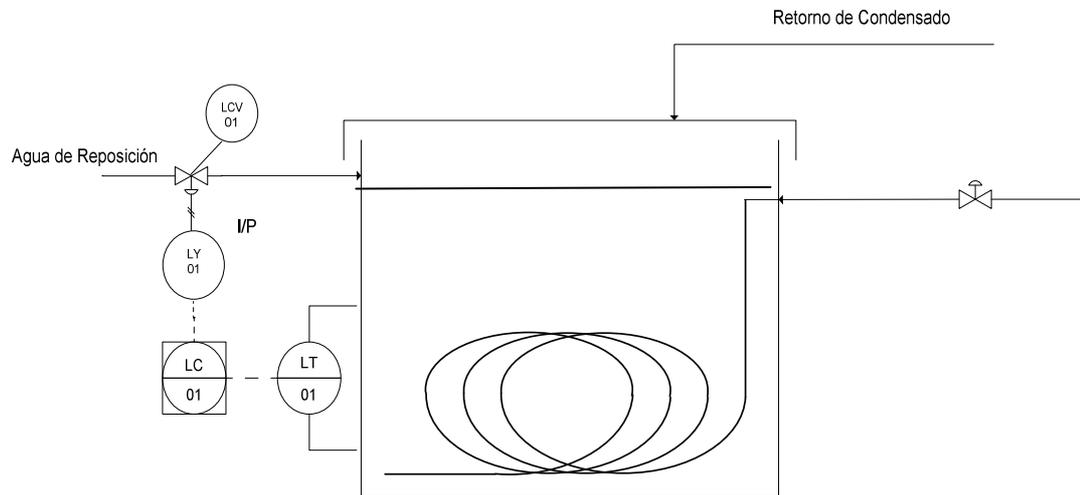
La temperatura dentro del tanque será controlada por medio de una línea de vapor tomada directamente de la caldera. En la Figura N° 28 se muestra como será el lazo de control para lograr que la temperatura del tanque sea de 90 °C.



**Figura N° 28. Diagrama ISA de control de temperatura dentro de los tanques.**

El elemento final de control será una válvula neumática TCV-01 con falla cerrada (FC) y aire para abrir. Se escogió esta configuración de válvula por motivos de seguridad ya que si el sistema de control llega a fallar y no hay demanda de agua de alimentación para las calderas el tanque puede sobrecalentarse ocasionando daños a los operarios de la empresa. El controlador TC-01 debe de ser del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), ya que estos son utilizados en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos de ello son los circuitos de temperatura y concentración, (Smith & Corripio, 2006). Es importante señalar que el controlador TC-01 tendrá una acción inversa, debido a que si la temperatura del tanque llega a subir la señal hacia el elemento final de control debería de disminuir.

Por otro lado, el nivel del tanque de alimentación para calderas se puede controlar ajustando el flujo volumétrico del elemento final de control tal como lo muestra la Figura N° 29.



**Figura N° 29. Diagrama ISA de control de nivel dentro de los tanques.**

El nivel de agua para ambos tanques estará por medidas de seguridad entre 70 y 90 porciento de su capacidad, ya que si el operador decide realizar las purgas de fondo el tanque podrá soportar una descarga rápida de agua. También, mientras menor sea entre la altura máxima y mínima para la activación del elemento final de control menor será el vapor aportado por la caldera y se disminuirá el choque térmico entre los dos medios.

La válvula LCV-01 fallará de manera cerrada por motivos de seguridad, ya que si la falla es abierta el tanque podría desbordarse. Por otra parte el controlador será de tipo Proporcional-Integral (PI) debido a que las constantes de tiempo son más cortas que las de concentración y temperatura. Por último, la acción del controlador será inversa, ya que un aumento de nivel en tanque de almacenamiento provocará una disminución de la señal emitida hacia la válvula LCV-01 ocasionado una disminución del flujo.

### ***Selección de la propuesta más adecuada***

A continuación se muestran las mejoras propuestas para mejorar el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de agua para calderas y condensadores evaporativos de la empresa a corto, mediano y largo plazo.

#### *Mejoras a corto plazo*

- Cambiar las resinas de intercambio iónico de los suavizadores ubicados en el sector de Planta Actual, ya que se lograría duplicar el volumen de agua suavizada.
- Dosificación completa de químicos, para prevenir la incrustación y corrosión de los condensadores evaporativos y las calderas de la empresa.
- Reactivar el funcionamiento de la bomba de retorno de condensado del sector de Planta Nueva.
- Implementar los tiempos de duración y frecuencia de las purgas de fondos expuestas para las calderas y condensadores evaporativos.

#### *Mejoras a mediano plazo*

- Sustituir el tanque de alimentación con las especificaciones expuestas anteriormente para las calderas del sector de Planta Nueva, para lograr realizar las purgas de fondo de ambos equipos al mismo tiempo.
- Instalar el sistema de purga continua, para poder mantener los sólidos disueltos dentro de las especificaciones recomendadas. Una vez que se haya instalado este sistema, purgar la cantidad de agua mostrada en la Tabla N° 20.
- Instalar los suavizadores diseñados para los condensadores evaporativos del sector de Planta Actual, para lograr un control efectivo de la dureza del agua dentro de los equipos.
- Instalar los intercambiadores de calor diseñados en los tanques de alimentación de las calderas, para poder incrementar la eficiencia energética de estos equipos.

- Colocar un contador volumétrico a la salida de los suavizadores, para que los operadores puedan programar la parada del equipo para su respectiva regeneración.
- Sustituir los filtros de arena y carbón ubicados en el sector de Planta Actual por los especificados anteriormente, para lograr tiempos de servicio más largos.

*Mejoras a largo plazo*

- Implementar los sistemas de control automáticos expuestos anteriormente, para lograr incrementar aún más la eficiencia energética de la caldera.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

- La fuente de abastecimiento de agua que presentó mayor dureza fue la del Pozo #4.
- A pesar de que dos fuentes de abastecimiento de agua provienen de pozos de agua profunda, la concentración de sílice no representa un problema de incrustación para los equipos de la empresa.
- El tiempo de servicio de los filtros de Planta Actual y Planta Nueva fueron de 7 horas y 36 horas, respectivamente.
- El volumen de ruptura obtenido en la resina de Planta Actual fue mucho menor al de Planta Nueva.
- Realizando el cambio del lecho de la resina de los suavizadores de Planta Actual se logra duplicar la cantidad de agua tratada por estos equipos.
- Los condensadores evaporativos de la empresa no recibían ningún tratamiento químico para prevenir corrosión e incrustaciones.
- Dosificando 5,3 mL/min del producto químico suministrado al sistema de acondicionamiento de agua para calderas y 350 mL/día a la de condensadores evaporativos de Planta Actual, se garantiza un control anticorrosivo e incrustante efectivo.
- Dosificando 5,3 mL/min del producto químico suministrado al sistema de acondicionamiento de agua para calderas y 100 mL/día a la de condensadores evaporativos de Planta Nueva, se garantiza un control anticorrosivo e incrustante efectivo.
- Las purgas de fondo para las calderas de la empresa se deben hacer cada 6 horas, mientras que para los condensadores evaporativos la frecuencia recomendada es cada 7 días.

- La relación entre los sólidos disueltos y la conductividad para este tipo de agua es igual a  $1 \mu\text{S} = 0,42 \text{ ppm}$  para las Calderas 1 y 2; con respecto a la Caldera 3, la relación viene dada por  $1 \mu\text{S} = 0,65 \text{ ppm}$ .
- Implementar el precalentamiento del agua de alimentación para las calderas de la empresa permite excluir el desaireador del sistema de acondicionamiento de aguas de la empresa.
- Precalentando el agua de alimentación para las calderas se logra incrementar la eficiencia energética del equipo en un 10%.
- El volumen del Tanque de alimentación de agua para las calderas de Planta Nueva será de  $1,65 \text{ m}^3$ .
- Cambiando los filtros de arena y carbón de Planta Actual se puede incrementar el tiempo de servicio de estos equipos.
- Controlar los sólidos disueltos en la caldera, por medio de un sistema de purga continua, resulta más eficiente que hacerlo con una purga de fondo o manual.
- Poniendo en funcionamiento la bomba de retorno del condensado en el sistema de acondicionamiento de aguas de Planta Nueva, se lograría reactivar esta etapa del sistema en cuestión.

## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

- Se deben caracterizar las fuentes de abastecimiento de agua de la empresa 2 veces al año, para determinar cómo van cambiando los parámetros físico-químicos y así tomar acciones correctivas en el sistema de acondicionamiento de aguas.
- Evaluar la capacidad de la resina de intercambio iónico anualmente, para establecer los nuevos volúmenes de ruptura, ya que estos pueden variar a medida que transcurre el tiempo.
- Evaluar si la relación entre sólidos disueltos y conductividad se mantiene en el tiempo, ya que éstos dependen de la calidad que posea las fuentes de abastecimiento de agua de la empresa.
- Por último, implementar en el menor tiempo posible las mejoras al sistema de acondicionamiento de aguas de calderas y condensadores evaporativos de la empresa, propuestas en este Trabajo Especial de Grado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Adroer, N. & Ignacio, J. (2000). Tratamiento de Aguas de Refrigeración con Control de Legionella. [Revista periódica]. Disponible: <http://www.usuarios.lycos.es/>. [Consulta: 2008, abril 10].
2. Eskel, N. (1969). Tratamiento de Agua para la Industria y otros Usos. Editorial Continental. Ciudad de México, México. 798 p.
3. González, J.C., Peña, J.A. & Susial, P. (2000) Tratamientos Externos e Internos para Calderas. [Revista periódica]. Disponible: <http://www.usuarios.lycos.es/> [Consulta: 2008, abril 10].
4. Gumá, M & Mariano, A. (2003) Manual de Prevención y Control de la Legionella. [Online]. Disponible: <http://209.85.165.104/>. [Consulta: 2008, abril 11].
5. Instrucciones de Mantenimiento EVAPO. (2007) Torres Abiertas, Torres de Circuito Cerrado y Condensadores Evaporativos. [Online]. Disponible: <http://www.evapcoeuropa.net/uploaded-net/documents/eu>. [Consulta: 2008, abril 11].
6. Kemmer, Frank N. (1987). The NALCO Water Handbook. Editorial McGraw-Hill. 2da. Edición. Nueva York, Estados Unidos. 985 p.
7. Lenntech, (2008). TDS y Conductividad Eléctrica. [Resumen en línea] Disponible: <http://www.lenntech.com/espanol/> [Consulta: 2008, septiembre 12].
8. Lipesa. (1998). Tratamiento Químico del Agua. Editorial Impregraf. Caracas, Venezuela. 329 p.
9. Marley, E. (1982). Cooling Towers Fundamentals. 2da Edición. Editorial Hensyl John. Nueva York, Estados Unidos. 829 p.

10. Mateos, F. (2001). Tema 2: Condensadores. [Resumen en línea]. Centro Salesiano “Manuel Lora Tamayo”. Disponible: <http://nuke.salesianos-jerez.com/> [Consulta: 2008, septiembre 10].
11. Perry, R.H. & Green D.W. (2001, Volumen II). Manual del Ingeniero Químico. Editorial McGraw-Hill. 4ta. Edición. Madrid, España. 728 p.
12. Secretaria de Energía. Dirección de Enlaces y Programas Regionales. (2008) Tratamiento de Agua para su Utilización en Agua de Calderas. [Resumen en línea]. Cuauhtémoc, México, D.F. Disponible: <http://www.conae.gob.mx/wb/> [Consulta: 2008, septiembre 12].
13. Smith, C. & Corripio A. (2006). Control Automático de Procesos. Editorial Limusa. México. 717 p.
14. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1985). Editorial McGraw-Hill. 16ta. Edición. New York, Estados Unidos. 654 p.
15. The American Water Works Association, Inc (1987). Water Quality and Treatment. Editorial McGraw-Hill. 4ta. Edición. Washington, DC, Estados Unidos. 1268 p.
16. Torres, E., Salazar, J. & Fernández, J (2005). Sistemas de Control en Calderas de Vapor. [Resumen en línea]. Monografía no publicada, Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería. Disponible: <http://www2.eie.ucr.ac.cr/~valfaro/docs/monografias/> [Consulta: 2008, septiembre 10].
17. Universidad Autónoma de Madrid, (2006). Intercambio Iónico. [Resumen en línea]. Área de Ingeniería Química. Madrid, España. Disponible: [http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf/](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf/) [Consulta: 2008, septiembre 10].

18. Viti, A. (2002). Figuras de Equipos de Refrigeración. [Resumen en línea] ATECYR. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. Disponible:[http://www.msc.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/figuras\\_legionella.pdf](http://www.msc.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/figuras_legionella.pdf) [Consulta: 2008, septiembre 10].

## ANEXOS

### **Anexo 1. Procedimiento experimental y expresión de resultados para la determinación de la capacidad de la resina.**

#### *PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL*

La capacidad de la resina se verificará de la siguiente manera. Se tratará con de NaOH al 0,085 N con un caudal de alimentación de 50 ml/min.

Se procederá de la siguiente forma:

- 1) Se bombea agua destilada a través del lecho, ajustando el caudal correspondiente al primer experimento que se va a realizar, hasta asegurarnos de que la conductividad registrada sea constante y correspondiente a la del agua destilada.
- 2) Es importante que la resina nunca se encuentre seca, siempre debe quedar el lecho sumergido en cierta cantidad de líquido.
- 3) Regeneración de la resina: Se pasa una corriente de HCl 0,1N hasta que la conductividad del efluente de salida sea constante e igual a la de la disolución de entrada.
- 4) Se vuelve a alimentar agua destilada hasta la total eliminación del HCl residual.
- 5) A continuación se van a obtener los datos necesarios para dibujar la curva de ruptura. Se cierra la válvula de alimentación de agua destilada y se abre la de alimentación de NaOH. Se toma ese momento como tiempo cero y se anotan valores de la conductividad de la disolución procedente de la columna cada 30 s hasta obtener una lectura de conductividad constante e igual a la de disolución de entrada ( $\lambda_{\infty}$ ).
- 6) Se sustituye la corriente de NaOH por la de agua destilada hasta eliminar la sosa residual en la columna.

7) Se vuelve a regenerar la resina según el apartado 3) y a bombear agua destilada según el apartado 4).

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se representa gráficamente el cociente de valores de conductividad  $\lambda/\lambda_{\infty}$  frente al volumen efluído y de este modo, se obtiene la curva de ruptura del sistema. A partir de esta gráfica y del caudal utilizado se puede calcular el tiempo de ruptura del sistema que sería el tiempo que tardaría la disolución alcalina que sale de la columna en alcanzar la concentración de ruptura, siendo ésta un 20% de la concentración inicial.

A partir de la curva de ruptura por integración numérica se calcula el valor de la capacidad de la resina utilizada en el experimento, la cantidad de soluto retenida en el tiempo de ruptura) y la fracción de lecho utilizada.

A partir de los resultados obtenidos determinar cómo influye el peso de resina empleado, la concentración de NaOH y el caudal de alimentación utilizados sobre: el tiempo de ruptura, la capacidad de la resina y la cantidad total de soluto retenida, fracción de lecho utilizado y longitud de lecho no utilizado en el punto de ruptura.

### Anexo 2. Propiedades físico-químicas de la resina catiónica Bayer Lewatit S-100

Uniformity coefficient*		max.	1.1
Mean bead size	* (AB)	mm	0.60 (+/- 0.05)
Share of beads in the range	* AB +/- 0.05 mm	%	> 90
Bulk density	(+/- 5%)	g/l	780
Density		approx. g/ml	1.22
Water retention		%	47 - 53
Total capacity*		min. eq/l	1.8
Volume change	H+ -> Na+	max. %	-8
Stability	at pH-range		0 - 14
Storability	of the product	min. months	6
Storability	at temperature	°C	-10 - +40

\* These data are specification values and are subject to continuous monitoring.

**Anexo 3. Características físico-químicas del agua del Pozo # 2 por un periodo de 20 días**

<b>Parámetro</b>	<b>Día</b>																			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Sólidos Totales, (mg/L)	235	232	231	234	235	237	242	230	235	237	235	242	236	235	238	235	238	232	235	235
pH	7,9	7,9	7,8	7,8	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	8,0	7,9	7,9	8,0	7,9	7,8	7,9	7,8	7,7	7,8	7,9
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	12,7	13,1	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	139	135	135	136	138	139	139	139	151	135	139	135	139	139	139	135	137	139	139	145
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	148	145	145	145	148	146	148	148	148	148	146	148	157	155	148	148	156	148	148	148
Cloruros, (mg/L de Cl)	11,2	11,5	11,0	11,3	11,2	11,2	11,2	11,0	11,5	11,0	11,2	11,2	11,2	11,2	11,0	11,5	11,0	11,5	11,2	11,5

**Anexo 4. Características físico-químicas del agua del Pozo # 4 por un periodo de 20 días**

Parámetro	Día																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sólidos Totales, (mg/L)	330	326	330	322	326	330	326	326	322	326	326	326	326	322	326	330	300	322	322	326
pH	8,0	8,1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,1	8,1	8,0	7,9	8,0	8,0	7,9	7,9	8,0	8,0	8,0	8,1	8,0	7,9
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	11,9	11,9	12,5	11,9	11,9	12,3	11,9	11,9	11,9	12,0	11,1	11,9	11,5	11,9	11,7	11,1	11,9	11,9	11,3	11,9
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	251	256	251	251	252	245	251	256	251	251	251	135	251	251	251	251	251	254	251	251
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	198	181	188	181	181	181	188	198	181	185	181	181	181	178	197	181	181	181	181	181
Cloruros, (mg/L de Cl)	24,6	24,8	24,6	24,8	24,6	24,6	24,6	24,6	24,9	24,6	24,6	25,3	24,6	24,6	25,3	24,6	24,6	24,3	24,6	24,6

**Anexo 5. Características físico-químicas del agua de HIDROCAPITAL por un periodo de 20 días**

Parámetro	Día																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sólidos Totales, (mg/L)	96	97	96	96	92	96	96	96	92	92	96	92	96	975	96	92	96	96	96	96
pH	7,5	7,5	7,5	7,7	7,5	7,5	7,5	7,4	7,5	7,4	7,5	7,7	7,4	7,5	7,5	7,9	7,5	7,4	7,6	7,6
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	6,7	6,7	6,5	6,7	6,7	6,7	6,8	6,7	6,7	6,5	6,7	6,7	6,8	6,7	6,7	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	126	131	126	136	126	126	126	126	123	126	126	126	123	126	126	126	131	126	123	126
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	128	127	122	127	127	127	127	122	128	127	127	127	127	128	122	127	127	127	127	128
Cloruros, (mg/L de Cl)	21,3	21,5	21,3	21,5	21,3	21,3	21,3	21,5	21,3	20,9	21,3	20,9	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	20,9	21,3	21,3

**Anexo 6. Características físico-químicas del agua proveniente del tanque subterráneo Planta Actual por un periodo de 20 días**

Parámetro	Día																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sólidos Totales, (mg/L)	235	245	239	235	235	239	235	235	235	237	235	235	242	235	235	235	245	235	235	235
pH	7,4	7,5	7,4	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,5	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,7	7,4
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	8,7	9,1	8,7	8,5	8,7	8,7	8,7	8,7	9,1	8,7	8,7	8,5	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	156	145	148	148	148	148	148	148	148	148	156	148	156	148	148	148	148	148	156	148
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	127	128	127	127	127	128	127	127	127	128	122	127	127	122	122	127	125	128	127	127
Cloruros, (mg/L de Cl <sup>-</sup> )	22,4	20,9	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	21,5	22,4	23,9	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	21,5	21,5	22,4	22,4

**Anexo 7. Características físico-químicas del agua proveniente del tanque subterráneo Planta Nueva por un periodo de 20 días**

Parámetro	Día																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sólidos Totales, (mg/L)	241	241	241	241	241	241	241	241	241	237	241	242	243	241	241	241	241	243	239	239
pH	7,5	7,9	7,5	7,8	7,5	7,5	7,3	7,5	7,5	7,4	7,5	7,5	7,5	7,5	7,3	7,7	7,5	7,7	7,7	7,5
Sílice, (mg/L de SiO <sub>2</sub> )	12,7	8,5	8,3	8,5	9,0	8,5	8,8	8,5	8,0	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	9,2	8,5	8,0	8,5	8,5	8,5
Dureza Total, (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	176	176	184	178	178	178	178	180	178	178	176	180	180	178	178	180	178	178	178	178
Alcalinidad Total, (mg/ L de CaCO <sub>3</sub> )	98	101	98	98	98	101	98	96	96	98	98	148	101	101	98	98	98	101	101	98
Cloruros, (mg/L de Cl)	14,9	15,3	15,9	15,3	15,3	15,3	15,3	11,0	15,5	15,5	15,3	15,3	15,3	15,3	15,5	14,9	15,9	15,3	15,3	15,9

**Anexo 8. Datos obtenidos de la determinación del volumen de ruptura para las resinas catiónicas fuertes de la empresa con un caudal de efluente de 58 mL/min y una conductividad de la solución de NaOH de 17590  $\mu$ S**

<b>Volumen, mL</b>	<b>Planta Nueva, (Co/C)</b>	<b>Bayer L. S-1000, (Co/C)</b>	<b>Planta Actual, (Co/C)</b>
0	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,0000	0,0000	0,0000
58	0,0000	0,0000	0,0000
87	0,0000	0,0000	0,0000
116	0,0000	0,0000	0,0011
145	0,0000	0,0006	0,0034
174	0,0000	0,0011	0,0085
203	0,0011	0,0017	0,0233
232	0,0028	0,0023	0,0637
261	0,0108	0,0034	0,1438
290	0,0313	0,0057	0,2916
319	0,0733	0,0080	0,5765
348	0,1603	0,0085	0,8221
377	0,2973	0,0165	0,9068
406	0,4520	0,0267	0,9540
435	0,6202	0,0512	0,9352
464	0,7572	0,0966	0,9824
493	0,8277	0,1904	0,9881
522	0,8744	0,3303	0,9801
551	0,8755	0,5247	0,9898
580	0,8783	0,7675	0,9943
609	0,9653	0,8783	0,9937
638	0,9630	0,9198	1,0085
667	0,9648	0,9295	0,9972
696	0,9551	0,9358	1,0023
725	0,9659	0,9301	0,9983
754	0,9625	0,9267	-
783	0,9721	0,9500	-
812	0,9750	0,9494	-
841	0,9738	0,9562	-
870	0,9858	0,9824	-
899	0,9687	0,9693	-
928	0,9738	1,0000	-
957	0,9750	-	-

**Anexo 9. Determinación de la relación TDS/ $\mu$ S para las calderas de la empresa por un periodo de 11 días**

Día	Relación (TDS/ $\mu$ S)		
	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3
1	0,382	0,371	0,554
2	0,402	0,395	0,540
3	0,412	0,381	0,689
4	0,416	0,42	0,687
5	0,459	0,472	0,66
6	0,392	0,445	0,731
7	0,414	0,447	0,675
8	0,416	0,456	0,679
9	0,52	0,455	0,654
10	0,411	0,467	0,636
11	0,389	0,418	0,643
<b>Promedio</b>	<b>0,419</b>	<b>0,430</b>	<b>0,650</b>