

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química



Título: Evaluación integral de la planta de tratamiento del agua de alimentación a los generadores de vapor de la planta de procesamiento de crudo EPEP-Centro.

Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico.

Autor: Andy Nuñez Moya.

Tutores: Ms.C. Carlos González Hernández

Dr.C. Yoney López Hervis

Matanzas

2018

*“Vive como si fueras a morir mañana,
aprende como si fueras a vivir siempre”*

Mahatma Gandhi

Nota de aceptación

Presidente del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Ciudad

Fecha

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Andy Nuñez Moya, declaro ser el único autor de esta investigación realizada en la Sede Universitaria de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, firma:

Nombre y Apellidos: _____

Firma: _____

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres y hermana, que siempre han hecho todo lo que está en sus manos para apoyarme y ayudarme conseguir mis objetivos en la vida.

Agradecimientos

Agradezco:

A mis tutores Carlos González y Yoney López por tomar este trabajo como suyo, y brindarme sus conocimientos y su tiempo.

A mis padres por su esfuerzo en mis años de estudiante.

A todos los trabajadores de la EPEP – Centro por su gran ayuda, en especial a Mariela Torres, Alejandro Díaz, Osmany Villavicencio, Yuri Díaz, Liz Beatriz y Dania Bueno.

A los profesores que me dedicaron su tiempo, en especial a Agustín Benítez, Juana Zoila Junco e Irina Pedroso.

A todas mis amistades por darme el aliento cuando más lo necesité, en especial a Patricia León por siempre ayudarme incondicionalmente en los momentos más difíciles.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Matanzas que intervinieron en mi formación como ingeniero.

A todos, ¡muchas gracias!

Resumen

El presente trabajo de diploma tiene como objetivo determinar la dureza máxima permisible con la que los suavizadores de la planta de tratamiento de agua para generación de vapor, de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro), abastecen la demanda de la misma en el proceso de tratamiento de crudo. Para lograr este objetivo se realiza una evaluación integral de la planta donde se caracteriza estadísticamente la operación actual de estos suavizadores para conocer su eficiencia en las condiciones actuales de dureza, donde se obtuvo que los suavizadores 1 y 3 trabajan con un 70 y 68% de eficiencia respectivamente. Se calcula el poder de intercambio que presentan las resinas en cada suavizador (4,87 y 4,77). Se determina el flujo de vapor generado para establecer el consumo de agua necesario en la planta ($511 \text{ m}^3/\text{d}$) y la dureza máxima permisible para garantizar este consumo de agua (438 ppm). Finalmente se establece que con resina nueva (poder de intercambio 7) la dureza máxima permisible sería 477 ppm para garantizar la generación de vapor.

ABSTRACT

The present diploma work is to determine the maximum allowable hardness with which softeners treatment plant water for steam generation of the Drilling and Extraction of Petroleum of the Center Company (EPEP-Center), supplies the demand of it in the process of crude treatment. To achieve this objective a comprehensive evaluation of the plant comes true where the actual operation of these softeners are statistically characterized to know its efficiency under current conditions of hardness, which was obtained that softeners 1 and 3 work with 70 and 68% is performed efficiency respectively. The exchange power of the resins in each softener (4.87 and 4.77) is calculated. The steam flow generated is determined to establish the water consumption needed in the plant ($511 \text{ m}^3/\text{d}$) and the maximum permissible hardness to guarantee this water consumption (438 ppm). Finally, it is establish that with new resin (exchange power 7) the maximum allowable hardness would be 477 ppm to guarantee steam generation.

INDICE

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	3
1.1 Tratamiento de aguas.....	3
1.1.1 El agua como materia prima para la generación de vapor	3
1.1.2 Fuentes de agua.....	4
1.2 Problemas más frecuentes en las calderas al utilizar agua no tratada	7
1.3 Metodologías de tratamiento de aguas	10
1.4 Resinas de intercambio iónico	15
1.4.1 Tipos Según su Estructura de Red.....	16
1.4.2 Tipos según su grupo funcional.....	16
1.4.3 Propiedades	18
1.4.4 Estabilidad.....	19
1.4.5 Selectividad	19
1.4.6 Regeneración de las resinas de intercambio iónico	20
1.4.7 Vida útil de las resinas de intercambio iónico	22
1.4.8 Marcas de resinas utilizadas en el tratamiento del agua	22
1.5 Conclusiones parciales del capítulo 1	25
Capítulo 2: Descripción de la metódica de trabajo empleada.....	26
2.1 Descripción del proceso de tratamiento de agua de pozos profundos.....	26
2.1.1 Descripción de la operación en los suavizadores.....	27
2.1.2 Método de análisis de Dureza	29
2.1.3 Caracterización de los equipos y materiales usados en el tratamiento de agua para calderas en la EPEP-Centro.....	29

2.2 Metodología empleada para el tratamiento estadístico.....	31
2.2.1 Pruebas de Normalidad.....	32
2.3 Metodología empleada para el cálculo de la eficiencia en los suavizadores	33
2.3.1 Cálculo de las velocidades en cada etapa de la regeneración.....	35
2.3.2 Cálculo del poder de intercambio real de la resina.....	36
2.4 Aplicación de balance de masa y energía en los generadores de vapor.	36
2.5 Evaluación de la eficiencia por el método indirecto	39
2.6 Cálculo del flujo de vapor por el método directo.	41
2.7 Cálculo de la recuperación de condensado	42
2.8 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa	43
Capítulo 3: Resultados y discusión.....	45
3.1 Caracterización estadística de las variables principales del proceso.....	45
3.2 Evaluación de la eficiencia de operación de los suavizadores 1 y 3.....	53
3.2.1 Cálculo del volumen de resina en los suavizadores	53
3.2.2 Cálculo de la eficiencia de los suavizadores	54
3.2.3 Cálculo de las velocidades en las diferentes etapas de regeneración	55
3.2.4 Cálculo del poder de intercambio real de la resina.....	56
3.3 Cálculo de la demanda de vapor que tiene la planta	57
3.4 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa	60
3.4.1 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa para la resina Lewatit S 1467 en sus condiciones óptimas (nueva).	63
3.5 Conclusiones parciales del capítulo 3.....	65
Conclusiones	67

Recomendaciones.....	68
Bibliografía.....	69
Anexos.....	75

Introducción

La principal función de La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP – Centro) es la de recibir el petróleo por oleoductos y transporte terrestre y entregarlo en calidad realizando el bombeo a la Empresa Comercializadora de Combustibles en Matanzas. Para lograr la calidad requerida del petróleo es de suma importancia para el proceso la generación de vapor, pues el petróleo producido en nuestro país es muy viscoso, y para trasladarlo es necesario aumentarle la temperatura.

Para la producción de vapor en la empresa se cuenta con cinco generadores de vapor, los cuales se utilizan alternamente según las necesidades del proceso. Es de suma importancia realizarle un tratamiento previo al agua de alimentación a calderas, pues alarga la vida útil de las mismas, y hace que se genere vapor de la manera más eficiente. Una de las principales características a eliminar del agua es la dureza, pues es la causante de incrustaciones en los generadores de vapor que perjudican la transferencia de calor en el interior de los mismos.

Existen diversos métodos utilizados a nivel mundial para el tratamiento de las aguas, uno de los más utilizados son las columnas suavizadoras, las cuales contienen resinas capaces de eliminar la dureza del agua a través del intercambio iónico. Este precisamente es el instalado en la planta de tratamiento de agua de la EPEP – Centro, el cual es el encargado de suministrar el agua que necesitan los generadores para producir vapor.

El agua a tratar es extraída y bombeada a la empresa desde los pozos profundos del acuífero de Varadero, los cuales presentan una gran dureza en sus aguas. Debido al incremento de la sequía en nuestro país, esta dureza ha alcanzado en los últimos años valores que sobrepasan las 500 ppm, lo cual perjudica la eficiencia de las columnas suavizadoras, trayendo consigo que se obtenga menor cantidad de agua en la planta de tratamiento, lo cual es una situación alarmante para la empresa para poder garantizar la demanda de vapor que requiere el proceso.

El condensado del vapor producido, es reutilizado nuevamente por las calderas junto con el agua tratada, garantizando el suficiente volumen de agua necesario para el proceso. La recuperación del condensado se logra en las condiciones normales del proceso, pero han existido

problemas en el mismo donde no se ha podido utilizar el condensado, como contaminación en las líneas, o rotura de alguna de ellas, por lo que se ha abastecido a los generadores de vapor solo con el agua tratada obtenida en las columnas de la planta de tratamiento

Por lo tanto se ha planteado el problema científico siguiente:

Problema:

¿Es posible que el sistema de tratamiento de agua garantice la demanda para la generación de vapor de la planta de procesamiento de crudo de la EPEP – Centro, en las condiciones actuales, ante el aumento en el tiempo de la salinidad en los pozos de agua cruda, sin la recuperación de condensado?

Hipótesis:

Si se evalúa el funcionamiento de los suavizadores del sistema de tratamiento de agua en las condiciones actuales, será posible determinar la dureza máxima permisible con la que se garantice la demanda de agua tratada.

Objetivo:

Determinar la dureza máxima permisible con la que los suavizadores de la planta de tratamiento de agua de la EPEP-Centro, abastecen la demanda de la misma, en el proceso de tratamiento de crudo.

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el tratamiento de aguas de alimentación a calderas que permita sentar bases teóricas para la realización del trabajo.
2. Caracterizar estadísticamente los principales parámetros de operación de la planta de tratamiento de agua.
3. Evaluar la capacidad nominal y la eficiencia real de los suavizadores.
4. Determinar estequiométricamente la capacidad de cada suavizador según la cantidad de resina actual de cada uno.
5. Calcular la demanda de agua que tiene la planta.
6. Estimar la dureza máxima permisible en las condiciones actuales que garantice la demanda de agua tratada.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

Introducción

En el capítulo se hace referencia al uso del agua como materia prima para la generación de vapor, las principales impurezas a eliminar para su uso, las consecuencias que trae para las calderas el uso de agua no tratada, los principales métodos de tratamiento de agua usados en el mundo y los principales productores y suministradores de resina en el mundo actualmente.

1.1 Tratamiento de aguas

Tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales. La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final (Yang *et al.*, 2007).

1.1.1 El agua como materia prima para la generación de vapor

Debido a que el agua puede ser convertida en vapor a temperaturas convenientes es ideal para generar potencia. Sin embargo, el agua pura no se encuentra disponible en la naturaleza. Todas las agua naturales contienen varios tipos y cantidades de impurezas. Las impurezas encontradas en el agua pueden dividirse en: (Bennett, 2009)

- Sólidos disueltos.
- Gases disueltos.
- Materia suspendida.
- Microorganismos

Según Kumari *et al.*, (2015), las calderas, independientemente de su forma y tamaño, usan generalmente agua para producir vapor o agua caliente, que es luego empleada en la industria en una gran variedad de operaciones como generación de energía eléctrica, calentamiento, secado, elevación de la presión y muchos otros procesos físicos y químicos. La presión y

el diseño de la caldera, calidad requerida del vapor y condensado, así como las impurezas del agua determinan tanto los tratamientos previos y como los posteriores de esta. Los principales objetivos del acondicionamiento del agua de caldera son la prevención de los siguientes problemas, para asegurar el mantenimiento de la eficiencia:

- Incrustaciones
- Corrosión en la caldera
- Contaminación del vapor
- Corrosión del sistema de condensado

Existen tres vías para mantener bajo control los problemas que hemos mencionado, estos son:

Pretratamiento del agua: Entre estos se pueden tener tratamientos de precipitación (clarificación, floculación), filtración (arena, membranas), suavización con cal o resinas, desmineralización (resinas, ósmosis inversa), aireación, y otros. Se realizan con el fin de eliminar o reducir las impurezas del agua como minerales, gases y sólidos suspendidos.

Tratamiento interno de la caldera: Se utilizan en este caso productos químicos naturales y sintéticos secuestrantes, quelatantes, dispersantes, surfactantes, inhibidores de corrosión e inhibidores de incrustaciones como fosfatos, quelatos, polímeros, soda, aminas y secuestradores de oxígeno. Todos con el fin de evitar o controlar las incrustaciones, depósitos, corrosión a la caldera y al sistema de condensado, así como evitar el arrastre de contaminantes al vapor.

Control de purga: Es el método básico de control de impurezas sólidas y disueltas, así como de la concentración de productos químicos en el agua de la caldera. De esta forma se ayuda a evitar depósitos y arrastre en el vapor.

1.1.2 Fuentes de agua

Las fuentes de agua corresponden a toda aquella agua (ríos, lagos y océanos), que no ha recibido ningún tipo de tratamiento y por lo tanto contienen impurezas, adquiridas durante el ciclo al que han sido sometidas, que impiden su utilización directa en una caldera. Las impurezas encontradas con mayor frecuencia en las fuentes de agua, figuran las siguientes:

los sólidos en suspensión, líquidos no mezclables con agua (ej. aceite), colorantes, bacterias y otros microorganismos, sustancias semi-coloidales, gases disueltos, sales minerales disueltas (cationes, aniones y sílice) (Kremer *et al.*, 2011). A continuación, se detallan los diferentes tipos de impurezas encontradas comúnmente en aguas naturales y que más interesan desde el punto de vista de control y tratamiento de un agua de caldera:

- Sólidos disueltos y suspendidos: Corresponden a sales minerales solubles, procedentes de las rocas con las cuales ha estado en contacto el agua. Los sólidos disueltos abarcan una amplia gama de compuestos minerales que son capaces de disociarse a sus formas iónicas. Se encuentran en el seno del agua y no pueden separarse por medios mecánicos. Pueden presentarse también en forma molecular como sílice (Younos *et al.*, 2009).
- Sales de dureza: Se denomina dureza al contenido de calcio y magnesio presente en el agua. Todos los cationes, excepto el sodio y el potasio, también producen dureza, pero generalmente su presencia es tan pequeña que siempre son ignorados como tal. Las sales de calcio y magnesio son altamente insolubles a altas temperaturas y alcalinidades, formando depósitos minerales sobre las superficies de intercambio de calor, que ocasionan puntos calientes y posterior ruptura de los tubos, por lo que deben ser eliminadas. Su concentración se indica usualmente en partes por millón (ppm) de carbonato de calcio. Los iones de calcio y magnesio pueden estar asociados a iones carbonatos y bicarbonatos en cuyo caso se denominan dureza temporal o asociados a iones sulfato y cloruros, denominándose entonces dureza permanente. El tipo de dureza en un agua natural dependerá de su procedencia (Karlsson, 2017).
- Sílice: Se encuentra siempre en dos formas: no reactiva (coloidal) y reactiva (disuelta), ésta clasificación discrimina si se halla en disolución o suspendida y se determina a través de la reacción positiva ante un reactivo como molibdato de amonio. En la forma no reactiva o en suspensión, esta se halla en una forma muy finamente dividida; en este caso se elimina por una efectiva coagulación y filtración. Sin embargo, la sílice reactiva es más difícil de eliminar y es en esta forma que puede ocasionar la formación de incrustaciones, si no es controlada adecuadamente. En ausencia de alcalinidad, forma incrustaciones muy fuertes que sólo pueden ser eliminadas por medios mecánicos, áci-

do fluorhídrico u otros compuestos del flúor: La solubilidad de la sílice aumenta con la alcalinidad (Ramírez *et al.*, 2007).

- Hierro: Rara vez se encuentran en las aguas superficiales, ya que en su forma soluble (Fe^{2+} (ac)) sólo se encuentra en aguas exentas de oxígeno disuelto. Por lo tanto, es más frecuente en las aguas de pozos, debido a los estratos por los que ha pasado. Cuando pasa de su forma ferrosa a férrica por acción de un agente oxidante forma depósitos voluminosos, los cuales ocasionan taponamientos y son altamente aislantes. La presencia de oxígeno promueve la oxidación del ion ferroso a ion férrico, el cual precipita como hidróxido a un pH superior a 4,5 (Kritzberg *et al.*, 2012). El hierro en aguas industriales genera incrustaciones en el interior de la maquinaria y las tuberías de uso industrial, produciendo en éstas obstrucciones. Esto hace que se restrinja el flujo de agua dentro de las tuberías. Como consecuencia de lo anterior las bombas encargadas de mantener un flujo de agua hacia los procesos tienen un mayor desgaste y utilizan más energía. Otra consecuencia del hierro en las aguas de uso industrial es el deterioro de la maquinaria utilizada en los diferentes procesos de producción. Además, puede hacer que el pH de estas aguas se disminuya. Estas variaciones de pH pueden causar problemas en los diferentes equipos utilizados en los procesos de producción y en el producto final. En las industrias que utilicen calderas, la presencia de óxidos de hierro ocasiona una mala transmisión del calor y un potencial para la ruptura de los tubos de la misma debido a las elevadas temperaturas que en esta unidad se manejan (Duarte *et al.*, 2015).
- Manganeso: El Manganeso, al igual que el hierro, sólo se encuentra en aguas subterráneas, aunque con mucha menor frecuencia. Su tendencia a oxidarse y precipitar como dióxido de manganeso (CDW, 2016).
- Cloruros: Son compuestos altamente solubles y abundantes en las aguas naturales. Los problemas que ocasionan están principalmente relacionados con la corrosión, ya sea en el agua o debajo de depósito (Mullaney *et al.*, 2009).
- Sulfatos: Son altamente solubles, pero el CaSO_4 (s), puede formar incrustaciones cuando su solubilidad es excedida. También son corrosivos (Feely *et al.*, 2008).
- Material suspendido: Formado principalmente por arcillas y polvo, casi siempre, en pequeñas partículas de un tamaño tal que no sedimentan rápidamente. A estas se le de-

nominan coloides y su presencia está asociada al ensuciamiento con todas las consecuencias de obstrucción, corrosión y aislamiento (Feely *et al.*, 2008).

- Oxígeno: La atmósfera (21% O₂) es la fuente de este gas, el cual tiene una solubilidad de hasta 9 ppm a temperatura ambiente y presión atmosférica. Su presencia en el agua es el factor determinante en muchos procesos de corrosión de componentes metálicos. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión (Steinle *et al.*, 2017).
- Dióxido de carbono: Si bien está presente en la atmósfera a bajas concentraciones (0,03 – 0,06 %) es altamente soluble: hasta 3 000 ppm. El dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno. La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El CO₂ (g) al disolverse en el agua produce ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal (Cichowicz *et al.*, 2016).
- acidez: El pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH) (Feely *et al.*, 2008).
- Aceite: El aceite en las calderas constituye una situación peligrosa. El aceite es un excelente aislante del calor y su presencia sobre las superficies expuestas a altas temperaturas puede producir serios sobrecalentamientos y daños a la caldera, además, favorece la formación de espuma y como consecuencia el arrastre al vapor (Guanche, 2016).
- Alcalinidad: Representa la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que, representa una fuente potencial de depósitos (Feely *et al.*, 2009).

1.2 Problemas más frecuentes en las calderas al utilizar agua no tratada

Según Chávez *et al.*, (2004), la utilización de un agua sin el apropiado tratamiento previo en el ciclo de la planta puede provocar graves consecuencias, de las cuales las más importantes son:

- Las incrustaciones en los tubos de las calderas
- La corrosión de las superficies metálicas de las calderas, calentadores y tuberías.
- El arrastre de partículas sólidas o líquidas.
- La cristalización en las costuras y juntas de domos y tubos de las calderas.

A continuación se describen los problemas, encontrados con mayor frecuencia en las calderas, al no tratarse adecuadamente el agua de alimentación a estas.

- **Incrustaciones**

Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido una excesiva concentración de estos componentes en el agua de alimentación y/o regímenes de purga insuficientes. La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden soltar las incrustaciones, por lo que deben ser eliminadas de una caldera muy incrustada para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión.

En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tornarse aún más grave. La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico, provocando problemas de refrigeración de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento. A medida que aumenta el espesor de la capa de incrustaciones, para un mismo flujo de calor, aumenta la temperatura del metal. La formación de incrustaciones en una caldera puede ser prevenida, satisfaciendo los requerimientos del agua de alimentación y agua de la caldera, tratando el agua de alimentación y manteniendo adecuados regímenes de purga (Kumari *et al.*, 2015).

- **Corrosión**

Las principales fuentes de corrosión en calderas son la Corrosión por Oxígeno y la Corrosión Cáustica. A continuación se describe en que consiste cada uno de estos tipos de corrosión, cuáles son los factores que la favorecen, que aspecto tiene y de qué manera pueden ser prevenidas.

Corrosión por Oxígeno: La corrosión por oxígeno consiste en la reacción del oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera (en contacto con el agua), provocando su disolución o conversión en óxidos insolubles. Los resultados de este tipo de corrosión

son tubérculos de color negro, los que se forman sobre la zona de corrosión. La corrosión de tipo oxígeno se evita: (1) externamente mediante el uso de desaireadores y (2) químicamente mediante la utilización de productos químicos que se apoderan del oxígeno. Los productos químicos usados normalmente para este propósito son el sulfito sódico, la hidracina y la hidracina catalizada (Seo *et al.*, 2015).

Dado que la corrosión por oxígeno se produce por la acción del oxígeno disuelto en el agua, esta puede producirse también cuando la caldera se encuentra fuera de servicio e ingresa aire (oxígeno). La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y la mantención de un exceso de secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera (Kumar, 2017).

Corrosión cáustica: La corrosión cáustica se produce por una sobreconcentración local en zonas de elevadas cargas térmicas (fogón y cámara trasera) de sales alcalinas como la soda cáustica. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes a la corrosión por oxígeno rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica (fogón, placa trasera y cámara trasera) de una caldera. La corrosión cáustica puede ser prevenida manteniendo la alcalinidad, OH libre y pH del agua de la caldera dentro de los límites recomendados (Bamkiewicz, 2012).

- **Corrosión Líneas Retorno Condensado**

Las líneas de retorno de condensado, lógicamente no forman parte de una caldera, sin embargo, su corrosión tiene efectos sobre las calderas y puede ser prevenida con el tratamiento de agua. La corrosión de las líneas de retorno de condensado tiene efectos sobre una caldera, ya que, los óxidos (hematita) producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación. La corrosión en las líneas de retorno de condensado se produce por la acción del ácido carbónico que en éstas se forma. La prevención de la corrosión en las líneas de retorno de condensado, puede ser conseguida mediante aminas neutralizantes que neutralizan la acción del ácido carbónico y aminas fílmicas que protegen las líneas. Estas aminas son volátiles por lo que, al ser dosificadas a las líneas de alimentación de agua, son arrastradas por el vapor producido en la caldera (Chávez *et al.*, 2004).

- **Arrastre de Condensado**

Según Correa *et al.*, (2008), el arrastre de condensado en una caldera tiene relación con el suministro de vapor húmedo (con gotas de agua). El suministro de vapor húmedo puede te-

ner relación con deficiencias mecánicas y químicas. Las deficiencias mecánicas tienen relación con la operación con elevados niveles de agua, deficiencias de los separadores de gota, sobrecargas térmicas, variaciones bruscas en los consumos, etc. Por otro lado las deficiencias químicas tienen relación con el tratamiento de agua de la caldera, específicamente con excesivos contenidos de alcalinidad, sólidos totales (disueltos y en suspensión) y sílice, que favorecen la formación de espuma. Para prevenir el arrastre debido a deficiencias en el tratamiento de agua, se recomienda mantener los siguientes límites de los contenidos de alcalinidad, sólidos totales y sílice:

Alcalinidad total (CaCO_3 (s)) < 700 ppm

Contenido de sílice (SiO_2 (s)) < 150 ppm

Sólidos disueltos < 3 500 ppm

1.3 Metodologías de tratamiento de aguas

El tratamiento del agua varía según las necesidades de cada instalación en particular y se pueden utilizar varios procesos para mejorar su calidad, entre los que se incluyen:

- Ablandamiento mediante cal y bicarbonato de sodio
- Desionización
- Destilación por membranas
- Electrodialisis
- Ultra filtración
- Descarbonatación
- Ósmosis inversa
- Intercambio de iones
- Intercambio de iones sodio

Ablandamiento mediante cal y bicarbonato de sodio

En la práctica el proceso de ablandamiento por precipitación química se realiza en tanques o reactores. En éste tipo de reactor el agua a tratar entra por la parte inferior del tanque a un compartimiento donde una propela a alta velocidad agita y mezcla el agua con los reactivos químicos (cal y carbonato de sodio) que se inyectan en forma de solución a través de otra línea hidráulica. El precipitado que se forma pasa a una segunda sección del tanque-reactor y

los lodos producidos, que son principalmente carbonato de calcio e hidróxido de magnesio, sedimentan al fondo del tanque de donde son extraídos a través de una tubería y procesados como desecho sólido. El efluente o agua suavizada se colecta a través de las canaletas dispuestas en la parte superior del tanque para enviarlas al siguiente paso de tratamiento (Feely *et al.*, 2008).

Desionización

La desionización es un proceso físico que utiliza resinas de intercambio iónico en el que se sustituyen las sales y minerales en el agua. En el agua los elementos más pequeños son las sales, por lo que requiere un tratamiento poco convencional, la desionización produce un agua de alta pureza que es generalmente similar a la del agua destilada (Ribeiro *et al.* 2015).

Destilación por membranas

La destilación por membranas consiste en un proceso térmico en el que únicamente las moléculas de vapor pueden pasar a través de la membrana, la cual es hidrofóbica. El alimento que se ha de tratar está en contacto directo con una de las superficies de la membrana pero no penetra a través de los poros de la membrana al ser ésta hidrofóbica. La fuerza impulsora para la separación es la presión de vapor a través de la membrana, y no la presión total como ocurre con la ósmosis inversa. Al aumentar la temperatura del alimento aumenta la presión de vapor y, por tanto, también aumenta el gradiente de la presión de vapor que es la fuerza impulsora (Gray, 2015).

Electrodialisis

La electrodialisis es una tecnología que permite, bajo la influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias ionizadas disueltas en una disolución acuosa a través de membranas selectivas de intercambio iónico. Es un proceso de separación comercialmente usado a gran escala para la producción de agua potable de cuerpos de agua y el tratamiento de corrientes de desagüe industriales, además es ampliamente usado en el proceso de desalación y la recuperación de materias útiles de corrientes de agua (Chang and *et al.*, 2009). La eficiencia de estos sistemas consiste en una gran parte en las propiedades de las membranas de intercambio de iones. La suciedad de las membranas de intercambio de iones es uno de los pro-

blemas comunes en el proceso de electrodiálisis (Lee and *et al.*, 2009; Ruiz and *et al.*, 2007). Hay varios métodos de limpieza, incluyendo métodos físicos y químicos. La selección del producto químico a ser aplicado para la limpieza de la membrana depende del tipo de membrana, la intensidad de la polución y los contaminantes. Los productos químicos que usualmente se recomiendan por los fabricantes de las membranas son; los ácidos débiles y fuertes, el álcali (NaOH), los detergentes, el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), y las enzimas (Oztekin *et al.*, 2016).

Ultrafiltración

Se trata de un proceso de filtración de membrana que se eliminan sólidos suspendidos, bacterias, virus, endotoxinas y más para producir agua de alta pureza con una baja densidad de sedimentos. Pueden retener partículas de 0,001 – 0,1 μm en un fluido. Las membranas de ultrafiltración son más cerradas que microfiltración pero más abiertas que la nanofiltración y ósmosis inversa. Utiliza baja presión para forzar el fluido a través de la membrana que resulta en menores costos de operación. Además, es muy eficaz como tratamiento previo a la ósmosis inversa. Las membranas tienen una vida mucho mayor que las de ósmosis inversa porque tienen un sistema de auto-limpieza mediante un retrolavado. (Ming *et al.*, 2015; Knappett *et al.*, 2011).

Descarbonatación

La descarbonatación del agua es una tecnología que se utiliza en la industria para eliminar la dureza del agua y evitar incrustaciones calcáreas. Se realiza normalmente con una resina catiónica débil que elimina los iones calcio y magnesio intercambiándolos por hidrogeniones. El hidrogenión se combina con los bicarbonatos presentes para formar dióxido de carbono, que se elimina, posteriormente, en una torre desgacificadora o mediante tecnología de membranas. El intercambio iónico se realiza hasta que el bicarbonato presente se ha convertido en CO_2 (g). A partir de este momento el H^+ que se libera ya no se neutraliza, con lo cual se produce un descenso del valor del pH del agua y la resina pierde su capacidad de intercambio (Schubert *et al.*, 2000). Una vez agotada, la resina se regenera con un ácido mineral. Los descarbonatadores se diseñan específicamente para cada caso concreto, considerando el análisis del agua y el consumo requerido (Lorrain *et al.*, 2003).

Ósmosis inversa

La ósmosis es el movimiento de moléculas a través de una membrana parcialmente permeable porosa, que va de una región de mayor concentración a otra de menor, en esta acción la membrana tiende a igualar las concentraciones en los dos lados. Este flujo de partículas disueltas hacia la zona de menor potencial se conoce como presión osmótica medible en términos de presión atmosférica. Si utilizamos una presión superior a la presión osmótica, un efecto contrario a la ósmosis se puede lograr, al presionar fluidos a través de la membrana y sólo las moléculas de menor peso pasan del otro lado (Andrade *et al.*, 2017).

En el tratamiento de agua los sólidos disueltos al generar esta presión quedan retenidos en la membrana y sólo pasa el agua, a esto se le llama ósmosis inversa. Para lograr este efecto del paso del agua es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica. Las membranas de ósmosis inversa tienen la característica de hacer una limpieza continua mientras trabajan, porque de no ser así, sufrirían una acumulación de contaminantes y una saturación en poco tiempo, por lo que parte del flujo de agua entrada arrastra las contaminantes sales y minerales. A esto se le conoce como agua de rechazo, que comúnmente es 40% de agua producto y 60% de agua de rechazo, en equipos con agua de calidad relativamente buena, puede ser 50% / 50% o en aguas con sólidos disueltos totales (TDS) bajos hasta 60% / 40% (Garud *et al.*, 2011).

Una membrana de ósmosis inversa en un equipo correctamente diseñado, la duración puede ser entre 3 a 5 años. Es importante hacer los mantenimientos periódicos con químicos para limpieza de membranas, siguiendo los consejos del fabricante. En aguas con concentraciones altas de sólidos disueltos, dureza o presencia de sílice es recomendable dosificar un anti-incrustante mediante una bomba, también es importante el pre-tratamiento que incorpora el equipo: eliminación de partículas en suspensión mediante cartuchos de sedimentos o equipos de lecho profundo y equipos de carbones activados y suavizadores, si es necesario (Andrade *et al.*, 2017; Garud *et al.*, 2011).

Intercambio de iones

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido (Nevárez 2009; Pérez *et al.*, 2006). En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados

por iones de igual carga de un fluido (Choi, 2002). Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H^+) y/o el ion hidroxilo (OH^-) respectivamente (Manahan, 2007).

Las reacciones de intercambio iónico dependen de factores tales como: 1) temperatura: los cambios bruscos de ésta pueden provocar variaciones de las condiciones hidráulicas y en la cinética de las reacciones; si éstos se producen, se deben efectuar ajustes de los flujos y a temperaturas bajas se pueden originar caídas de presión; 2) la concentración de la especie en solución: puesto que a una mayor concentración en la solución de entrada se presentará una saturación más temprana, que a una concentración de solución de entrada menor; 3) naturaleza del ion: esto debido a que algunos intercambiadores de iones presentan una mayor selectividad hacia iones específicos; 4) pH: este factor afectará la reacción de intercambio dependiendo del tipo de intercambiador; si éste es fuerte, operará a cualquier pH, pero si es débil, solo ocurrirá el intercambio con un pH específico (Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

En el contexto de purificación, intercambio de ion es un proceso rápido y reversible en el cual los iones impuros presentes en el agua son reemplazados por iones que despiden una resina de intercambio de iones. Los iones impuros son tomados por la resina que debe ser regenerada periódicamente para restaurarla a su forma iónica original. (Un ion es un átomo o grupo de átomos con una carga eléctrica. Los iones con carga positiva se llaman cationes y son generalmente metales, los iones con carga negativa se llaman aniones y son generalmente no metales) (Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, 2009).

Los siguientes iones son generalmente encontrados en aguas crudas:

Cationes

Calcio (Ca^{2+})

Magnesio (Mg^{2+})

Sodio (Na^+)

Potasio (K^+)

Hierro (Fe^{2+})

Aniones

Cloruro (Cl^-)

Bicarbonato (HCO_3^-)

Nitrato (NO_3^-)

Carbonato (CO_3^{2-})

Sulfato (SO_4^{2-})

Intercambio de iones sodio

Este tratamiento consiste del paso del agua a través de una cama o lecho de resina sintética, que tiene en su superficie iones sodio que están dispuestos a intercambiarse por otro catión que tienen mayor afinidad por los grupos funcionales de la resina, como lo es el calcio Ca^{+2} y el magnesio Mg^{+2} . Una vez que la resina se satura y no tiene más sitios disponibles para intercambio, ésta se regenera y el ciclo se inicia nuevamente (Goutham R. *et al.*, 2017).

1.4 Resinas de intercambio iónico

Son pequeñas sustancias granuladas o esféricas insolubles en agua, compuestas por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante (Grágeda y Grágeda, 2006). Reaccionan como ácidos, bases o sales, pero tienen la peculiaridad de tener sólo cationes o aniones con la habilidad de tomar parte de la reacción química por su capacidad de migración (Nevárez, 2009).

Como la concentración de grupos polares en la resina es un número finito, éstas tienen una capacidad definida de intercambio. La ventaja de las resinas de intercambio iónico es que tienen habilidad para recuperar la capacidad original mediante el tratamiento con una solución que puede ser ácido, base o sal (según la resina y el uso) que desplace los iones retenidos por la resina y los remplace por iones deseados. Este procedimiento se llama regeneración y se realiza cuando la resina agota su capacidad, permitiendo de ésta manera utilizar la resina una y otra vez (Nevárez, 2009).

Las resinas sintéticas de intercambio iónico son pequeñas sustancias granuladas e insolubles que consisten en una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante y con grupos inorgánicos que actúan como grupos funcionales; el entrecruzamiento confiere a la resina estabilidad y resistencia mecánica, así como insolubilidad. El grado de entrecruzamiento es un factor importante de controlar ya que no sólo determina las propiedades mecánicas de la resina sino también su capacidad de hincharse (*swelling*) y de absorber agua. El hinchado del polímero se produce cuando el disolvente penetra en los poros de la estructura polimérica, ensanchándolos y abriendo la estructura. El proceso de hinchamiento favorece la permeabilidad de iones en la matriz de la resina y mejora la accesibilidad a los grupos funcio-

nales (Grágeda y Grágeda, 2006). Actualmente se realizan investigaciones para el desarrollo de nuevas resinas poliméricas de intercambio iónico ya que en el futuro éstas serán de gran utilidad e importancia en el tratamiento de agua para consumo humano, en aplicaciones industriales y medio ambiente (Pérez *et al*, 2006).

1.4.1 Tipos Según su Estructura de Red

- Microporosas o Tipo Gel

Son resinas convencionales originadas a partir de la polimerización del divinilbenceno y el estireno. Los grupos de intercambio están distribuidos estadísticamente en la partícula, es muy difícil describir la porosidad ya que la distancia entre los enlaces cruzados y las cadenas varía considerablemente (CIDI, 1999; FECYT, 2001).

- Macroporosas o Macroreticulares

Son resinas formadas por el polímero de poliestireno y divinilbenceno, como las de tipo gel, pero su apariencia es diferente a las de gel (CIDI, 1999) ya que durante la síntesis de esta resina se utiliza un co-solvente que actúa interponiéndose entre las cadenas poliméricas creando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las de tipo gel siendo mayor la capacidad de intercambio favoreciendo la difusión de los iones y mejorando por lo tanto la cinética de intercambio (Grágeda y Grágeda, 2006; FECYT, 2001).

- Isoporosas

Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red; son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y un costo más bajo que las resinas macroporosas (Grágeda y Grajeda, 2006; FECYT, 2001).

1.4.2 Tipos según su grupo funcional

- Resinas Catiónicas de Ácido Fuerte

Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico, el grupo funcional es el ácido sulfónico ($-\text{SO}_3\text{H}$) que es altamente ionizable, intercambian iones positivos (cationes). Estas resinas operan a cualquier pH (Nevárez, 2009), requiere de excesivas cantidades de regenerante y es la resina más utilizada (CIDI, 1999).

- Resinas Catiónicas de Ácido Débil

El grupo funcional es un ácido carboxílico (COOH) presente en uno de los componentes del copolímero principalmente el ácido acrílico o metacrílico. Son resinas altamente eficientes (CIDI, 1999), tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos, elevado hinchamiento y contracción lo que hace aumentar las pérdidas de carga o provocar roturas en la columna cuando no cuentan con suficiente espacio en su interior. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo.

Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico. Los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados (Nevárez, 2009).

- Resinas Aniónicas de Base Fuerte

Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno clorometilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, (R₄N⁺). Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa (Anaya, 2014).

- Resinas Aniónicas de Base Débil

Resinas funcionalizadas con grupos de amina primaria (-NH₂), secundaria (-NHR) y terciaria (-NR₂). Suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad pero su cinética es lenta. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración, no se puede utilizar a pH altos, pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento, deben ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio, fijan los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, pero no los aniones débiles del ácido carbónico (H₂CO₃), ni del ácido silícico (H₂SiO₃) (Nevárez, 2009).

- Resinas Quelatantes

En estas resinas el grupo funcional tiene las propiedades de un reactivo específico ya que forman quelatos selectivamente con algunos iones metálicos. Los átomos más frecuentes son azufre, nitrógeno, oxígeno y fósforo que forman enlaces de coordinación con los metales. Son

poco utilizadas en la industria por ser más caras que las anteriores y por tener una cinética de absorción más lenta (Grágeda y Grágeda, 2006; FECYT, 2001).

1.4.3 Propiedades

- Tamaño de partícula

Para uso industrial el tamaño de partícula de las esferas de resina resulta de la relación entre la velocidad de intercambio (la cual es mayor con partículas pequeñas) y la tasa de flujo (la cual requiere partículas grandes para tener menores pérdidas de presión). El tamaño estándar varía entre partículas con un diámetro entre 0,3 y 1,2 mm, pero se pueden conseguir tamaños menores o mayores según la necesidad del uso (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

- Solubilidad

El intercambio iónico de sustancias puede ser soluble bajo operación normal. Todas las resinas intercambiadoras usadas actualmente son poliácidas o polibases de alto peso molecular que son virtualmente insolubles, pero después de ciertas temperaturas se solubilizan (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

- Forma

La forma de los gránulos esféricos debe tener máxima homogeneidad y dimensión uniformes, tal que el fluido en la filtración permanezca aceptable (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

- Densidad

Esta es una propiedad muy importante en las resinas. Existen varios tipos de densidad, la más representativa es la densidad húmeda y varía de 1.02 a 1.38 según el tipo de resina (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

- Caída de Presión

La caída de presión es muy importante en el diseño de equipos. Esta relaciona el tamaño, forma, uniformidad y compresibilidad de las partículas, la viscosidad de la solución, temperatura y tasa de flujo utilizada (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

- Resistencia a la Fractura

La expansión y contracción de la resina durante el agotamiento y la regeneración no sería causa para que se revienten los gránulos. El diseño de aparatos de intercambio iónico debe también estar dirigido a la expansión, a evitar excesiva tensión o abrasión mecánica de la resina. El agua a ser ionizada por resinas de intercambio iónico debe estar libre de material

suspendido y coloidal ya que pueden obstruir la resina, disminuir el flujo e intercambio, así como también el tiempo de vida (CIDI, 1999; Nevárez, 2009).

1.4.4 Estabilidad

Al deteriorarse una resina se va perdiendo la estabilidad. El deterioro se manifiesta en diferentes formas cada una de ellas es independiente o relacionada con otros factores; bajo condiciones normales. El deterioro puede ser de naturaleza química y se manifiesta en una pérdida gradual de su capacidad de intercambio (CIDI, 1999, Nevárez 2009). El siguiente listado muestra las formas de deterioro:

- Ruptura de las partículas de la resina.
- Despolimerización de la resina y consecuentemente hinchamiento.
- Disminución de la capacidad total.
- Daño de los grupos funcionales.
- Ensuciamiento por precipitación de elementos extraños sobre la partícula del intercambiador.

1.4.5 Selectividad

Una consideración importante al determinar la posibilidad de una reacción de intercambio iónico, es la preferencia observada de ciertas resinas por ciertos iones que poseen unas características de carga similares; el que un equilibrio sea favorable para un sistema iónico determinado depende mayormente de la selectividad de la resina.

Actualmente se conocen las razones de las selectividades de las resinas; en general, la selectividad depende de la carga y el tamaño de los iones. La influencia más importante es la magnitud de la carga del ion ya que una resina prefiere contraiones de elevada valencia. Así, para una serie de aniones típicos encontrados en los tratamientos de agua podrían esperarse el orden de preferencia siguiente: $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$. De una forma similar para una serie de cationes: $\text{Th}^{4+} > \text{Nd}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ (Weber, 2003).

Un segundo factor que influye en la selectividad iónica es la presión de hinchamiento de la resina. En un disolvente polar como el agua los grupos activos de la resina y los iones móviles en las fases resina y disolución tienden a solvatare. La solvatación o hidratación de los iones ejerce una presión de hinchamiento dentro de la resina, ésta presión esta incrementada por

las fuerzas de repulsión entre los grupos iónicos fijos y está contrarrestada por los enlaces de reticulación que unen a la partícula.

Para una resina y solución electrolítica en agua el radio de solvatación influye en las variables que afectan a la presión con el resultado de que las resinas prefieren los iones con menor radio de solvatación. En general los iones multivalentes hidratados son adsorbidos con prioridad debido a que su tamaño es inferior al de una unidad cargada equivalente de iones de menor carga. En una serie iónica de igual carga el ion con menor radio en la fase en disolución ocupa el primer lugar de la serie.

A continuación se da el orden de preferencia para los metales alcalinos: $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ y para los alcalinotérreos: $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$. Se observa que para cada serie la preferencia aumenta con el número atómico y el radio iónico y disminuye con el radio de solvatación. De forma similar, para una serie aniónica monovalente se obtiene: $\text{CNS}^- > \text{ClO}_4^- > \text{I}^- > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > \text{CN}^- > \text{HSO}_4^- > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CH}_3\text{COO}^- > \text{OH}^- > \text{F}^-$ (Weber, 2003).

El tercer factor que influye en la selectividad es la interacción iónica dentro de la resina y en el volumen de la disolución. La resina prefiere como regla general los contraiones que presentan mayor afinidad para los grupos iónicos fijos; la resina adsorberá con prioridad los iones que pueden formar precipitados o complejos con los grupos iónicos de la resina.

El último factor significativo en la selectividad iónica es la acción tamizadora o de filtración. Los iones orgánicos y complejos inorgánicos son en su mayoría demasiado grandes para penetrar la matriz de la resina. Este efecto es mucho más pronunciado para resinas que tengan un grado elevado de reticulación; de hecho, el grado de reticulación influye en la selectividad de la resina. Cuanto mayor sea el grado de reticulación mayor es la selectividad de una resina para un ión por encima de otro, cuando la reticulación disminuye el efecto de éste factor disminuye llegando a ser despreciable (Weber, 2003).

1.4.6 Regeneración de las resinas de intercambio iónico

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión

móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Para la regeneración de las resinas de intercambio iónico se usa:

- Sal común (cloruro de sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes.
- Ácido clorhídrico o ácido sulfúrico (depende del costo y de la eficiencia): para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles.
- Hidróxido de sodio o hidróxido de amonio: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles.

Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico. Para realizar la regeneración de lechos intercambiadores de iones existen dos tipos de sistema: Regeneración co-corriente o regeneración contra corriente. En la regeneración co-corriente se hace pasar la solución regenerante en el mismo sentido de flujo que el agua a tratar, en cambio, para el sistema a contra corriente el sentido de flujo de la regeneración es contraria al del agua a tratar. Independientemente del sistema de regeneración a utilizar, siempre es necesario mantener el lecho en condiciones compactas; el manto compacto asegura un contacto mejor entre éste y el líquido, lo que facilita y promueve el intercambio de iones (Duarte *et al.*, 2015).

Según Duarte *et al.*, (2015), la regeneración en contracorriente tiene diversas ventajas sobre la regeneración a co-corriente, las cuales se mencionan a continuación:

- Los iones eludidos en el curso de la regeneración no tienen la posibilidad de fijarse nuevamente en el medio intercambiador, por lo cual se regenera únicamente la capacidad útil del intercambiador de iones, en cambio en la regeneración a co-corriente se debe tomar en cuenta la capacidad total. Esta diferencia se traduce en un mayor rendimiento en la utilización de regenerante en la regeneración a contracorriente.
- Las capas de material intercambiador en la zona de salida, es decir las menos cargadas de iones, reciben un importante exceso de reactivo exento de iones a eliminar; en consecuencia, el nivel de regeneración de estas capas es particularmente alto y permite obtener en el curso del ciclo de fijación una calidad de agua netamente superior a aquella que resulta de una regeneración a co-corriente.

- Simultáneamente con el menor consumo de reactivos, también habrá una necesidad menor de enjuague, y como consecuencia de lo mencionado anteriormente ahorro de agua de servicio.
- El menor consumo de regenerante y agua para los enjuagues se traduce en unos volúmenes menores de efluentes. Adicionalmente, los efluentes tienden a ser autoneutralizantes, con lo que el consumo adicional de reactivos con este propósito es mínimo o nulo.

Resumiendo, la regeneración en contracorriente permite obtener un agua tratada de mejor calidad con un costo operativo menor.

1.4.7 Vida útil de las resinas de intercambio iónico

Según FECYT. (2001), después de una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas de intercambio iónico sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo su capacidad de intercambio. Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos. La mayoría de autores de la especialidad asignan una vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico entre los 5 y los 10 años.

1.4.8 Marcas de resinas utilizadas en el tratamiento del agua

En el mundo se utilizan diferentes tipos y marcas de resina según las características del agua de alimentación, así como lo que se quiera eliminar de la misma según las características del proceso. A continuación se expondrán algunas de las resinas más utilizadas a nivel mundial y sus características principales.

- **Resina Birm**

Birm es un medio eficaz y económico para la reducción de hierro disuelto y los compuestos de manganeso en bruto presentes en el agua. Puede ser usado a gravedad o en los sistemas de agua presurizada. Birm actúa como un catalizador para mejorar la reacción entre oxígeno disuelto y el hierro. Esta reacción produce hidróxido férrico que precipita y puede ser fácilmente

filtrada. Las características físicas de Birm proporcionan un excelente medio filtrante, fácil de limpiar y de retrolavar para eliminar la precipitación.

Birm no tiene un desgaste excesivo en cada retrolavado y, por tanto, ofrece una buena ventaja económica sobre muchos otros métodos de eliminación de hierro. Otras ventajas del Birm; además de su bajo desgaste y larga vida, es eficiente a altas temperaturas, y bajo costo de mantenimiento ya que no requiere productos químicos para su regeneración, sólo el retrolavado periódico es obligatorio. Cuando se utiliza Birm para la eliminación de hierro, es necesario que el agua no contenga aceite o sulfuro de hidrógeno, la materia orgánica no superior a 4-5 ppm, el oxígeno disuelto igual o menor al 15% del contenido de hierro con un pH de 6,8 o más (Birm, 2010).

También puede utilizarse para reducción de manganeso con la misma la fiabilidad que para la eliminación de hierro. En estos la aplicación del agua a ser tratada debe tener un pH de 8.0-9.0 para mejores resultados. Si el agua también contiene hierro, el pH debe ser inferior a 8,5. El pH alto puede causar en la formulación hierro coloidal que es muy difícil filtrar. Todas las demás condiciones siguen siendo las mismas, ya sea para el manganeso o del hierro.

- **Resina Resintech**

Resina catiónica de calidad Premium, alta capacidad, sulfonada, a base de poliestireno, suministrada en forma de perlas esféricas resistentes y uniformes. Altamente recomendada para suavizado de agua, desalcalinización, desionización y otras aplicaciones químicas en general. Muy uniforme tamaño de partículas, bajas caídas de presión. Tamaño de malla 16 a +50; ofreciendo una menor caída de presión mientras se mantiene una cinética superior. Estabilidad física superior, 93% más esfericidad y su alta solidez en conjunto con un tamaño de partícula muy uniforme proporcionan mayor resistencia al rompimiento del lecho. Se puede utilizar en lechos mixtos de desmineralizadores en conjunto con intercambiadores de aniones fuertemente básicos. Ideal para el suavizado de agua en aplicaciones industriales debido a su alta capacidad y buena estabilidad física (Akun water filters, 2016).

- **Resina Purolite**

Fundada en 1981, Purolite es líder en la fabricación de resinas de intercambio iónico, catalizadoras, adsorbentes y especiales. Con sede mundial en los Estados Unidos, Purolite es la única empresa especializada 100% en el desarrollo y fabricación de tecnología de resinas. Ofrece una gran variedad de productos con características que los distinguen entre sí, para su

utilización según su aplicación en las diferentes industrias. Tienen sede en una gran variedad de países alrededor del mundo tales como Alemania, Canadá, China, entre otros, convirtiéndose en una de las más utilizadas en el mundo (Purolite, 2013).

Estas resinas son purificadas especialmente con una alta conversión a la forma regenerada y con un tamaño de partícula estrictamente controlado. La dureza de la perla tiene un promedio de más de 400 gramos en la forma regenerada; todos los productos grado nuclear de Purolite tienen más del 95% de perlas enteras perfectas. Los productos grado nuclear Purolite son utilizados en agua ultra-pura, desechos de radiación, productos farmacéuticos, semiconductores y pulido de condensados. (Novem, 2017).

- **Resina Lewatit**

El Lewatit pertenece al grupo de los intercambiadores de cationes geliformes, fuertemente ácidos, a base de un copolímero de estireno divinilbenceno. El Lewatit se caracteriza por las bolas de diámetro uniforme (granulometría mono dispersa). (Hakan *et al.*, 2013). Sus bolas mono dispersas son excepcionalmente estables química y mecánicamente y altas cargas osmóticas. La favorable cinética conduce a una clara mejoría de la capacidad útil en comparación con las resinas de intercambio iónico equivalentes de granulometría heterogénea (Rafati *et al.*, 2010).

Según Lewatit (2013), Lewatit es especialmente ventajosa para:

- Descalcificación de agua potable, tanto en instalaciones industriales como en filtros de cartuchos.
- Descalcificación de soluciones de productos orgánicos, como por ejemplo azúcar, pectinas y glicerina.

Además, Lewatit confiere a los lechos de los filtros las siguientes características:

- Altas velocidad de intercambio en la regeneración y la carga
- Muy buena utilización de la capacidad total
- Bajo consumo de agua de lavado de desplazamiento y del regenerante.
- Muy buena distribución de los regenerantes, agua, soluciones, formando por ello, una homogénea zona de trabajo.
- Gradiente de pérdida de carga casi lineal sobre toda la altura del lecho, por ello es posible construir aparatos con alturas de lechos mayores.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo 1

1. La utilización de un agua sin el apropiado tratamiento previo puede provocar graves consecuencias en el ciclo de la planta, como las incrustaciones, corrosión y el arrastre de partículas sólidas y líquidas.
2. El intercambio de iones sodio garantiza la eliminación de la dureza del agua, principal objetivo que se busca en el tratamiento del agua para la generación de vapor en la EPEP – Centro.
3. La regeneración de la resina en contracorriente permite obtener un agua tratada de mejor calidad con un costo operativo menor.
4. La resina Lewatit es la más indicada para el tratamiento de agua para generación de vapor en la planta, por sus altas velocidades de intercambio y el bajo consumo de agua de lavado, de desplazamiento y del regenerante.

Capítulo 2: Descripción de la metódica de trabajo empleada

En este capítulo se caracteriza la planta de tratamiento de agua para la generación de vapor en la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP – Centro). Además se describen detalladamente los métodos, técnicas, instrumentos y procedimientos utilizados en la recopilación, procesamiento, análisis e interpretación de los datos.

2.1 Descripción del proceso de tratamiento de agua de pozos profundos

El proceso de producción de la planta de agua comienza en las bombas de pozo profundo, donde se obtiene del manto freático el volumen de agua necesario para el proceso de Tratamiento de Agua y para el Sistema Contra Incendio, estas bombas envían el agua al tanque de 64 m³ el cual la recibe y almacena. De éste con bombas centrífugas se bombea a los suavizadores por la parte superior del mismo distribuyéndose con el difusor de entrada. El agua pasa a través del lecho de resina, eliminando la dureza, durante el suavizamiento se controla la calidad del agua a la salida mediante el método de análisis de valoración con EDTA, éste se hace cada media hora y según necesidades del proceso, el agua suavizada sale a través del difusor de salida por la parte inferior, contabilizándose en el flujómetro el caudal de agua suavizada en el flujómetro y es enviada hacia el tanque de agua tratada de 400 m³ de capacidad.

Del tanque de agua tratada se bombea con 2 bombas Grundfos hacia el desareador, en caso que este fuera de servicio se bombea directo al colector de succión de las bombas de alimentación a calderas. Al desareador también se bombea de forma automática condensado con 2 bombas Grundfos, una trabajando y otra en espera. Este condensado es recuperado de los intercambiadores de la Segunda Etapa de Separación (SES) y la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO), y del Tanque 6. Hoy en día este desareador está fuera de servicio pues se encuentra en mantenimiento, al estar fuera de servicio tampoco se le inyecta sustancias de tratamiento interno de calderas pues utilizando solo esta sustancia no se eliminan el total de gases corrosivos del agua. (Anexo 1). También existen dos unidades de descarbonación en la planta que están fuera de servicio.

2.1.1 Descripción de la operación en los suavizadores

En la planta de tratamiento de agua se cuenta trabajando con dos suavizadores (1 y 3), contienen en su interior la resina intercambiadora de iones de alta capacidad del ciclo sodio y los difusores de entrada y salida del agua. Para la regeneración de esta resina se utiliza la salmuera, la cual se prepara previamente en una piscina. La cantidad de agua suavizada entregada por cada suavizador depende de la dureza total del agua cruda. Si existe variación en esta dureza, varía el rendimiento de los suavizadores. El material regenerativo utilizado es cloruro de sodio (sal común) en granos preparado al 26% (1 140 -1 200 kg/m³), en disolución con agua.

Durante la operación de suavizamiento, el agua entra por la parte superior y atraviesa el lecho de resina permutadora de iones, con la que se pone en contacto produciendo el cambio de los iones calcio y magnesio presentes en el agua cruda, por los iones de sodio presentes en la resina, obteniendo de este modo el agua suavizada, la que fluye por la parte inferior del suavizador hacia el tanque de agua tratada. Cuando la resina agota su capacidad permutadora de iones y el agua comienza a fluir dura, se hace necesario restablecerla. Con este fin se lleva a cabo el proceso de Regeneración el cual consta de las siguientes operaciones:

- Contralavado.
- Inyección de salmuera.
- Desplazamiento.
- Enjuague.

Contralavado: Efectúa un lavado en contracorriente, o sea, de abajo hacia arriba con el fin de que se despegue y remueva la resina, elimine posibles bolsas de aire y limpie de lodos y otras materias que por acción mecánica hayan sido arrastradas. Este contralavado dura hasta que se obtenga un efluente limpio.

Para el contralavado, se abren las válvulas 1, 3 y 5 del suavizador en operación, se cierra el *bypass* y la válvula de descarga de la bomba permanece abierta completamente, permaneciendo cerradas las demás válvulas.

Inyección de Salmuera: Su objetivo es la devolución de las propiedades intercambiadoras a la resina, una vez agotada su capacidad de intercambio. Para esto, se prepara la solución de

salmuera, donde se adicionan los sacos de sal a la piscina y se abren la válvula 9 y 10 para añadir agua, dejándola un tiempo de reposo mínimo de 2 horas.

Para la inyección de la sal al suavizador se chequea el nivel del tanque, se comprueba si la piscina tiene el 26% de concentración de salmuera, midiendo la densidad en el tomamuestras de la piscina, la densidad debe de oscilar entre 1 190 a 1 200 kg/m³. Después se regula su inyección, de 8-15%, midiendo la densidad en el tomamuestras instalado en cada suavizador en la línea de inyección de sal, controlar que oscile entre 1 050 – 1 090 kg/m³. Este proceso de inyección de salmuera dura de 45-60 min. Para esta operación se abren las válvulas 9 y 11 ubicadas en la piscina de sal y las válvulas 4 y 7 del suavizador en operación, permaneciendo cerradas las demás válvulas.

Desplazamiento: El objetivo de este proceso es el desplazamiento de la salmuera contenida en el suavizador una vez terminada la operación de inyección de salmuera. Cuando el agua sale con bajo contenido de sal (bajo sabor salino), la operación se detiene. La operación se debe realizar a la misma velocidad de la inyección de salmuera. Para la misma se mantienen las válvulas en la posición del paso anterior, cerrando sólo la válvula 11.

Enjuague: Consiste en el lavado de la resina para que se eliminen de ella los residuos de cloruros. Durante este paso se realizan frecuentemente análisis de dureza por el método de valoración con EDTA. Cuando ésta tiene 0 ppm (mg/L) de dureza y los cloruros del agua sean iguales a los del agua cruda, la operación se da por terminada, poniendo en servicio el suavizador. Para el enjuague, se abren las válvulas 1, 2 y 7 del suavizador en operación, todas las demás permanecen cerradas.

Etapa de Suavizamiento del Agua Cruda

Cuando concluye la Etapa de Regeneración de la resina se inicia el suavizamiento del agua cruda: para esta operación se abren las válvulas 1, 2, 6 y 8 en el suavizador en operación, y las válvulas F1 y F2 de entrada y salida del flujómetro para contabilizar el flujo de agua suavizada en cada columna suavizadora, así como la válvula de entrada al tanque de agua tratada, si se está efectuando la operación con dos suavizadores este flujo debe ser dividido su valor a la mitad, todas las demás válvulas permanecen cerradas. CUPET (2014). (Ver Anexo 2)

2.1.2 Método de análisis de Dureza

Durante el trabajo del suavizador se efectúan análisis de dureza por el método de valoración con EDTA de la siguiente forma: Se toman 100 ml de la muestra, se le añade 1 o 2 mL de buffer de amonio y una pizca de Eriocromo negro, si toma coloración azul indica que DT = 0 ppm (mg/L), si se torna color rosado indica que DT mayor que 0 ppm (mg/L), donde hay que sacar el suavizador de servicio y realizarle los pasos regenerativos. CUPET (2014).

2.1.3 Caracterización de los equipos y materiales usados en el tratamiento de agua para calderas en la EPEP-Centro

Caracterización de los Suavizadores de intercambio iónico

Los 3 Suavizadores instalados en la Planta de Tratamiento de Agua son modelo M 48. Están fabricados de Acero estructural, revestido con goma resistente al ácido muriático, el espesor del revestimiento está en el orden de 3 a 5 mm. Actualmente en la empresa están funcionando solo dos suavizadores: 1 y 3

Datos principales:

- Diámetro del equipo: 1 220 mm
- Altura total: 2 600 mm aproximadamente
- Diámetro nominal de tuberías: 2 ½ pulgadas
- Altura de resina: 800 – 900 mm
- Flujo de servicio: 30 – 35 m³/h
- Tipo de resina: Lewatit S 1467
- Regenerante: Sal común en granos
- Presión de diseño: 7 kg/cm²
- Peso en operación: 3 600 kg (aproximado)

Caracterización del tipo de resina utilizada en el proceso

Las condiciones de funcionamiento recomendadas por Lewatit (2013) para la resina Lewatit S 1467 se muestra en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Condiciones de funcionamiento recomendadas de la resina Lewatit S 1467.

		Unidades métricas	
Temperatura de trabajo		máx. °C	120
Rango de pH de trabajo			0 – 14
Altura de lecho		min. mm	800
Pérdida de presión específica (15 °C)		aprox. kPa*h/m ²	1.0
Pérdida de presión		máx. kPa	200
Velocidad lineal carga		máx. m/h	-
Velocidad lineal contra lavado (20 °C)		aprox. m/h	10 – 12
Expansión del lecho (20 °C, por m/h)		aprox. % vol.	4
Zona libre contra lavado (externo / interno)		% vol.	60
Regenerante			NaCl
Regeneración a nivel contra corriente	nivel	aprox. g/l	70 – 120
Regeneración Contra corriente	concentración	% en peso	120 – 250
Regeneración a Corriente	nivel	aprox. g/l	5
Velocidad lineal regeneración		aprox. m/h	5
Velocidad lineal lavado		aprox. m/h	4
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	8 -12

Fuente: Lewatit 2013

Piscina de Salmuera

Para la regeneración de esta Resina de Intercambio catiónico fuerte, la planta cuenta con un tanque de salmuera construido de bloques repellados, con dimensiones de: 1.09 m de ancho

por 0.75 m de alto y 4.71 m de largo, con un elemento filtrante de grava de 10 cm de altura para impedir que la sal entre por los agujeros de los tubos.

2.2 Metodología empleada para el tratamiento estadístico

La recolección de datos pertenece al periodo desde el mes de diciembre del 2017 a febrero del 2018, pues la planta de tratamiento de agua con la que se está trabajando en la actualidad en la EPEP – Centro, fue instalada a finales del mes de noviembre del 2017. Se recogieron datos de dureza de agua de entrada de pozos profundos y volumen de agua tratada obtenida en cada columna por suavizamiento. Los datos son recogidos en la empresa diariamente. (Anexo 3). Se estudia estadísticamente a través de la media, desviación estándar, el coeficiente de variación y las cartas de control. Estos métodos definen de forma estadística el funcionamiento normal del proceso para detectar desviaciones significativas.

- Media de la muestra

La media de la muestra se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Ec.2.1}$$

Dónde:

x_i - Valor de la variable x en la medición i

n - Tamaño de la muestra

- Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ec.2.2}$$

Dónde:

\bar{x} - Valor medio de la variable X para n mediciones

Aunque la desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de un conjunto de resultados alrededor del valor medio, no indica la forma de la distribución. Esta puede apreciarse fácilmente mediante un histograma; cuando es normal se muestran las medidas distribuidas de forma casi simétrica en torno a la media, con las medidas agrupadas hacia el centro (Montgomery, 2004).

- Coeficiente de variación

Según (Montgomery, 2004), el coeficiente de variación (CV) es otra medida de la variabilidad extensamente utilizada, también conocido como la desviación estándar relativa (DER). Se recomienda que sea menor que un 12%. Está definida por la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad \text{Ec.2.3}$$

- Cartas de control

Las cartas de control no son más que un gráfico cronológico de una variable que permite saber si se encuentra dentro de los límites del proceso apoyándose en experiencias pasadas. Su utilización eficaz permite la detección oportuna de desviaciones anormales en el proceso, así como la prevención de futuros problemas. Existen dos tipos, las Cartas de Media y las Cartas de Rango. La correcta aplicación de esta herramienta aumenta la eficiencia y la productividad del trabajo. (Montgomery, 2004).

2.2.1 Pruebas de Normalidad

Para determinar la existencia de una distribución normal se requiere del análisis de varias pruebas a desarrollar. Para la demostración de la distribución normal de la dureza total en las aguas de los pozos, y los volúmenes de agua suavizada obtenidos por cada suavizador, se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

Prueba 1

Se analizan los valores de los coeficientes de Kurtosis y Skewness los cuales debe estar dentro de un rango de -2 a 2 para considerar dicho caso con una distribución normal.

Prueba 2

Comparación entre el valor de la probabilidad y el error permisible. La condición necesaria para plantear la existencia de la distribución normal es que el valor de la probabilidad de los coeficientes de Skewness y Kurtosis debe ser mayor que el nivel de significación (α). En este caso Statgraphic predetermina un nivel de confianza o sea α de 1%

Prueba 3

La tercera prueba es la construcción del histograma de frecuencia. Si la curva gaussiana que pasa por los puntos medios de cada intervalo es simétrica entonces se puede decir que se está en presencia de una distribución normal.

En esta prueba se tiene en cuenta los histogramas de frecuencia absoluta, que muestran la cantidad de valores que caen en cada intervalo de clase así como los de frecuencia relativa que ofrecen la probabilidad en cada clase.

Prueba 4

Las pruebas de bondad de ajuste demuestran la distribución normal de los datos a través de la curva gaussiana, pero haciéndola mediante cálculos matemáticos, a diferencia del histograma de frecuencia. En esta prueba se comparan los valores de probabilidad de los coeficientes Chi – square, Kolmogorof, Kolmogorof-Smirnov y Anderson-Darling con el nivel de significancia, que puede ser del 1%, 5% o 10%; al ser los valores de la probabilidad de los coeficientes mayores que el nivel de significancia se acepta la idea de que los datos no se consideran anormales. (Montgomery, 2004).

2.3 Metodología empleada para el cálculo de la eficiencia en los suavizadores

La planta está diseñada para trabajar con suavizadores de 1 m³ de resina Lewatit S 1467 la cual en condiciones óptimas de poder de intercambio y una entrada de 350 ppm de dureza total de agua proveniente de los pozos, tiene la capacidad de suavizar 200 m³ de agua. (Lewatit, 2013). Actualmente, a los suavizadores 1 y 3 se les añadió un sobrante de resina de aproximadamente 15 cm y 13 cm respectivamente con el objetivo de obtener mayores volúmenes de agua tratada, por lo que es necesario recalcular el volumen real de resina presente en cada suavizador. Para ello se utilizó la ecuación:

$$V = \frac{\pi * D^2 * H}{4} \quad \text{Ec.2.4}$$

Dónde:

V: Volumen de resina (m³).

D: Diámetro del suavizador.

H: Altura actual de la resina.

Para el cálculo de la eficiencia en los suavizadores es necesario tener en cuenta el valor real de agua tratada que están dando cada uno actualmente, y la cantidad de agua tratada que deberían dar en sus condiciones óptimas; para determinar este valor se utilizó la ecuación (Lewatit, 2013).

$$L_{resina} = \frac{V(m^3) * Dureza\ total\ (^{\circ}HF)}{^{\circ}HF \cdot m^3} \quad Ec.2.5$$

Dónde:

L resina: Litros de resina que contiene cada suavizador.

V (m³): Volumen de agua en metros cúbicos entre regeneración y regeneración.

Dureza total (^{\circ}HF): Dureza total del agua de pozos a tratar en grados franceses.

^{\circ}HF \cdot m³: poder de intercambio de la resina.

El poder de intercambio de la resina es un valor que oscila entre 4.5 y 7, este valor es propio de la resina y de las condiciones de trabajo. El máximo valor se alcanza tanto en condiciones óptimas de la resina como en condiciones de trabajo, y quiere decir que por cada litro de resina se eliminan 7 grados franceses de cada m³ de agua que pase por el suavizador (Lewatit, 2013). El aumento considerable de la dureza total del agua a tratar, envejecimiento de la resina y la mala operación en el trabajo son factores que afectan el poder de intercambio de la resina, y a su vez la eficiencia del suavizador.

La dureza total del agua de pozos profundos (CaCO₃) se recoge en la empresa en ppm (mg/L). Para convertirlo a grados franceses se tiene en cuenta que:

1 °HF = 10 mg/L de CaCO₃ = 10 ppm (Lewatit, 2013).

Eficiencia

$$E = \frac{V_{real}}{V_{teórico}} \quad Ec.2.6$$

Dónde:

E : Eficiencia del suavizador.

V_{real} : Volumen real de agua suavizada por el suavizador.

$V_{teórico}$: Volumen teórico de agua a tratar por el suavizador en sus condiciones óptimas.

2.3.1 Cálculo de las velocidades en cada etapa de la regeneración

Los valores de velocidad en los filtros para cada una de las etapas del proceso de regeneración, lo definen los productores y suministradores de la resina Lewatit S 1467, las cuales se pueden observar en la tabla 2.1. Para el cálculo de las velocidades de las etapas de regeneración se tuvo en cuenta el tiempo en que ocurre cada una, así como la cantidad de m^3 de agua que se utilizó, para posteriormente utilizando el área que abarca la resina en el suavizador calcular la velocidad de cada proceso. Los datos del tiempo en cada etapa y el volumen de agua utilizado fueron obtenidos a tiempo real en la planta de tratamiento de agua por el período de una semana, para así obtener una mayor precisión en los cálculos y resultados. Para el área que abarca la resina en el suavizador se utilizó la ecuación:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ec.2.7}$$

Dónde:

A : Área de la resina en el suavizador (m^2).

D : Diámetro del suavizador (m).

Para el cálculo de las velocidades en las diferentes etapas de regeneración se utilizó la ecuación:

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Dónde:

V : Velocidad en la etapa de regeneración (m/h).

Q : Flujo en cada etapa de regeneración (m^3/h).

A: Área de la resina en el suavizador (m²).

2.3.2 Cálculo del poder de intercambio real de la resina

Para el cálculo del poder de intercambio actual de la resina se utilizó la Ec. 2.5, donde se sustituyó el volumen de resina real medido en cada suavizador, así como la cantidad de agua tratada que está dando cada uno.

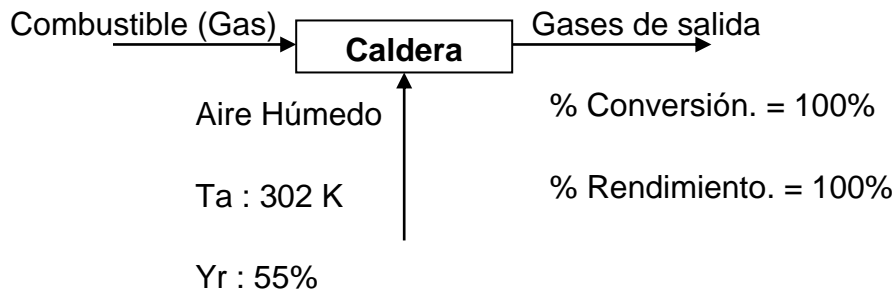
2.4 Aplicación de balance de masa y energía en los generadores de vapor.

Para realizar los balances de masa y energía se procesan los datos haciendo uso de una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel para programar las ecuaciones de los balances, con el objetivo de obtener una mayor exactitud en los resultados.

Los balances de masa se realizan aplicando la ley de conservación de la masa, que plantea que la masa que se acumula es igual a la masa del compuesto que entra, menos la del que sale, más la que se genera, menos la que se consume.

$$m_{entra} - m_{asale} + m_{genera} - m_{consume} = m_{acumula} \quad \text{Ec.2.9}$$

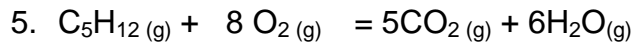
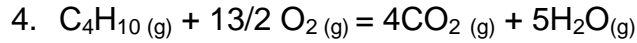
Al considerarse sistema estacionario, la masa acumulada es cero.



Se dispone de la composición y el flujo volumétricos del gas natural, se producen las siguientes reacciones.

Reacciones Químicas

1. $\text{CH}_4 (\text{g}) + 2\text{O}_2 (\text{g}) = \text{CO}_2 (\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g})$
2. $\text{C}_2\text{H}_6 (\text{g}) + 7/2 \text{O}_2 (\text{g}) = 2 \text{CO}_2 (\text{g}) + 3\text{H}_2\text{O} (\text{g})$
3. $\text{C}_3\text{H}_8 (\text{g}) + 5 \text{O}_2 (\text{g}) = 3 \text{CO}_2 (\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O} (\text{g})$



Cantidades molares que entran con el gas.

Para la determinación del flujo molar total se aplicó la ecuación de los gases ideales y posteriormente las cantidades de sustancias molares de cada gas.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{Ec.2.10}$$

P : presión de entrada de los gases (kPa)

V : volumen del gas (m^3)

n : flujo total (kmol)

R : constante de los gases ideales.

T : temperatura de entrada de los gases (K)

$$n_e(i) = x(i) \cdot F \quad \text{Ec.2.11}$$

$n_e(i)$: cantidad de sustancia de cada uno de los componentes que entra con el combustible (kmol)

$x(i)$: composición de cada uno de los componentes que entra con el combustible.

F : Flujo total de gas (kmol/h)

Cantidades molares que entran con el aire húmedo.

- Exceso Aire Seco = Exceso O_2 , porque el O_2 tiene una proporción definida y conocida en el aire seco.
- Reactivos limitantes (RL): CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} y C_5H_{12}
- Reactivo en exceso: O_2 (g)

$$\% \text{ExcesoO}_2 = \frac{(\text{O}_2 \text{a lim entado} - \text{O}_2 \text{teórico})}{\text{O}_2 \text{teórico}} \cdot 100 \quad \text{Ec.2.12}$$

De esta expresión se despeja el O_2 alimentado:

$$\text{O}_2 \text{a lim entado} = \% \text{Exceso} \cdot \text{O}_2 \text{teórico} + \text{O}_2 \text{teórico} \quad \text{Ec.2.13}$$

$$O_{2\text{teórico}} = O_{2\text{estequiométrico}} - O_{2\text{acompañar RL}} \quad \text{Ec.2.14}$$

En este caso con el reactivo limitante no entra O_2 .

$$O_{2\text{teórico}} = O_{2\text{estequiométrico}} \quad \text{Ec.2.15}$$

$$O_{2\text{estequiométrico}} = (RL_{\text{limitado}}) \cdot (R_{\text{estequiométrica}}) \quad \text{Ec.2.16}$$

$$O_{2\text{estequiométrico}} = \sum \left(n_{CH_4\text{entra}} \cdot \frac{2O_2}{1CH_4} \right) + \left(n_{C_2H_6\text{entra}} \cdot \frac{3,5O_2}{1C_2H_6} \right) + \left(n_{C_3H_8\text{entra}} \cdot \frac{5O_2}{1C_3H_8} \right) \\ + \left(n_{C_4H_{10}\text{entra}} \cdot \frac{6,5O_2}{1C_4H_{10}} \right) + \left(n_{C_5H_{12}\text{entra}} \cdot \frac{8O_2}{1C_5H_{12}} \right) \quad \text{Ec.2.17}$$

$$kmolAS = (kmolO_{2a\text{ limitado}} \cdot \frac{100kmolAS}{21kmolO_2}) \quad \text{Ec.2.18}$$

- Se requieren los kg de Aire Seco (AS)

$$kgAS = (kmolAS \cdot M(AS)) \quad \text{Ec.2.19}$$

- Para hallar el aire húmedo, se necesita conocer además, el agua que viene con el aire. Se determina la saturación en la carta psicrométrica. (Figura B.10. Perry, 1985).
- Con $T_a = 302\text{ K}$ y $Y_R = 55\%$ se obtiene $Y = 0,0143\text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg AS}$

$$n(H_2O)\text{entra} = \frac{Y \cdot kgAS}{M(H_2O)} \quad \text{Ec.2.20}$$

$$kgAH = kgAS \cdot (1 + Y) \quad \text{Ec.2.21}$$

$$n(N_2)\text{entra} = O_{2a\text{ limitado}} \cdot \frac{79kmolN_2}{21kmolO_2} \quad \text{Ec.2.22}$$

Podemos observar que el N_2 entra con el gas natural y con el aire húmedo:

$$n(N_2)_{\text{Total}} = n(N_2)_{\text{aire húmedo}} + n(N_2)_{\text{gas natural}} \quad \text{Ec.2.23}$$

Reactante consumido

$$n_{\text{cons}}(O_2) = \sum \left(n_{CH_4\text{cons}} \cdot \frac{2O_2}{1CH_4} \right) + \left(n_{C_2H_6\text{cons}} \cdot \frac{3,5O_2}{1C_2H_6} \right) + \left(n_{C_3H_8\text{cons}} \cdot \frac{5O_2}{1C_3H_8} \right) \\ + \left(n_{C_4H_{10}\text{cons}} \cdot \frac{6,5O_2}{1C_4H_{10}} \right) + \left(n_{C_5H_{12}\text{cons}} \cdot \frac{8O_2}{1C_5H_{12}} \right) \quad \text{Ec.2.24}$$

Productos generados

Para el CO₂

$$\begin{aligned} n_{generado}(CO_2) = & \sum \left(n(CH_4)_{cons} \cdot \frac{1CO_2}{1CH_4} \right) + \left(n(C_2H_6)_{cons} \cdot \frac{2CO_2}{1C_2H_6} \right) + \left(n(C_3H_8)_{cons} \cdot \frac{3CO_2}{1C_3H_8} \right) \\ & + \left(n(C_4H_{10})_{cons} \cdot \frac{4CO_2}{1C_4H_{10}} \right) + \left(n(C_5H_{12})_{cons} \cdot \frac{5CO_2}{1C_5H_{12}} \right) \end{aligned}$$

Ec.2.25

Para el H₂O

$$\begin{aligned} n_{generado}(H_2O) = & \sum \left(n(CH_4)_{cons} \cdot \frac{2H_2O}{1CH_4} \right) + \left(n(C_2H_6)_{cons} \cdot \frac{3H_2O}{1C_2H_6} \right) + \left(n(C_3H_8)_{cons} \cdot \frac{4H_2O}{1C_3H_8} \right) \\ & + \left(n(C_4H_{10})_{cons} \cdot \frac{5H_2O}{1C_4H_{10}} \right) + \left(n(C_5H_{12})_{cons} \cdot \frac{6H_2O}{1C_5H_{12}} \right) \end{aligned}$$

Ec.2.26

2.5 Evaluación de la eficiencia por el método indirecto

Este método parte de determinar la suma de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y luego determinar, indirectamente, la eficiencia como el porcentaje restante. (Borroto y Rubio, 2007).

$$n = 100 - \sum q_{pi} (\%) \quad \text{Ec.2.27}$$

$$q_{pi} = \frac{Q_p}{Q_d} \cdot 100 \quad \text{Ec.2.28}$$

$$Q_p = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \quad \text{Ec.2.29}$$

$$Q_d = PCI + Q_{FC} + Q_a + Q_v \quad \text{Ec.2.30}$$

Dónde:

q_{pi} :% de calor disponible perdido

Q_p : Pérdidas de energía por diferentes conceptos que se describen a continuación.

Q2: Energía perdida debido a la humedad del combustible en kJ/kg de combustible.

Q3: Energía perdida debido al agua formada por la combustión del hidrógeno del combustible en kJ/kg de combustible.

Q4: Energía perdida debido al agua del aire en kJ/kg de combustible.

Q5: Energía perdida debido a los productos gaseosos secos en kJ/kg de combustible.

Q6: Energía perdida debido a la combustión incompleta en kJ/kg de combustible.

Q7: Energía perdida debido al carbono no quemado en kJ/kg de combustible. Q8: Energía perdida debido a radiación, convección y conducción en las paredes del horno, al hidrógeno y los hidrocarburos que no reaccionan, etcétera, en kJ/kg de combustible.

Se consideran Q3, Q4 y Q5, las restantes son despreciables.

Qd: Calor disponible en kJ/kg de combustible.

PCI: Poder calórico inferior del combustible, kJ/kg

Q_{FC}: Calor físico del combustible

Q_a: Calor físico del aire cuando es calentado antes del calentador de aire

Q_v: Calor que llega al generador de vapor con el vapor de atomización.

Según Pankrátov, el valor calórico inferior del combustible se determina a partir de la siguiente expresión:

$$PCI = 108H_2 + 126CO + 234H_2S + 358CH_4 + 591C_2H_4 + 638C_2H_6 + 860C_3H_6 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 1403C_6H_6$$

Ec.2.31

Para el cálculo del calor disponible solo se considera el valor calórico.

Según Pons, (2008):

$$Q3 = mH_2O(H_{vc} - H_{lc}) \quad \text{Ec.2.32}$$

m H₂O: Agua formada en la reacción de combustión por kilogramo de combustible quemado.

H_v: Entalpía específica del vapor de agua producido.

H_l: Entalpía específica del agua suministrada al equipo para producir vapor de agua.

Según Vopat y Skrostzki, (1986) si t_g es la temperatura de salida de los gases por la chimenea y t_c la temperatura de entrada del combustible:

Para $t_g > 302$ °C

$$H_{VC} - H_{LC} = 4.1867(583.33 + 0.5t_g - t_c) \quad \text{Ec.2.33}$$

Para $t_g < 302$ °C

$$H_{VC} - H_{LC} = 4.1867(595.4 + 0.46t_g - t_c) \quad \text{Ec.2.34}$$

t_g y t_c se expresan en °C

$H_{VC} - H_{LC}$ se expresan en kJ/kg

$$Q_4 = W_{AV} \cdot 1,926(t_g - t_a) \quad \text{Ec.2.35}$$

Dónde:

W_{AV} : Cantidad de kilogramos de aguas que contiene el aire por kilogramo de combustible utilizado.

$$Q_5 = W_{GS} \cdot \overline{C_{PGS}}(t_g - t_a) \quad \text{Ec.2.36}$$

Dónde:

W_{GS} : Número de kilogramos de productos gaseosos secos por kilogramo de combustible quemado.

$\overline{C_{PGS}}$: Capacidad calorífica promedio entre t_a y t_g para los productos gaseosos secos. (1 kJ/kg. °C)

2.6 Cálculo del flujo de vapor por el método directo.

Según Borroto y Rubio, (2007) el método directo se basa en relacionar directamente la producción del generador de vapor con el consumo y determinar la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) del calor disponible (consumo).

Mediante este método se pretende calcular el flujo de vapor generado, a partir de la eficiencia calculada por el método indirecto.

$$\eta = \frac{mv \cdot \Delta H}{\beta \cdot VCI} \quad \text{Ec.2.37}$$

$$mv = \frac{\eta \cdot \beta \cdot VCI}{\Delta H} \quad \text{Ec.2.38}$$

$$\Delta H = H_f - H_i \quad \text{Ec.2.39}$$

η : Eficiencia (%)

mv : Flujo de vapor generado en kg/h.

H_i : Entalpía del agua alimentación en kJ/kg.

H_f : Entalpía del vapor saturado en kJ/kg.

VCI : Valor calórico inferior del combustible en kJ/m³.

β : Consumo de combustible en m³/h.

2.7 Cálculo de la recuperación de condensado

El condensado recuperado en la empresa es de gran importancia en la generación de vapor. Este condiciona la producción de agua tratada en la planta de agua pues a mayor cantidad de condensado recuperado, se utiliza menos de la misma almacenada en el tanque de agua tratada, por lo que normalmente en la empresa se realizan dos suavizaciones por día mientras se recupera condensado, por lo que, para el cálculo del condensado se utilizó el consumo de agua por las calderas calculado (demanda de vapor en la planta), y la cantidad de agua tratada por la planta en el mes correspondiente, utilizando la ecuación siguiente:

$$D.v = C.r + A.t \quad \text{Ec.2.40}$$

Dónde:

$D.v$: Demanda de vapor en la planta.

$C.r$: Condensado recuperado.

A.t: Agua tratada.

2.8 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa

Es necesario conocer cuál es la dureza máxima con la que la planta de tratamiento de agua puede satisfacer la demanda de la misma en la empresa, pues conociendo esto, se pueden tomar a tiempo las medidas necesarias cuando se lleguen a tales niveles de dureza, para que no ocurra un paro del proceso de producción de petróleo, y con esto evitar pérdidas económicas a EPEP – Centro. Para ello se tuvo en cuenta la condición crítica de no recuperación de condensado, situación poco común en la empresa, pero de mucha importancia a tener en cuenta pues es algo que ha ocurrido anteriormente, y que puede darse en el futuro por problemas técnicos que se puedan presentar en el proceso, por lo que es necesario conocer hasta cuando, solo con el agua obtenida con la planta de tratamiento, se suplen las necesidades de vapor para la producción.

Solo abasteciendo a las calderas con agua de la planta de tratamiento, sería necesario realizar más de dos suavizaciones por día, pues el agua del tanque de almacenamiento de agua tratada estaría en constante uso. El tiempo necesario para cada suavizamiento es de aproximadamente 6 horas en las condiciones actuales de la resina, pues se necesitan aproximadamente 2 horas en la etapa de regeneración y 4 horas mientras se suaviza. Cabe destacar que se tiene que hacer el proceso primeramente con un suavizador y cuando termine el mismo empezar con el otro, no pueden trabajar los dos en paralelo por cómo se ha diseñado la planta, por lo tanto, se pueden realizar un máximo 4 suavizaciones al día: dos con el suavizador 1, y dos con el suavizador 3, de manera alterna.

Para conocer el volumen de agua que se obtendría con cada suavizador con los diferentes valores de dureza se utilizó la Ec. 2.5; donde sustituyendo el volumen real de resina medido y el poder de intercambio real de la misma, se le fue aumentando teóricamente la dureza de agua de pozos a tratar, obteniendo como resultado un volumen de agua tratada para cada dureza correspondiente. Teniendo en cuenta cada volumen obtenido, y que se realizan dos suavizaciones por cada suavizador en el día, se puede conocer la producción de agua tratada de la planta diariamente para las condiciones actuales de la resina y los diferentes valores de

dureza; así se puede conocer hasta qué valor de dureza total de agua de pozos, la planta de tratamiento de agua me satisface la demanda de vapor de la planta ya calculada.

Capítulo 3: Resultados y discusión

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados siguiendo la secuencia del esquema metodológico expuesto en el capítulo 2.

3.1 Caracterización estadística de las variables principales del proceso

La caracterización estadística busca conocer si los valores medios de las variables analizadas son representativos de la muestra, para así llegar a resultados más verídicos en los estudios posteriores con los mismos. Para ello se analizaron los datos por la metodología explicada en el capítulo 2.

- Dureza del agua de pozos

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del análisis estadístico realizado a los valores de dureza presentes en el agua de los pozos.

Tabla 3.1: Resultados del análisis estadístico de la variable dureza del agua de pozos.

Parámetro	Valor
Media	475.35
Coefficiente de variación	12.69%
Coefficiente de Skweness	0.0164
Coefficiente de Kurtosis	4.0286

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis estadístico realizado a la dureza del agua de los pozos se puede observar que el coeficiente de Skweness está en el rango de -2 y 2, pero el coeficiente de Kurtosis es algo mayor que 2, pudiéndose rechazar la idea de que los datos muestren una distribución normal, esto también se evidencia en las pruebas de comparación entre el valor de la probabilidad y el error permisible donde el valor de la probabilidad del coeficiente de Kurtosis ($p\text{-value} = 0.0072$) es ligeramente menor que el nivel de significación ($\alpha = 0.01$); sin embargo, el valor de la probabilidad del coeficiente de Skwness ($p\text{-value} = 0.9901$) es muy alto, lo que demuestra una gran simetría, como se puede observar en el histograma de frecuencia (Figura 3.1).

También se realizó la prueba de bondad de ajuste, donde se puede observar que los valores de la probabilidad de Chi-square, Kolmogrof y Kolmogrof Smitnof son mayores que el nivel de significancia del 1%, pudiéndose asegurar que los datos corresponden a una distribución

normal. El valor del coeficiente de Kurtosis al ser alto lo que demuestra es que la mayoría de los datos están agrupados cerca de la media, como se puede observar en el histograma al ser la barra central tan alargada; además el coeficiente de variación está alrededor de un 12%, por lo que se puede llegar a la conclusión que la media es representativa de la muestra.

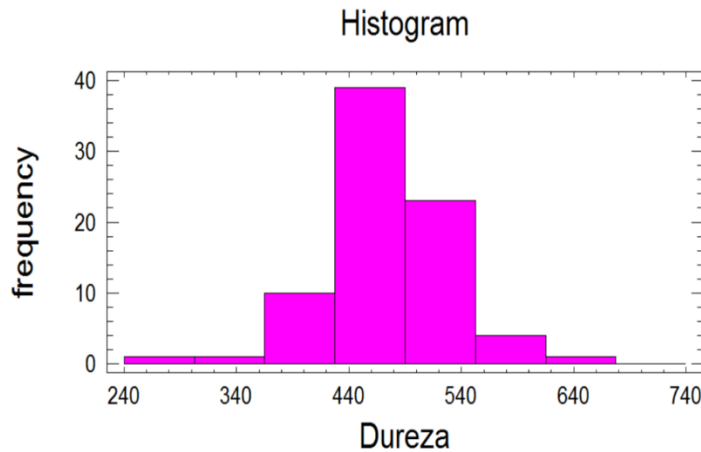


Figura 3.1 Histograma de frecuencia para dureza presente en el agua de pozos.

- Volúmenes de agua suavizada por el suavizador 1

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos al analizar estadísticamente los volúmenes de agua suavizada por la columna suavizadora 1.

Tabla 3.2: Resultados del análisis estadístico de los volúmenes de agua suavizada del suavizador 1.

Parámetro	Valor
Media	117.9
Coeficiente de variación	16.78%
Coeficiente de Skweness	-6.13
Coeficiente de Kurtosis	10.76

Fuente: Elaboración propia.

Después de analizar estadísticamente los volúmenes de agua tratada obtenidos en el separador 1 se puede observar que el coeficiente de Skweness es mucho menor que -2, lo que demuestra que en los datos recogidos no existe una buena simetría pudiéndose observar esto en el histograma de frecuencia (Figura 3.2).

En las pruebas de comparación de entre el valor de la probabilidad y el error permisible, el valor de la probabilidad del coeficiente Skewness ($p - \text{value} = 0.0005$) y el valor de la probabilidad del coeficiente Kurtosis ($p - \text{value} = 0.00002$) son menores que el nivel de significancia ($\alpha = 0.01$). En las pruebas de bondad de ajuste se puede apreciar que el valor de la probabilidad de chi-square (0.013) es la que es mayor que un nivel de significancia de 1%, sin embargo el valor de la probabilidad de Kolmogorof-Smirnov y Anderson-Darling son menor que un nivel de significancia del 1%, por lo que los datos no muestran una distribución normal; además con un coeficiente de variación tan por encima del 12% se llega a la conclusión de que la media no es representativa de la muestra, por lo que no nos va a dar un resultado confiable si realizamos cálculos posteriores con la misma.

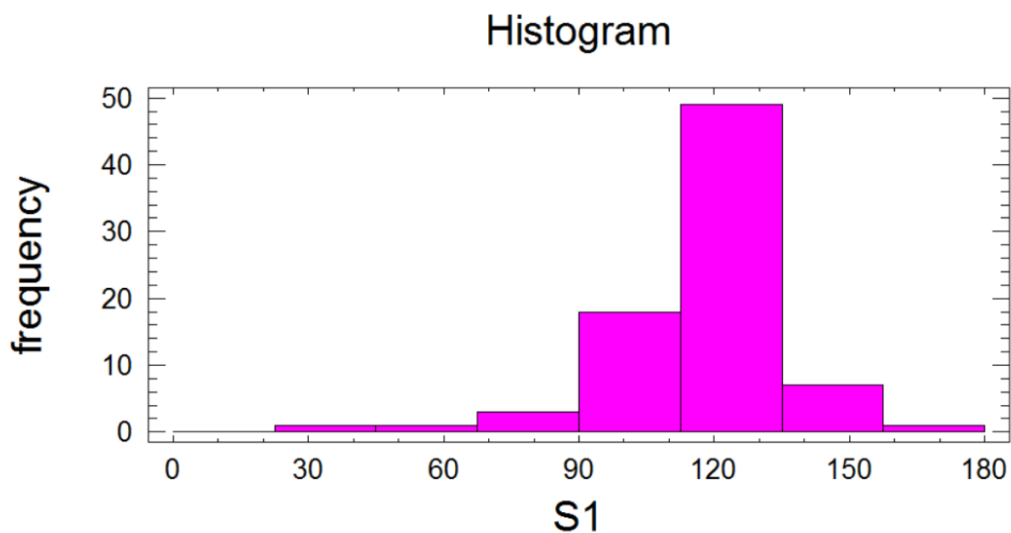


Figura 3.2 Histograma de frecuencia para volúmenes de agua tratada obtenidos del separador 1.

Para poder determinar los resultados anormales en el conjunto de observaciones se aplicó el procedimiento para la evaluación de datos anormales (Norma Cubana 92 – 21). En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.3: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los valores de volúmenes de agua obtenidos en el suavizador 1

Parámetro	Valor
Media	117.9
Desviación estándar	19.79
Mínimo	30 m ³
Máximo	163.3 m ³
t ₁	4.44
t _n	2.29
h	3.204

Fuente: Elaboración propia.

Como $t_1 > h$ se dice que el resultado que se sospechaba anormal es anormal y se excluye de la data de valores, en este caso 30 m³ por lo que es necesario realizar nuevamente el mismo procedimiento. En la tabla 3.4 se muestran los resultados.

Tabla 3.4: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los valores de volúmenes de agua obtenidos en suavizador 1.

Parámetro	Valor
Media	119.01
Desviación estándar	17.21
Mínimo	47 m ³
Máximo	163.3 m ³
t ₁	4.18
t _n	2.57
h	3.199

Fuente: Elaboración propia.

Al continuar $t_1 > h$ se excluye el valor anormal, y se realiza nuevamente el procedimiento. En la tabla 3.5 se muestran los resultados.

Tabla 3.5: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los valores de volúmenes de agua obtenidos en suavizador 1.

Parámetro	Valor
Media	119.94
Desviación estándar	15.23
Mínimo	76 m ³
Máximo	163.3 m ³
t ₁	2.89
t _n	2.85
h	3.196

Fuente: Elaboración propia.

Al ser t_1 y $t_n < h$ los datos no se consideran anormales, siendo la media de 120 m³ la más representativa de la muestra, por tanto, la que se utilizó en los cálculos correspondientes.

Los datos eliminados del análisis estadístico se deben a indisciplina tecnológica.

- Volúmenes de agua suavizada por el suavizador 3

En la tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos al analizar estadísticamente los volúmenes de agua suavizada por la columna suavizadora 3.

Tabla 3.6: Resultados del análisis estadístico de los volúmenes de agua obtenidos del suavizador 3.

Parámetro	Valor
Media	113.12
Coefficiente de variación	17.40%
Coefficiente de Skweness	-5.41
Coefficiente de Kurtosis	5.73

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar estadísticamente los volúmenes de agua tratada del separador 3 se puede observar que el coeficiente de Skweness es menor que -2 por lo que no hay una buena simetría en los datos recogidos, como se observa en el histograma de frecuencia (Figura 3.3).

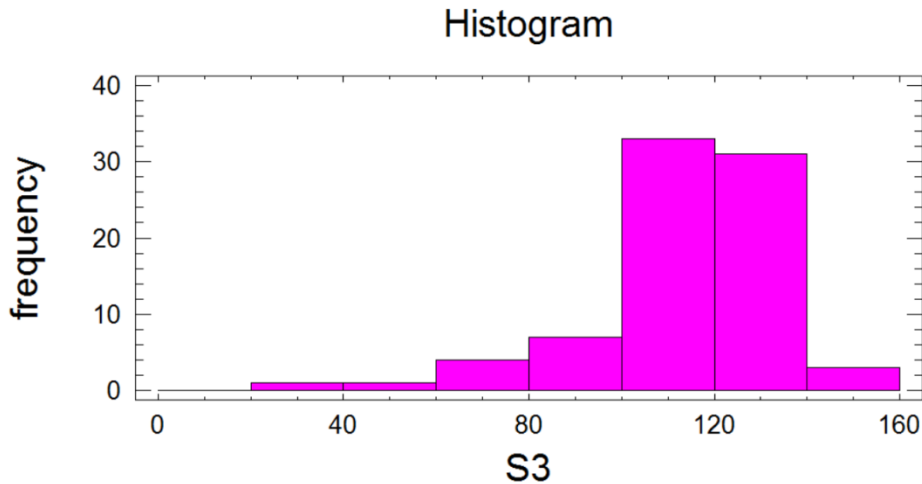


Figura 3.3 Histograma de frecuencia para volúmenes de agua tratada obtenidos del separador 3.

En las pruebas de comparación entre el valor de la probabilidad y el error permisible, el valor de la probabilidad del coeficiente de Skweness ($p\text{-value} = 0.001$) es menor que el nivel de significación ($\alpha = 0.01$), al igual que la probabilidad del coeficiente de Kurtosis ($p\text{-value} = 0.001$). Además, se realizaron las pruebas de bondad de ajuste donde la probabilidad de los coeficientes de Chi-square, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling son menores del 1% de significación, por lo que se concluye que podemos rechazar la idea que los datos provienen de una distribución normal para un 99% de confianza. Además, con un coeficiente de variación tan alto la media no es representativa de la muestra.

Para poder determinar los resultados anormales en el conjunto de observaciones se aplicó la (Norma Cubana 92 – 21). En la tabla 3.7 se muestran los resultados.

Tabla 3.7: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los volúmenes de agua obtenidos en el suavizador 3.

Parámetro	Valor
Media	113.12
Desviación estándar	19.68
Mínimo	34 m ³
Máximo	146 m ³
t ₁	4.02
t _n	1.67
h	3.208

Fuente: Elaboración propia.

Como $t_1 > h$ se dice que el resultado que se sospechaba anormal es anormal y se excluye de la data de valores, en este caso 34 m³ por lo que es necesario realizar nuevamente el mismo procedimiento. En la tabla 3.8 se muestran los resultados.

Tabla 3.8: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los volúmenes de agua obtenidos en el suavizador 3.

Parámetro	Valor
Media	114.12
Desviación estándar	17.64
Mínimo	54 m ³
Máximo	146 m ³
t ₁	3.41
t _n	1.81
h	3.199

Fuente: Elaboración propia.

Al continuar $t_1 > h$ se excluye el valor anormal, y se realiza nuevamente el procedimiento. En la tabla 3.9 se muestran los resultados.

Tabla 3.9: Resultados obtenidos en la aplicación de la Norma Cubana 92 – 21 a los volúmenes de agua obtenidos en el suavizador 3.

Parámetro	Valor
Media	114.89
Desviación estándar	16.36
Mínimo	70 m ³
Máximo	146 m ³
t ₁	2.74
t _n	1.90
h	3.196

Fuente: Elaboración propia.

Al ser t_1 y $t_n < h$ los datos no se consideran anormales, siendo la media de 115 m³ la más representativa de la muestra, por tanto, la que se utilizó en los cálculos correspondientes.

Los datos eliminados del análisis estadístico se deben a indisciplina tecnológica.

3.1.1 Cartas de Control

Las cartas de control se realizaron a la variable: dureza total del agua en el tanque de agua tratada con el objetivo de conocer si se realiza un correcto control en el proceso de suavizado del agua. Como norma en la empresa se tiene que el valor de dureza en el tanque de agua tratada debe estar entre un mínimo de 0 ppm y un máximo de 4 ppm (Anexo 4). Los datos recogidos corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero, los cuales se toman diariamente en la empresa, para un total de datos de 80. En las cartas de control se siguió el estudio de control del proceso semanalmente.

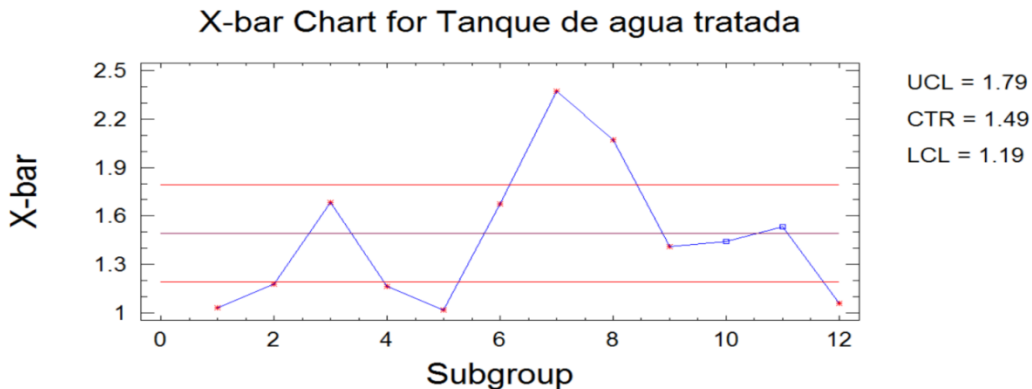


Figura 3.4 Carta de control X-bar para la dureza total del tanque de agua tratada.

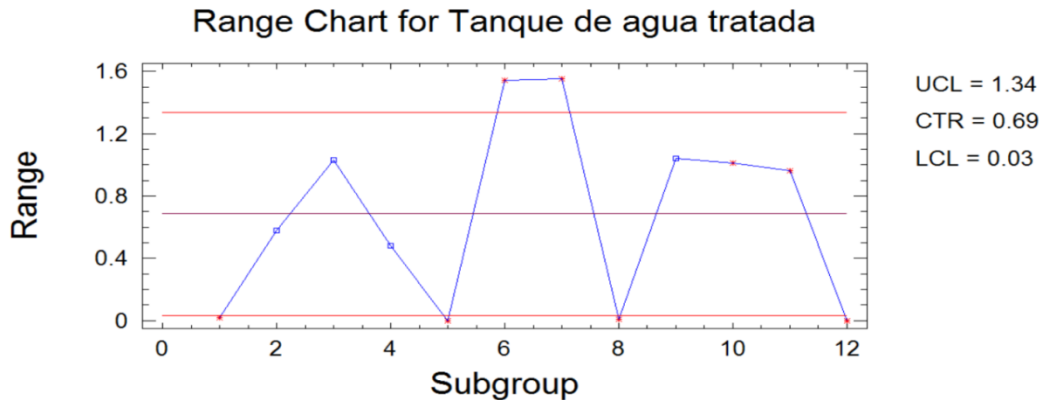


Figura 3.5 Carta de control Rango para la dureza total del tanque de agua tratada.

Como se observa en las figuras 3.4 y 3.5 se cumple con la norma establecida en la empresa pues la dureza se mantiene siempre en el rango de 0 a 4 ppm, aunque se pueden apreciar desviaciones anormales en el proceso para un 99% de confianza, pudiéndose afirmar que el proceso aunque cumple con las normas no tiene el correcto control, el cual es muy importante pues al no hacerlo se podría correr el riesgo de incumplir con el máximo de 4 ppm de dureza trayendo problemas a las calderas.

3.2 Evaluación de la eficiencia de operación de los suavizadores 1 y 3

3.2.1 Cálculo del volumen de resina en los suavizadores

Se calculó el volumen real de resina que tiene cada suavizador actualmente teniendo en cuenta el exceso de resina añadido a través de la Ec.2.4. Los resultados se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Parámetros actuales de los suavizadores 1 y 3.

	Suavizador 1	Suavizador 3
Diámetro (m)	1.220	1.220
Altura de resina (m)	1.000	0.980
Volumen de resina (m³)	1.170	1.145

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Cálculo de la eficiencia de los suavizadores

Para el volumen de resina calculado para cada suavizador y con la dureza que posee el agua de pozos en la actualidad de un promedio de 475 ppm, se calcula el volumen teórico de agua tratada que daría cada suavizador en estas condiciones con un poder de intercambio óptimo de la resina, utilizando la Ec.2.5. En las tablas 3.11 y 3.12 se muestran los resultados obtenidos para cada suavizador.

Tabla 3.11: Máximo volumen de agua que puede suavizar el suavizador 1 con los niveles de dureza actuales.

Variable	Valor
Volumen de resina	1170 L
Dureza en grados franceses	47.5 ° HF
Poder de intercambio de la resina	7
Volumen de agua tratada	172 m ³

Fuente: Elaboración propia

El suavizador 1 al trabajar en condiciones óptimas y con un máximo poder de intercambio de la resina, puede suavizar 172 m³ de agua dura. Si se conoce en la actualidad suaviza 120 m³ de agua, podemos saber que el mismo está trabajando con una eficiencia del 70%.

Tabla 3.12: Máximo volumen de agua que puede suavizar el suavizador 3 con los niveles de dureza actuales.

Variable	Valor
Volumen de resina	1145 L
Dureza en grados franceses	47.5 ° HF
Poder de intercambio de la resina	7
Volumen de agua tratada	169 m ³

Fuente: Elaboración propia

El suavizador 3 al trabajar en condiciones óptimas y con un máximo poder de intercambio de la resina, puede suavizar 169 m³ de agua dura. Si se conoce en la actualidad suaviza 115 m³ de agua, sabemos que el mismo está trabajando con una eficiencia del 68%.

3.2.3 Cálculo de las velocidades en las diferentes etapas de regeneración

Es de suma importancia tener en cuenta estas velocidades en el proceso de regeneración pues son garantía que se cumplan los objetivos buscados en cada etapa como son la limpieza de la resina de residuos sólidos y el correcto intercambio iónico en la etapa de inyección de salmuera, esto con la menor cantidad de agua y sal posible, trayendo consigo ahorros económicos a la empresa; además, que el proceso de regeneración se realice correctamente garantiza que la resina suavice la mayor cantidad de agua posible. En la tabla 3.13 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.13: Velocidades en las diferentes etapas de la regeneración.

Etapas	Tiempo (min)	Volumen (m³)	Flujo (m³/h)	Velocidad (m/h)
Contralavado	5	5.1	61	52.3
Inyección de salmuera	57	4.64	4.88	4.17
Desplazamiento	31	1.9	3.68	3.14
Enjuague	10	9.8	58.8	50

Fuente: Elaboración propia

Área de la resina dentro de los suavizadores: 1.17 m²

Actualmente el proceso contralavado se realiza a una velocidad de 52.3 m/h, mucho mayor que la recomendada por el fabricante de Lewatit S 1467 que debe ser a una velocidad entre 10 y 12 m/h (Tabla 2.1). Esto trae como consecuencia que, a tan alta velocidad, la resina se expanda más de lo necesario adhiriéndose a la parte superior del suavizador, tupiéndolo, lo que perjudica el paso del agua sucia, por tanto, no se logra una buena limpieza de la resina que es el objetivo de esta etapa. La resina al no estar lo suficiente limpia no favorece al correcto intercambio de los iones en el proceso posterior de inyección de salmuera, el principal para que la resina se cargue para nuevamente ser utilizada en el suavizamiento de agua.

La inyección de salmuera se realiza a una velocidad de 4.17 m/h, según la ficha técnica de la resina Lewatit S 1467 (Tabla 2.1) la regeneración se debe realizar a una velocidad de hasta 5

m/h, por lo que en la actualidad dicho proceso se realiza dentro de las normas. Sin embargo, el desplazamiento se realiza a una velocidad de 3.14 m/h, que según (Tabla 2.1) esta etapa debe ser a igual velocidad que la inyección de salmuera, lo que se necesita más tiempo para desplazar la salmuera en la resina, demorando el proceso de regeneración.

En la semana donde se realizó el estudio de las velocidades en las etapas de regeneración, se tomaron además las presiones de trabajo en cada una, para saber si se cumplían con las normas establecidas (Anexo 4). Se conoció así que los operadores utilizan iguales presiones de operación en las mismas etapas de cada regeneración, por lo que no se realizó análisis estadístico a la variable para saber si el proceso estaba en control. En la tabla 3.14 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.14: Presiones en las etapas de regeneración de la resina.

Etapa	Presión (MPa)
Contralavado	0.52
Inyección de salmuera	0.25
Desplazamiento	0.25
Enjuague	0.60

Fuente: Elaboración propia

Según las condiciones del régimen normal de operación, la etapa de contralavado está fuera de las normas, pues se está realizando a una mayor presión que la presión máxima de trabajo normada para esta etapa (0.5 MPa), lo que justifica la alta velocidad de la misma. El desplazamiento en cambio, está dentro de las normas, pero al realizarse a la misma presión de la inyección de sal, es lo que hace que la velocidad en esta etapa sea inferior a la anterior, pues al cerrarse la válvula de la salmuera pasa menos flujo por la resina, disminuyendo su velocidad. Por lo tanto, es necesario reajustar las presiones de trabajo en la planta de tratamiento de agua para lograr las velocidades que permitan la máxima regeneración de la resina.

3.2.4 Cálculo del poder de intercambio real de la resina

En las tablas 3.15 y 3.16 se muestran los resultados del cálculo del poder de intercambio presente en la resina en la actualidad, para cada suavizador.

Tabla 3.15: Poder de intercambio actual de la resina para el suavizador 1.

Variable	Valor
Volumen de resina	1170 L
Dureza en grados franceses	47.5 ° HF
Volumen de agua tratada	120 m ³
Poder de intercambio	4.87

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Poder de intercambio actual de la resina para el suavizador 3.

Variable	Valor
Volumen de resina	1145 L
Dureza en grados franceses	47.5 ° HF
Volumen de agua tratada	115 m ³
Poder de intercambio	4.77

Fuente: Elaboración propia

Como muestran las tablas 3.15 y 3.16, el poder de intercambio presente en las resinas de los suavizadores 1 y 3 es de 4.87 y 4.77 respectivamente, por lo que el suavizador 1, por cada litro de resina, puede eliminar 4.87 grados franceses (48.7 ppm) de dureza, de cada metro cúbico de agua dura; el suavizador 3 puede eliminar 4.77 grados franceses (47.7 ppm) de dureza de cada metro cúbico de agua dura, por cada litro de resina. Queda demostrado el bajo poder de intercambio que presentan las resinas en cada suavizador.

A pesar que la planta se instaló desde noviembre del 2017, la resina estuvo almacenada dentro de los suavizadores por más de 6 años, y según bibliografía, la vida útil de la misma oscila entre los 5 y los 10 años. Teniendo en cuenta los años de la resina y que en ese tiempo no estuvo en uso, la misma ha sufrido un proceso de envejecimiento que hace que la resina pierda poder de intercambio, como se observa en los resultados obtenidos; además, las deficiencias en las etapas del proceso de regeneración, hacen que la resina no se renueve lo suficiente para que en el proceso de suavizamiento se obtenga la mayor cantidad de agua posible, disminuyendo así la eficiencia de los suavizadores.

3.3 Cálculo de la demanda de vapor que tiene la planta

En la tabla 3.17 se muestran los resultados del cálculo del flujo de vapor generado por cada caldera en el mes de enero, obtenidos a partir del método directo de evaluación de eficiencia.

En el Anexo 5 se muestran las variables que se necesitaron para el cálculo y los resultados obtenidos resultados de la eficiencia por el método indirecto.

Tabla 3.17: Vapor generado (m³/d) por las calderas en el mes de enero.

Fecha	Caldera 2	Caldera 3	Caldera 4	Caldera 5	Total
01-01-18	110.63	140.40	116.60	134.16	501.79
02-01-18	109.20	128.94	136.09	127.68	501.91
03-01-18	125.58	75.68	78.26	134.64	414.16
04-01-18	38.75	148.08	156.00	140.88	483.71
05-01-18	23.81	139.58	149.48	135.00	447.87
06-01-18	80.23	127.96	158.84	135.67	502.71
07-01-18	100.43	125.21	146.43	123.87	495.94
08-01-18	74.91	114.47	175.78	126.50	491.65
09-01-18	82.77	112.57	169.57	132.48	497.38
10-01-18	77.48	139.10	110.50	132.62	459.70
11-01-18	107.13	145.65	96.15	128.81	477.75
12-01-18	145.17	146.58	167.08	138.05	596.87
13-01-18	160.32	151.68	153.60	143.52	609.13
14-01-18	148.82	144.90	170.84	138.53	603.09
15-01-18	105.91	156.34	68.10	130.83	461.18
16-01-18	109.94	142.80	135.21	133.22	521.17
17-01-18	125.02	139.83	121.97	133.49	520.31
18-01-18	77.09	142.34	130.86	122.68	472.97
19-01-18	78.14	102.33	169.22	134.94	484.64
20-01-18	83.55	117.36	229.29	154.00	584.20
21-01-18	90.34	128.46	101.09	140.43	460.33
22-01-18	78.26	134.82	167.37	146.85	527.29
23-01-18	103.95	144.51	128.18	145.00	521.63
24-01-18	88.12	145.13	109.83	139.16	482.23
25-01-18	119.52	138.98	173.11	133.14	564.75
26-01-18	111.76	143.78	177.55	132.03	565.13
27-01-18	104.63	124.73	160.53	120.38	510.26
28-01-18	120.92	143.72	116.33	138.66	519.64
29-01-18	124.43	146.21	157.40	139.97	568.02
30-01-18	79.30	144.01	138.85	126.54	488.70
31-01-18	75.97	141.43	173.11	116.76	507.28
				Promedio	511.1

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis de la demanda general de vapor por la planta de procesamiento de crudo en el mes de enero, pues es uno de los meses donde hay más consumo de agua por las calderas para generar vapor al ser en la época de invierno en nuestro país, trayendo consigo que para calentar el crudo en las diferentes etapas del proceso se necesite más calor. Los resulta-

dos muestran que la planta necesita un promedio aproximado de 511 m³/d de vapor para el procesamiento del crudo.

Al conocer la demanda de vapor que tuvo la planta en el mes de enero y la cantidad de agua tratada que se obtuvo en las columnas suavizadoras, se pudo conocer la cantidad de condensado recuperado por día que hubo en la empresa a través de la Ec.2.40 (Anexo 6). En la figura 3.6 se muestra el resultado del balance agua – vapor – condensado en el mes de enero del presente año.

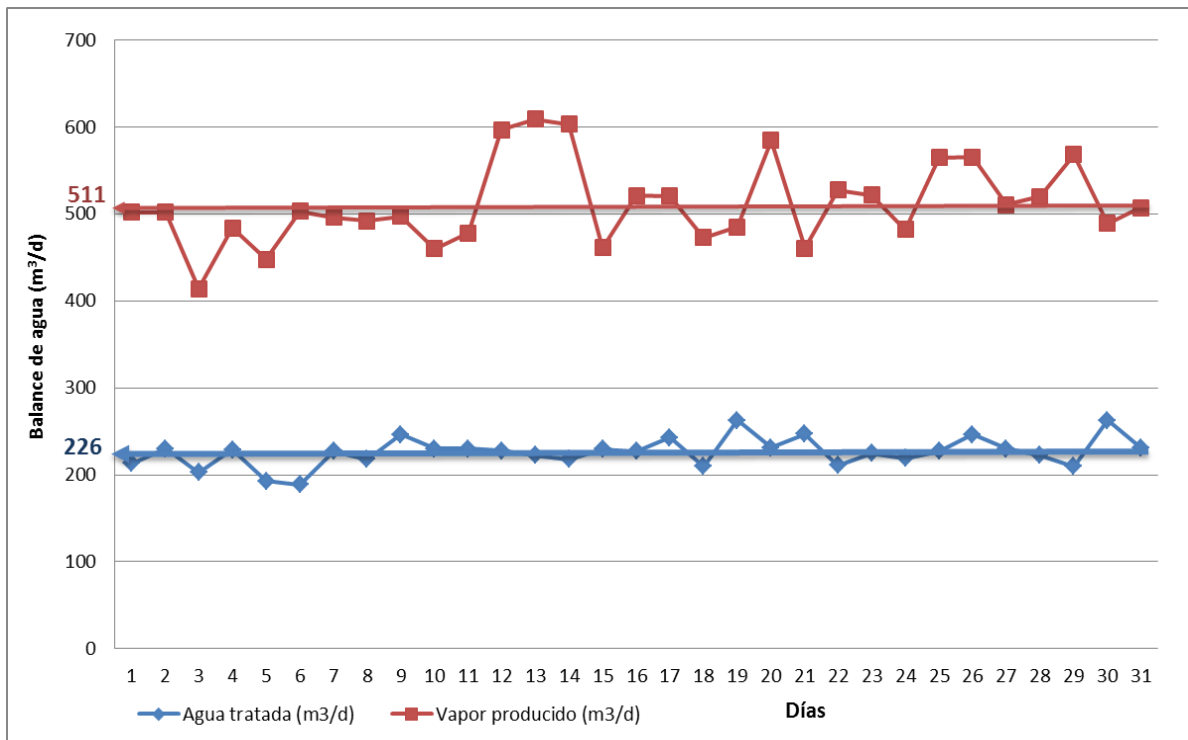


Figura 3.6: Comportamiento del balance de agua – vapor – condensado en el mes de enero de 2018.

En la figura 3.6 se puede observar el comportamiento variado de la demanda de vapor de la empresa, pues no es un proceso estable en el tiempo. Esto se explica con el hecho de que no siempre se utiliza la misma cantidad de vapor para lograr la calidad del crudo, esto varía con las condiciones del tiempo y con las necesidades de los equipos para lograr los parámetros de calidad requeridos.

3.4 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa

En la figura 3.7 se muestra el comportamiento en el tiempo de la dureza del agua de pozos en los años 2016 y 2017, donde se puede observar el aumento considerable de la misma en tan solo dos años como consecuencia del período seco en que se encontraba el país, con valores registrados de 550 – 600 ppm de dureza total, antes del comienzo de las lluvias.

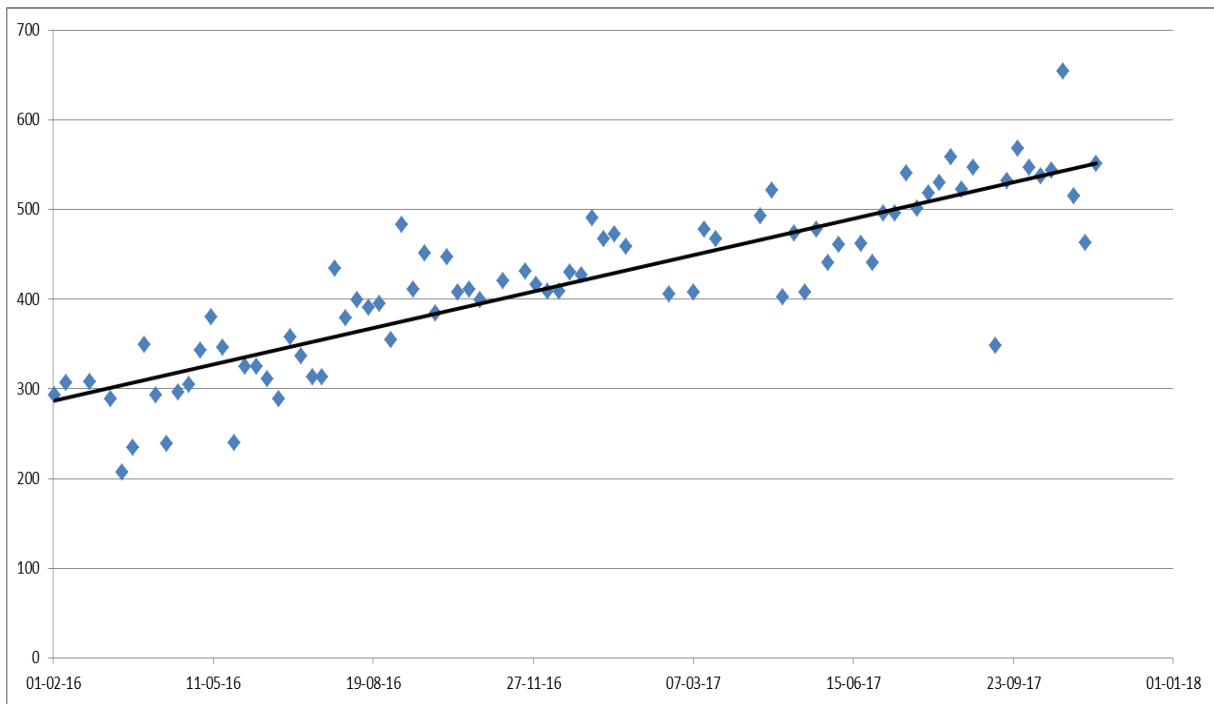


Figura 3.7: Comportamiento de la dureza en agua de pozos en los años 2016 y 2017.

En la tabla 3.18, se muestran los resultados de los volúmenes de agua por suavizamiento que es capaz de entregar cada suavizador, en dependencia del incremento de la dureza total del agua de los pozos.

Tabla 3.18: Volúmenes de agua tratada en los suavizadores con la variación de la dureza de agua de pozos.

	Suavizador 1	Suavizador 3
Dureza (ppm)	Volumen m ³	Volumen m ³
400	142	137
450	127	121
475	120	115
500	114	109
550	104	99
600	95	91
650	88	84
700	81	78
750	76	73

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.19 se muestra el volumen de agua por día que es capaz de suavizar la planta de tratamiento en la actualidad, con el aumento de la dureza total en el agua de pozos, para un máximo de 4 suavizaciones al día.

Tabla 3.19: Producción de agua tratada por la planta en el día en los diferentes valores de dureza total de agua de pozos.

Dureza (ppm)	Volumen m ³ /d
400	558
450	496
475	470
500	446
550	406
600	372
650	344
700	318
750	298

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 3.19, con las condiciones de dureza presentes en la actualidad en los pozos de agua, de un promedio de 475 ppm y en aumento, la planta de tratamiento puede suavizar 470 m³/d de agua. Si se sabe que la demanda de vapor en la empresa es de 511 m³/d de vapor, solo con la planta de tratamiento no se puede garantizar la cantidad de agua que necesita la producción para la generación de vapor. El máximo valor de dureza, con la cual se puede satisfacer a los generadores de vapor del agua necesaria es de 438 ppm, como se muestra en la figura 3.8.

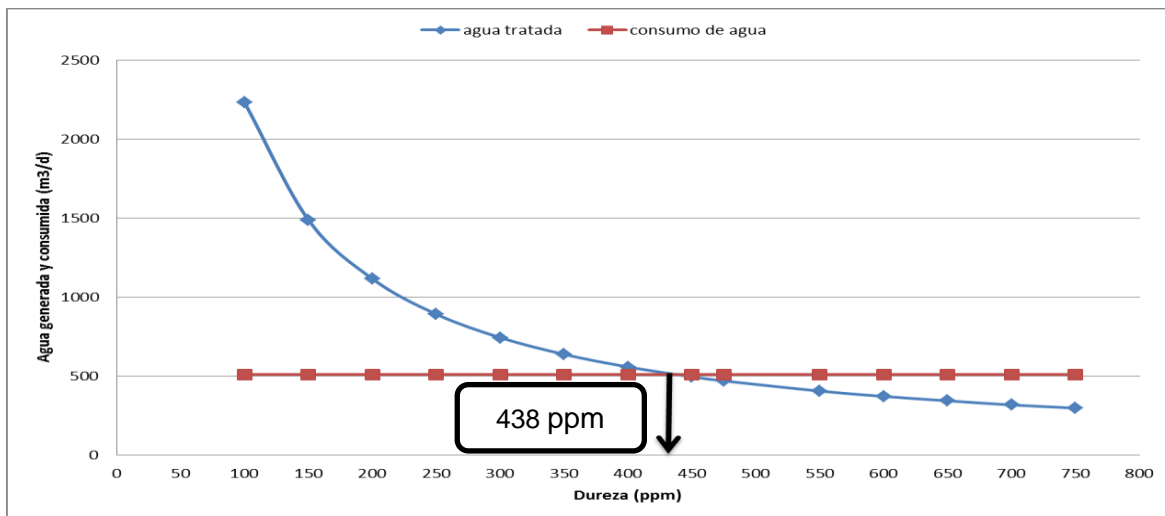


Figura 3.8: Dureza máxima permisible para las condiciones actuales de operación.

En la figura 3.9 se puede observar el comportamiento de la dureza del agua de los pozos desde la instalación de la nueva planta de tratamiento de agua en la empresa, donde se ve una disminución y estabilización de la dureza en los últimos meses del 2017, debido a las intensas lluvias dejadas por el paso del huracán Irma por nuestro país. Otro evento meteorológico que disminuyó considerablemente la dureza en el agua de los pozos fueron las abundantes lluvias de la tormenta Alberto que pasó por la isla el pasado mes de mayo. A pesar de esto, se observa, aunque menos pronunciada, que continúa la tendencia al aumento de la dureza en el agua, con valores que sobrepasan las 600 ppm.

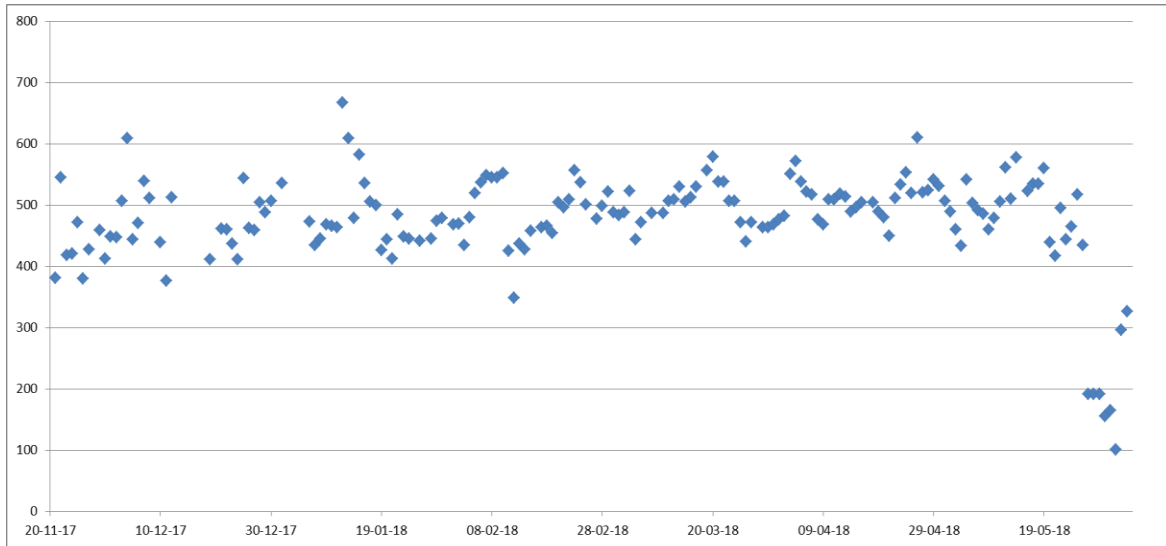


Figura 3.9: Comportamiento de la dureza del agua de pozos desde la instalación de la nueva planta de tratamiento de agua en la empresa.

3.4.1 Estimación de la dureza máxima total de agua de pozos que garantice la demanda de vapor en la empresa para la resina Lewatit S 1467 en sus condiciones óptimas (nueva).

En la tabla 3.20 se muestran los resultados de los volúmenes de agua que se obtendrían para un poder de intercambio óptimo de la resina.

Tabla 3.20: Volúmenes de agua tratada en los suavizadores con la variación de la dureza de agua de pozos, para un máximo poder de intercambio de la resina.

	Suavizador 1	Suavizador 3
Dureza (ppm)	Volumen m ³	Volumen m ³
400	205	200
450	182	178
475	172	169
500	164	160
550	149	146
600	137	134
650	126	123
700	117	115
750	109	107

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.21 se muestra el volumen de agua por día que sería capaz de suavizar la planta de tratamiento con el aumento de la dureza total en el agua de pozos, para un poder de intercambio óptimo de la resina, realizando un máximo de 3 suavizaciones al día, pues al aumentar el poder de intercambio de la resina admite más agua a suavizar, por lo que el tiempo de suavización demora más en terminar.

Tabla 3.21: Producción de agua tratada por la planta en el día en los diferentes valores de dureza total de agua de pozos.

Dureza (ppm)	Volumen m ³ /d
400	610
450	542
475	513
500	488
550	444
600	408
650	375
700	349
750	325

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en la tabla 3.21, podemos concluir que, con la misma resina en condiciones nuevas, garantizando así su máximo poder de intercambio, se satisface la demanda de vapor en la planta hasta valores de dureza de 477 ppm. El incremento de la capacidad de suavización de agua con la resina nueva presenta muy poco margen de mejora. Como se analizó anteriormente (figura 3.9), existe una tendencia ascendente en la dureza del agua de los pozos (alrededor de 600 ppm), por lo que se puede afirmar que con este sistema de tratamiento de agua es obligatoria la recuperación de condensado para garantizar la demanda de vapor. En la figura 3.10 se hace una comparación de la dureza máxima permisible en función del poder de intercambio de la resina (agua tratada 1 corresponde a poder de intercambio actual y agua tratada 2 corresponde a la resina nueva con máximo poder de intercambio).

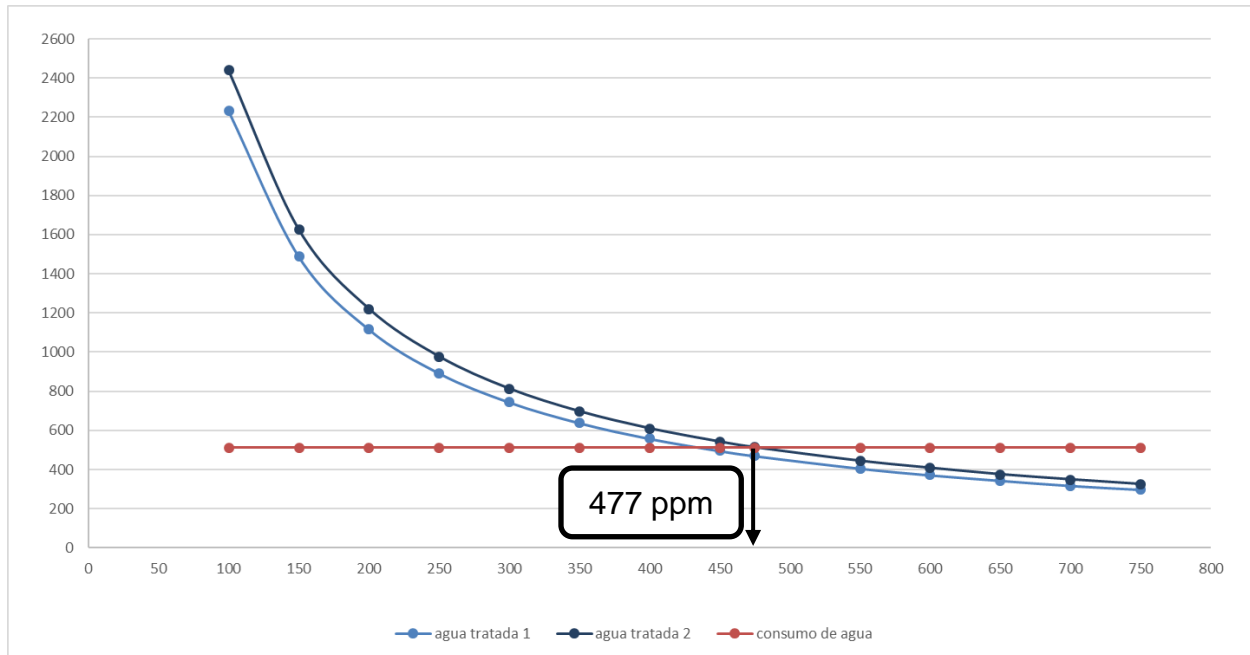


Figura 3.10: Incremento de la dureza máxima permisible para el poder de intercambio máximo de la resina.

Por otra parte, quedaría analizar la posibilidad de poner en servicio la unidad de descarbonación para poder enfrentar la salinización de los pozos y garantizar la demanda de vapor de la planta. Si esto no es posible o no es económicamente factible sería conveniente analizar otro método de tratamiento de agua para la generación de vapor.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo 3

1. La dureza del agua de pozos profundos promedio en los meses de estudio es de 475 ppm, como consecuencia de las precipitaciones existentes.
2. Las columnas suavizadoras 1 y 3, para una dureza de entrada del agua de 475 ppm, garantizan un promedio de 120 m³ y 115 m³ de agua tratada por cada una.
3. El volumen real de resina en las columnas suavizadoras 1 y 3, es de 1170 L y 1145 L respectivamente y la eficiencia de trabajo es del 70% y 68% respectivamente.
4. La velocidad en la etapa de contralavado en el proceso de regeneración, es de 52 m/h, superior a los valores recomendados por las normas de 10 – 12 m/h, los cuales son establecidas para la resina Lewatit S 1467.

5. El poder de intercambio observado en la resina de los suavizadores 1 y 3, es de 4.87 y 4.77 respectivamente, por lo que por cada litro de resina en cada suavizador se pueden eliminar respectivamente, 4.87 y 4.77 grados francés de dureza de cada metro cúbico de agua dura.
6. El consumo de agua para la generación de vapor de la planta de procesamiento de crudo de la EPEP – Centro, en el período de mayor demanda (enero), es de 511 m³/d.
7. Para garantizar la demanda total de agua en la planta de procesamiento de crudo, sin recuperación de condensado, se requiere una dureza total, menor o igual a 438 ppm.
8. La dureza máxima para garantizar la demanda total de agua en la planta se eleva hasta 477 ppm, si la resina es nueva, al poderse eliminar por litro de resina, 7 grados franceses (70 ppm) de dureza, de cada metro cúbico de agua dura.
9. La recuperación de condensado es imprescindible, para que se garantice la demanda de vapor de la planta de procesamiento de crudo, de la EPEP - Centro.

Conclusiones

1. A partir de una concentración de 438 ppm de la dureza total del agua cruda, la planta de tratamiento de agua para las calderas, sin la recuperación de condensado, no garantiza la demanda total que requiere la generación de vapor en la Planta de Procesamiento de Crudo, de la EPEP - Centro.
2. Como resultado de la recuperación de condensado en la Planta de Procesamiento de Crudo de la EPEP – Centro, se garantiza la demanda de agua para la generación de vapor, pese a los altos valores de dureza total (550 – 600 ppm) observados en el período seco.
3. En el caso de una resina nueva, se demuestra que se puede garantizar la demanda de agua a las calderas, hasta una dureza total de 477 ppm, pues al tener un máximo poder de intercambio, por cada litro de resina puede eliminar 7 grados franceses de dureza (70 ppm), de cada metro cúbico de agua dura.

Recomendaciones

1. Analizar técnica y económicamente la posibilidad de poner en funcionamiento la unidad de descarbonatación de la planta de tratamiento de agua.
2. Garantizar la máxima recuperación de condensado en la Planta de Procesamiento de Crudo, disminuyendo los gastos de operación e incrementando la eficiencia energética de la planta.

Bibliografía

1. Akun water filters, (2016). Resina catiónica. [en línea]. Disponible en: www.akunfilters.com
2. Anaya Fernández, Oscar Gonzalo (2014). Evaluación de la eficiencia de la resina convencional (aniónica de base fuerte) en la remoción de nitratos, en las aguas para consumo humano. Tingo María – Perú. 109 p. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
3. Andrade, L. H. et al., (2017). *Nanofiltration and reverse osmosis applied to gold mining effluent treatment and reuse*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 34, No. 01, pp. 93 - 107, [dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082).
4. Bankiewicz, Dorota (2012). *Corrosion behaviour of boiler tube materials during combustion of fuels containing Zn and Pb* [en línea]. Academic Dissertation. Åbo Akademi University. [citado 15 marzo 2018]. Disponible en: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/77050/bankiewicz_dorota.pdf?sequence=2
5. Bennett, D. (2009). “*Clean Water Makes You Dirty: Water Supply and Sanitation Behavior in the Philippines*,” working paper, University of Chicago.
6. Birm, (2010). Resina de tratamiento de aguas. [en línea]. Disponible en: www.Birm.com
7. Borroto Nordelo, Aníbal y Ángel Rubio González (2007). Combustión y Generación de Vapor. Editorial Universo Sur Cienfuegos. 185 p.
8. CDW (2016). *Manganese in Drinking Water*. Document for Public Consultation. Prepared by the Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water. Canada.
9. Chang, D.I., Choo, K.H., Jung, J.H., Jiang, L., Ahn, J.H., Nam, M.Y., Kim, E.S. and Jeong, S.H. (2009). *Foulant identification and fouling control with iron oxide adsorption in electrodialysis for the desalination of secondary effluent*. *Desalination* 236(1–3), 152-159.
10. Chávez W, Paredes C, Pacheco J. (2004). Causas de fallas en calderas. *Revista Tecnológica Edición Especial ESPOL Ciencia*. [Consultado: 15 de marzo 2018]. Disponible en: http://www.rte.espol.edu.ec/archivos/Revisita_2004/9%20CAUSAS%20DE%20FALLAS.pdf
11. Choi, D.W. (2002) *Improve plant water treatment*. *Hydrocarbon Processing (International edition)* v.81 No.7.42-46.

12. Cichowicz, Robert et al., (2016). *Analysis of CO₂ concentration distribution inside and outside small boiler plants*. (ECOL CHEM ENG S.) 2016;23(1):49-60.
13. CIDI. (1999) Grupo de Investigadores Ambientales. Reúso de Aguas Industriales. Intercambio iónico. 20-27.
14. Correa G, Fernández L. Uso eficiente del agua en Refinería Luján de Cuyo. 2008. [en línea]. [Consultado: 15 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/CONAID2/112%20trabajo.PDF> 7
15. CUPET (2014). Reglamento tecnológico de calderas y planta de agua.
16. Duarte Valencia, Efrain A. et al., (2015). Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial. Bogotá D.C. 85 h. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario. Universidad de La Salle.
17. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. (2009). Intercambio Iónico. [en línea]. Consultado el 30 de Marzo de 2018, Disponible en: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/resinasintercambio7.pdf>
18. FECYT. (2001) Tecnociencia: Especial Resinas de Intercambio Iónico [en línea].714-720. Disponible en: <http://www.fecyt.es>.
19. Feely, T., T. Skone, G. Steigel Jr., A. McNemar, M. Nemeth, B. Schimmoller, J. Murphy and L. Manfredo. (2008). *Water: A critical resource in thermoelectric power industry*. *Energy* 33: 1-11.
20. Garud R. M. et al., (2011). *A Short Review on Process and Applications of Reverse Osmosis*. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*. All Rights Reserved Euresian Publications © eISSN 2249 0256 Available Online at: www.environmentaljournal.org Volume 1, Issue 3: 233-238.
21. Goutham R. Adelli, Sai Prachetan Balguri, Prakash Bhagav, Vijayasankar Raman & Soumyajit Majumdar (2017). *Diclofenac sodium ion exchange resin complex loaded melt cast films for sustained release ocular delivery*, *Drug Delivery*, 24:1, 370-379, DOI: 10.1080/10717544.2016.1256000.
22. Grágeda Z.M., Grágeda Z.M. (2006) Desarrollos actuales en tratamientos de riles por métodos electroquímicos.3-49.

23. Gray, Stephen (2015). *Opportunities for Membrane Distillation*. Institute for Sustainability and Innovation. College of Engineering and Science. Victoria University
24. Guanche Ravelo, Juan Manuel (2016). Plan de mantenimiento de una Sala de Calderas. La Laguna. 104 h. Tesis en opción al grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática. Universidad de La Laguna.
25. Hakan et al., (2013). *Comparison of the adsorption by rice hulls and Lewatit TP 214 of platinum from chloroplatinic solution*. *J. Serb. Chem. Soc.* 78 (6) 811–826 (2013) JSCS–4460.
26. Karlsson, Erik (2017). *The Formation and Dissolution of Sodium Salt Scales in Black Liquor Evaporators*. Gothenburg. 75 h. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
27. Knappett, Peter S.K. et al., (2011). *Efficacy of Hollow-Fiber Ultrafiltration for Microbial Sampling in Groundwater*. Vol. 49, No. 1–GROUND WATER– (pages 53–65).
28. Kremer, Michael et al., (2011) *SPRING CLEANING: RURAL WATER IMPACTS, VALUATION, AND PROPERTY RIGHTS INSTITUTIONS*; *The Quarterly Journal of Economics*. 126, 145–205. doi:10.1093/qje/qjq010.
29. Kritzberg, E. S.; Ekström, S. M. (2012). *Increasing iron concentrations in surface waters – a factor behind brownification?* *Biogeosciences*. No. 9. 1465–1478, 2012. [citado 18 marzo 2018]. Disponible en: www.biogeosciences.net/9/1465/2012/ doi: 10.5194/bg-9-1465-2012.
30. Kumar Gupta, Gagan (2017). *Corrosion Mapping of Water Wall Tubes of Boiler using LFET*. *Journal of Engineering Research and Application* [en línea]. ISSN: 2248-9622, Vol. 7, Issue 11, (Part -6), pp.23-29. [Consultado el 20 de marzo del 2018] Disponible en: http://www.ijera.com/papers/Vol7_issue11/Part-6/D0711062329.pdf
31. Kumari, Amrita et al., (2015). *Impact of Boiler Water Chemistry on Waterside Tube Failures*. *IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology*. [en línea]. Volume 2. Issue 04. September 2015 ISSN 2349-6010. [citado 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV2I4008.pdf>

32. Lee, H.-J., Hong, M.-K., Han, S.-D., Cho, S.-H. and Moon, S.-H. (2009) *Fouling of an anion exchange membrane in the electrodialysis desalination process in the presence of organic foulants*. *Desalination* 238(1–3), 60-69.
33. Lewatit, (2013). Resinas de intercambio iónico. [en línea]. Disponible en: www.lewatit.com
34. Lorrain, Anne et al., (2003). *Decarbonation and preservation method for the analysis of organic C and N contents and stable isotope ratios of low-carbonated suspended particulate material*. *Analytica Chimica Acta* 491 (2003) 125–133.
35. Manahan S.E. (2007) *Introducción a la química ambiental*. Ed. Reveté, S.A.de C.V. 231-234.
36. Ming Chew, Chun et al., (2015). *Practical performance analysis of an industrial – scale ultrafiltration membrane water treatment plant*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 46 (2015) 132 – 139.
37. Montgomery, Douglas C. *Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería*. Segunda edición. México: McGraw-Hill, 2004.
38. Mullaney, R John et al., (2009). *Chloride in Groundwater and Surface Water in Areas Underlain by the Glacial Aquifer System, Northern United States* [en línea]. Scientific Investigations Report 2009–5086. 41 p. [Consulta : 14 Abril 2018] Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5086/pdf/sir2009-5086.pdf>
39. Nevárez Rivandeneira Martha Elizabeth. (2009) *Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal esmeraldas*” Escuela superior politécnica de Chimborazo. Ecuador. 26, 27, 30, 44-68
40. Norma Cubana 92-21. *Procedimiento para evaluar la anomalía de los resultados de las observaciones*.
41. Novem (2017). Purolite. Características físicas y químicas. Grupo Novem [en línea]. [Consulta: 14 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.novem.com.mx>
42. Oztekin, Elif et al., (2016). *Wastewater treatment by electrodialysis system and fouling problems*. *The Online Journal of Science and Technology*. Volume 6, Issue 1. [Consulta : 27 de febrero 2018] Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/9f96/c3ab2dff2653a7f06142a61bf6c32ff87cae.pdf>

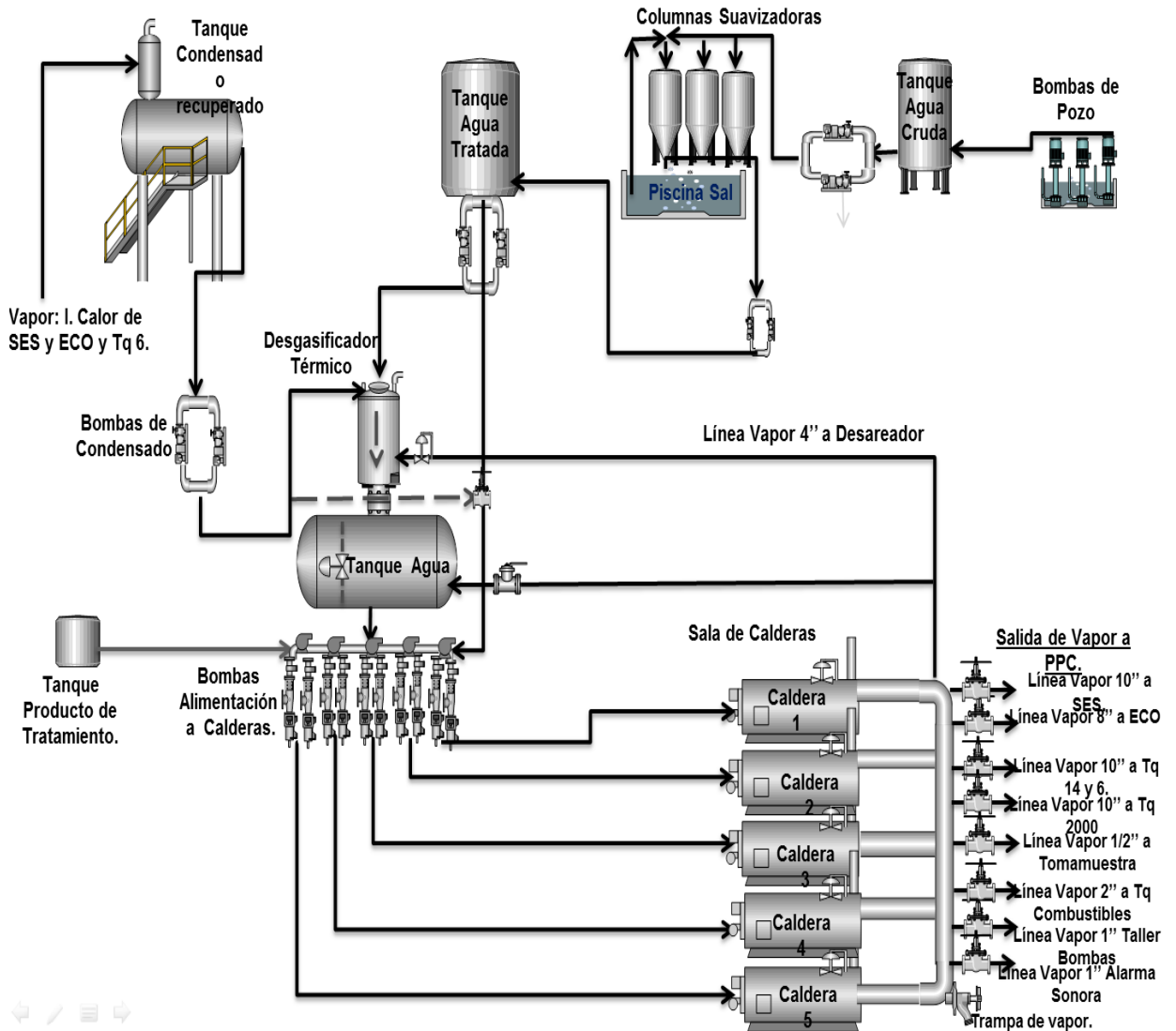
43. Pérez Q.D., Sierra A.I., Fajardo G.M. (2006) Ciencias Experimentales y Tecnología. Preparación de materiales adsorbentes de Hg (II) con fines analíticos y aplicaciones medioambientales. Madrid. Editorial DIKINSON, S.L ISBN: 849772-942-0. 21 y 22.
44. Perry, J (1985). Manual del ingeniero químico, tomo I, 3ra ed. UTEHA, México.
45. Pons Hernández, Antonio (2008). Termodinámica técnica para ingenieros químicos. Tomo I. La Habana: Editorial Félix Varela. 1-581 p.
46. Purolite (2013). Technical data, ISO 9002. [en línea]. [Consulta: 14 Abril 2018]. Disponible en: www.purolite.com
47. Rafati et al., (2010). *Removal of chromium (VI) from aqueous solutions using Lewatit FO36 nano ion exchange resin. Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7 (1), 147-156, Winter 2010. ISSN: 1735-1472.
48. Ramírez S., Hermes *et al.*, (2007). Disolución de sílice biogénica en sedimentos de lagos utilizados como bioindicadores de calidad del agua. *e-Gnosis* [en línea]. Vol. 5, Art.4 Disponible en: www.e-gnosis.udg.mx/vol5/art3
49. Ribeiro, A., Nunes, O., Pereira, M., & Silva, A. (2015). *An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. Environment International*, 33-51.
50. Ruiz, B., Sístat, P., Huguet, P., Pourcelly, G., Araya-Farias, M. and Bazinet, L. (2007) *Application of relaxation periods during electro dialysis of a casein solution: Impact on anion-exchange membrane fouling. Journal of Membrane Science* 287(1), 41-50.
51. Seo, Junghwa et al., (2015). *On-Site Corrosion Behavior of Water-Treated Boiler Tube Steel. Appl Microsc* 2015;45(3):177-182. [en línea]. [Consulta : 22 Abril 2018] Disponible en: <https://www.e-sciencecentral.org/upload/am/pdf/am-45-177.pdf>
52. Schubert, Carsten J. (2000). *Effects of decarbonation treatments on $\delta^{13}\text{C}$ values in marine sediments. Marine Chemistry* 72 (2000) 55–59.
53. Steinle, Lea et al., (2017). *Effects of low oxygen concentrations on aerobic methane oxidation in seasonally hypoxic coastal waters. Biogeosciences*. No. 14. 1631–1645, 2017. [en línea]. [Consulta : 14 Abril 2018] Disponible en: www.biogeosciences.net/14/1631/2017/ doi:10.5194/bg-14-1631-2017
54. Vopat y B. Skrostzki (1986). *Power station engineering and economic*. 2da. Edición, Edición Revolucionaria, La Habana.

55. Weber W.J. (2003) Control de calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. España. Ed. Reveté, S.A. 274-295.
56. Yang, V. and B. Dziegielewski. 2007. *Water Use by Thermoelectric Power Plants in the United States. Journal of the American Water Resources Association.* (JAWRA) 43(1):160-169.
57. Younos, Tamim *et al.*, (2009). *Water Dependency of Energy Production and Power Generation Systems. VWRRC Special Report No. SR46-2009.* Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia.

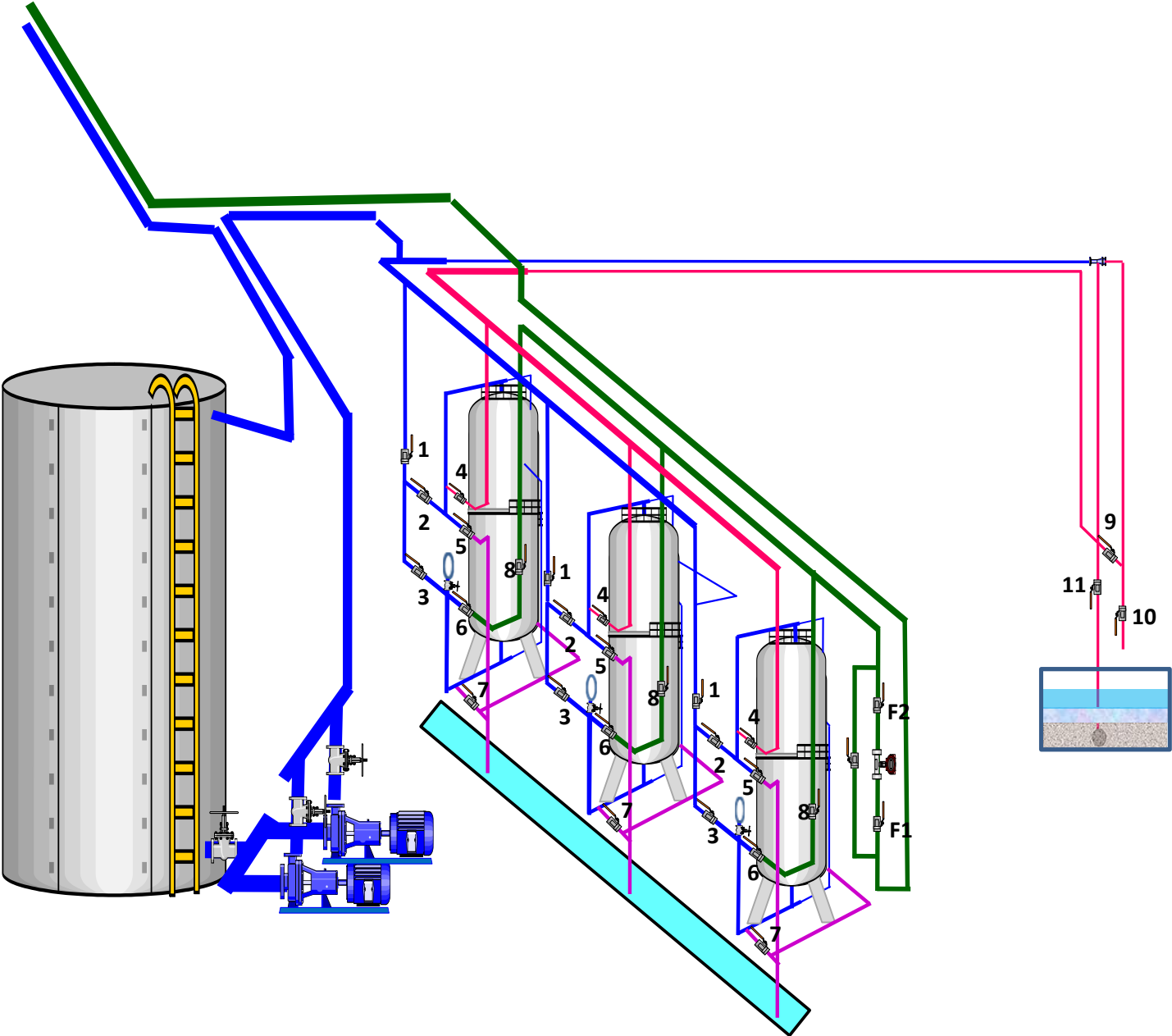
Anexos

Anexo 1: Diagrama de flujo de sala de calderas.

**Diagrama de Flujo de la Sala de Calderas
(Incluye Planta de Agua y Desgasificador Térmico).**



Anexo 2: Planta de tratamiento de agua.



Anexo 3: Variables analizadas estadísticamente.

Meses	Dureza ppm	Volumen de agua por el suavizador 1 (m ³)	Volumen de agua por el suavizador 3 (m ³)
Diciembre	381.2	134	114
Diciembre	544.8	124	141.6
Diciembre	418	106.3	124
Diciembre	420.4	81	114.5
Diciembre	472	138.5	97
Diciembre	380.1	112	120
Diciembre	428	115.5	110
Diciembre	447.9	132	135
Diciembre	446.8	163.3	123.7
Diciembre	506.1	147	104.3
Diciembre	608.6	134	128.5
Diciembre	443.6	130	108
Diciembre	470.2	126	127
Diciembre	538.9	131.5	122
Diciembre	511.2	110.4	128.2
Diciembre	261.2	132	125
Diciembre	438.5	116	125.1
Diciembre	376	128	110.1
Diciembre	512	30	126
Diciembre	410.8	47	133
Diciembre	461	115	109
Diciembre	460	105.3	122
Diciembre	436.5	106	94
Diciembre	410.8	118.6	82.5
Enero	544.1	108	105.2
Enero	462	104	126
Enero	458.9	111	70
Enero	504.1	76	112
Enero	487.7	91	102
Enero	506.1	96.6	92
Enero	536	112	115
Enero	472.3	95.6	122
Enero	434.4	128	118.5
Enero	444.6	120	110
Enero	468.2	103	127
Enero	466.1	116.6	111
Enero	463.9	112.9	109.5
Enero	666.9	126	91.8
Enero	608.6	114	115.5

Enero	479	119	108
Enero	582.6	112	131
Enero	536.1	101.5	108
Enero	505.1	145	117.5
Enero	500	112	119
Enero	426.6	130	117
Enero	443.2	128.5	54
Enero	412.2	122.5	102.5
Enero	484.5	116	103
Enero	448.3	112	115
Enero	445.2	128	118.5
Enero	441	103	127
Enero	445.2	112.9	109.5
Enero	474.1	101.5	108
Enero	478.1	145	117.5
Enero	482.3	112	119
Febrero	468..7	121.7	136
Febrero	468.7	117	107
Febrero	434.3	125	122.4
Febrero	480.2	152.3	122
Febrero	519.8	114	87.6
Febrero	547.9	104	105
Febrero	544.5	122.5	70
Febrero	529.3	121	131
Febrero	551.6	130	105.4
Febrero	348.3	113	126
Febrero	427.8	134	76
Febrero	457.4	103.5	129
Febrero	463.5	83	146
Febrero	465.6	131	136
Febrero	454.4	121	131
Febrero	508.2	125	134
Febrero	496.8	119	124
Febrero	508.5	117	124.9
Febrero	556.1	123	79
Febrero	537.1	118	116
Febrero	500.5	130	130
Febrero	511.6	121.2	83.1
Febrero	477.7	118.1	101.4
Febrero	428	132	126
Febrero	458.3	139.5	120

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4: Condiciones del régimen normal de operación en la planta de tratamiento de agua.

Parámetros	U/M	Frecuencia	Valor mínimo	Valor máximo
DT en suavizadores	p.p.m (mg/L).	Cada 30 min	0	4
DT en tanque de agua tratada	p.p.m. (mg/L)	Cada 4h	0	4
DT en suavizador después de regeneración	p.p.m (mg/L)	Cada vez que se regenere	0	4
Cl en suavizador después de regeneración	p.p.m (mg/L)	Cada vez que se regenere	Los del agua cruda	Los del agua cruda
Densidad en piscina de salmuera	g/cm ³	2h antes de cada regeneración	1.143	1.200
Densidad de salmuera a la salida del Eductor	g/cm ³	Cada vez que se regenere	1.050	1.090
Presión en la línea durante el Contralavado	MPa	En cada regeneración	0.3	0.5
Presión en la línea durante el enjuague	MPa	En cada regeneración	0.5	0.66
Presión en la línea durante la inyección de la salmuera	MPa	En cada regeneración	0.2	0.4
Presión en la línea durante el desplazamiento	MPa	En cada regeneración	0.2	0.3
Presión en línea cuando está suavizando	MPa	Cada 2h	0.5	0.66
Presión en el suavizador cuando está suavizando	MPa	Cada 2 h	0.3	0.4
Contenido de NaCl en sal clase B	%	Cada vez que se recibe	98	–
Contenido de insolubles en sal clase B	%	Cada vez que se recibe	–	0.3
Humedad en sal clase B	%	Cada vez que se recibe	–	1

Fuente: CUPET 2014.

Anexo 5: Resultados obtenidos en cada caldera de la eficiencia por método indirecto, y el vapor generado por método directo.

Generador de vapor 2. Temperatura de agua de alimentación a calderas 30°C.

Fecha	Presion en la caldera (bar)	Temperatura salida de los gases (°C)	Consumo de gas (m ³ /d)	Tiempo trabajado (horas)	Consumo gas (m ³ /h)	Vapor generado (Tn/h)	Vapor generado (Tn/dia)	Eficiencia del generador (%)
01-01-18	8.1	224.8	8516.00	23.00	370.26	4.81	110.63	89.75
02-01-18	7.5	221.6	8379.00	20.00	418.95	5.46	109.20	89.92
03-01-18	8.3	228.5	9662.00	23.00	420.09	5.46	125.58	89.55
04-01-18	8.7	218.4	2989.00	5.00	597.80	7.75	38.75	90.09
05-01-18	7.7	228.2	1832.00	4.00	458.00	5.95	23.81	89.57
06-01-18	7.6	237.1	6174.00	16.00	385.88	5.01	80.23	89.10
07-01-18	8.3	230.3	5764.00	14.00	552.00	7.17	100.43	89.46
08-01-18	7.7	225.0	7728.00	20.00	288.20	3.75	74.91	89.74
09-01-18	8.2	213.8	6369.00	21.00	303.29	3.94	82.77	90.34
10-01-18	8.7	239.5	5962.00	18.30	325.79	4.23	77.48	88.97
11-01-18	7.8	225.5	8244.00	20.00	412.20	5.36	107.13	89.71
12-01-18	8.3	230.0	11171.0	22.00	507.8	6.60	145.17	89.47
13-01-18	8.4	229.0	12337.0	24.00	514.0	6.68	160.32	89.53
14-01-18	7.6	205.0	11452.0	15.30	748.5	9.73	148.82	90.80
15-01-18	7.9	214.0	8150.00	18.30	445.4	5.79	105.91	90.33
16-01-18	8.2	215.0	8460.00	21.50	394.4	5.13	109.94	90.27
17-01-18	7.5	223.0	9620.00	16.10	597.5	7.76	125.02	89.85
18-01-18	8.3	223.0	5932.00	17.10	346.9	4.51	77.09	89.85
19-01-18	8.0	230.0	6013.00	18.30	328.6	4.27	78.14	89.47
20-01-18	8.7	225.0	6429.00	17.20	373.8	4.86	83.55	89.74
21-01-18	7.8	237.0	6952.00	15.30	454.4	5.90	90.34	89.10
22-01-18	8.8	243.0	6022.00	20.00	301.1	3.91	78.26	88.78
23-01-18	8.2	215.0	7999.00	17.30	462.4	6.01	103.95	90.27
24-01-18	8.5	243.0	6781.00	23.00	294.8	3.83	88.12	88.78
25-01-18	8.1	232.0	9197.00	22.00	418.0	5.43	119.52	89.37
26-01-18	7.5	227.0	8600.00	20.00	430.0	5.59	111.76	89.63
27-01-18	7.8	226.0	8051.00	23.00	350.0	4.55	104.63	89.69
28-01-18	7.6	207.0	9305.00	23.00	404.6	5.26	120.92	90.70
29-01-18	7.3	224.0	9575.00	11.00	870.5	11.31	124.43	89.79
30-01-18	7.9	229.0	6102.00	12.00	508.5	6.61	79.30	89.53
31-01-18	7.5	230.0	5846.00	11.30	517.3	6.72	75.97	89.47

Fuente: Elaboración propia

Generador de vapor 3. Temperatura de agua de alimentación a calderas 30°C.

Fecha	Presion en la caldera (bar)	Temperatura salida de los gases (°C)	Consumo de gas (m ³ /d)	Tiempo trabajado (horas)	Consumo gas (m ³ /h)	Vapor generado (Tn/h)	Vapor generado (Tn/dia)	Eficiencia del generador (%)
01-01-18	7.2	198.5	10769.00	24.00	448.71	5.85	140.40	91.15
02-01-18	7.6	199.3	9909.00	21.00	471.86	6.14	128.94	91.11
03-01-18	7.8	208.0	5813.00	16.00	363.31	4.73	75.68	90.64
04-01-18	7.8	197.5	11388.00	24.00	474.50	6.17	148.08	91.20
05-01-18	7.7	207.3	10720.00	23.00	466.09	6.07	139.58	90.68
06-01-18	7.5	200.0	9827.00	19.00	517.21	6.73	127.96	91.07
07-01-18	7.6	200.0	9616.00	24.00	400.67	5.22	125.21	91.07
08-01-18	7.5	197.1	8791.00	20.00	439.55	5.72	114.47	91.22
09-01-18	7.8	192.5	8645.00	21.00	411.67	5.36	112.57	91.47
10-01-18	7.1	200.0	10683.00	24.00	445.13	5.80	139.10	91.07
11-01-18	7.5	200	11186.0	24.0	466.1	6.07	145.65	91.07
12-01-18	7.5	200	11257.0	24.0	469.0	6.11	146.58	91.07
13-01-18	7.5	200	11649.0	24.0	485.4	6.32	151.68	91.07
14-01-18	7.5	202	11128.0	24.0	463.7	6.04	144.90	90.96
15-01-18	7.4	200	12007.0	24.0	500.3	6.51	156.34	91.07
16-01-18	7.6	210	10967.0	24.0	457.0	5.95	142.80	90.54
17-01-18	5.8	230	10739.0	24.0	447.5	5.83	139.83	89.47
18-01-18	7.3	195	10932.0	22.0	496.9	6.47	142.34	91.34
19-01-18	7.6	205	7859.0	17.1	459.6	5.98	102.33	90.80
20-01-18	5.8	230	9013.0	19.5	462.2	6.02	117.36	89.47
21-01-18	7.1	324	9866.0	22.3	442.4	5.76	128.46	84.47
22-01-18	8.0	210	10354.0	21.2	488.4	6.36	134.82	90.54
23-01-18	7.5	210	11098.0	24.0	462.4	6.02	144.51	90.54
24-01-18	8.0	210	11146.0	24.0	464.4	6.05	145.13	90.54
25-01-18	7.3	210	10674.0	23.0	464.1	6.04	138.98	90.54
26-01-18	7.1	193	11042.0	24.0	460.1	5.99	143.78	91.44
27-01-18	7.4	200	9579.0	22.0	435.4	5.67	124.73	91.07
28-01-18	6.9	210	11038.0	24.0	459.9	5.99	143.72	90.54
29-01-18	7.0	207	11229.0	24.0	467.9	6.09	146.21	90.70
30-01-18	7.5	199	11060.0	24.0	460.8	6.00	144.01	91.12
31-01-18	7.3	195	10862.0	24.0	452.6	5.89	141.43	91.34

Fuente: Elaboración propia

Generador de vapor 4. Temperatura de agua de alimentación a calderas 30°C.

Fecha	Presion en la caldera (bar)	Temperatura salida de los gases (oC)	Consumo de gas (m3/d)	Tiempo trabajado (horas)	Consumo gas (m3/h)	Vapor generado (Tn/h)	Vapor generado (Tn/dia)	Eficiencia del generador (%)
01-01-18	8.1	200.6	8975.00	22.00	407.95	5.30	116.60	91.04
02-01-18	8.0	195.3	7896.00	21.00	376.00	4.89	102.69	91.32
03-01-18	8.0	201.9	7767.00	20.00	388.35	5.05	101.00	90.97
04-01-18	8.2	195.0	9690.00	24.00	403.75	5.25	126.00	91.34
05-01-18	6.9	195	8110.0	21.0	386.2	5.02	105.46	91.34
06-01-18	7.5	190.0	9477.00	24.00	394.88	5.13	123.24	91.60
07-01-18	8.0	211	9461.0	24.0	394.2	5.13	123.03	90.49
08-01-18	8.2	195.0	9379.00	24.00	390.79	5.08	121.96	91.34
09-01-18	8.2	199.8	9697.00	24.00	404.04	5.25	126.10	91.08
10-01-18	9.0	200.0	7233.0	17.00	425.47	5.53	94.06	91.07
11-01-18	7.0	200.0	6308.0	15.00	420.53	5.47	82.03	91.07
12-01-18	8.5	200	9396.0	24.0	391.5	5.09	122.18	91.07
13-01-18	8.0	190	9293.0	24.0	387.2	5.04	120.85	91.60
14-01-18	6.9	195	9536.0	24.0	397.3	5.17	124.01	91.34
15-01-18	7.8	199	4776.0	10.0	477.6	6.21	62.11	91.12
16-01-18	8.2	200	7559.0	18.3	413.1	5.37	98.30	91.07
17-01-18	7.6	203	6175.0	16.0	385.9	5.02	80.30	90.91
18-01-18	8.4	203	7083.0	18.0	393.5	5.12	92.11	90.91
19-01-18	8.1	201	9650.0	24.0	402.1	5.23	125.49	91.02
20-01-18	8.6	204	9703.0	24.0	404.3	5.26	126.18	90.86
21-01-18	7.9	202	9905.0	24.0	412.7	5.37	128.80	90.96
22-01-18	8.8	207	9978.0	24.0	415.8	5.41	129.75	90.70
23-01-18	8.6	207	8328.0	18.0	462.7	6.02	108.30	90.70
24-01-18	8.0	211	7883.0	18.0	437.9	5.69	102.51	90.49
25-01-18	7.5	212	9432.0	24.0	393.0	5.11	122.65	90.43
26-01-18	7.7	205	9800.0	24.0	408.3	5.31	127.44	90.80
27-01-18	7.6	203	8614.0	22.0	391.5	5.09	112.02	90.80
28-01-18	7.4	211	9836.0	24.0	409.8	5.33	127.91	90.49
29-01-18	8.1	211	9963.0	24.0	415.1	5.40	129.56	90.49
30-01-18	7.5	213	7941.0	19.0	417.9	5.43	103.26	90.38
31-01-18	7.5	212	9432.0	24.0	393.0	5.11	122.65	90.43

Fuente: Elaboración propia

Generador de vapor 5. Temperatura de agua de alimentación a calderas 30°C.

Fecha	Presion en la caldera (bar)	Temperatura salida de los gases (oC)	Consumo de gas (m3/d)	Tiempo trabajado (horas)	Consumo gas (m3/h)	Vapor generado (Tn/h)	Vapor generado (Tn/dia)	Eficiencia del generador (%)
01-01-18	7.9	252.6	10310.00	24.00	429.58	5.59	134.16	88.27
02-01-18	7.6	278.5	9815.00	24.00	408.96	5.32	127.68	86.89
03-01-18	8.3	287.4	10375.00	24.00	432.29	5.61	134.64	86.42
04-01-18	8.3	259.0	10849.00	24.00	452.04	5.87	140.88	87.93
05-01-18	7.6	261.3	10388.00	24.00	432.83	5.62	135.00	87.81
06-01-18	8.3	287.4	10440.00	24.00	435.00	5.65	135.67	86.42
07-01-18	8.0	264.9	9532.00	24.00	397.17	5.16	123.87	87.62
08-01-18	7.9	266.3	9734.00	24.00	405.58	5.27	126.50	87.54
09-01-18	8.5	261.0	10194.00	24.00	424.75	5.52	132.48	87.82
10-01-18	8.4	260.3	10205.00	24.00	425.21	5.53	132.62	87.86
11-01-18	7.5	264.8	9912.00	24.00	413.00	5.37	128.81	87.62
12-01-18	8.3	269	10623.0	24.0	442.6	5.75	138.05	87.40
13-01-18	8.1	257	11044.0	24.0	460.2	5.98	143.52	88.04
14-01-18	8.0	264.9	10660.00	24.00	444.17	5.77	138.53	87.62
15-01-18	7.9	266.3	10067.00	24.00	419.46	5.45	130.83	87.54
16-01-18	8.5	261.0	10251.00	24.00	427.13	5.55	133.22	87.82
17-01-18	8.4	260.3	10272.00	24.00	428.00	5.56	133.49	87.86
18-01-18	7.7	284	9440.0	23.5	401.7	5.22	122.68	86.60
19-01-18	7.3	262	10384.0	24.0	432.7	5.62	134.94	87.77
20-01-18	7.2	298	10307.0	24.0	429.5	5.58	154.00	85.86
21-01-18	7.7	284	10806.0	24.0	450.3	5.85	140.43	86.60
22-01-18	7.3	262	11300.0	24.0	470.8	6.12	146.85	87.77
23-01-18	7.2	298	10867.0	24.0	452.8	5.88	145.00	85.86
24-01-18	7.2	270	10708.0	23.0	465.6	6.05	139.16	87.35
25-01-18	7.5	244	10245.0	23.5	436.0	5.67	133.14	88.73
26-01-18	7.5	242	10160.0	24.0	423.3	5.50	132.03	88.84
27-01-18	7.2	270	9263.0	23.1	401.0	5.21	120.38	87.35
28-01-18	7.5	240	10670.0	24.0	444.6	5.78	138.66	88.94
29-01-18	7.1	270	10771.0	24.0	448.8	5.83	139.97	87.35
30-01-18	7.9	270	9737.0	24.0	405.7	5.27	126.54	87.35
31-01-18	7.1	257	8985.0	17.5	513.4	6.67	116.76	88.04

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Condensado recuperado por la planta en el mes de enero.

Fecha	Vapor producido	Agua tratada (m3/d)	Condensado recuperado (m3/d)
01-01-18	501.55	213.20	288.35
02-01-18	468.30	230.00	238.30
03-01-18	436.74	202.80	233.94
04-01-18	526.56	228.60	297.96
05-01-18	403.50	193.00	210.50
06-01-18	466.82	188.60	278.22
07-01-18	446.74	227.00	219.74
08-01-18	463.12	217.60	245.52
09-01-18	453.67	246.50	207.17
10-01-18	442.95	230.00	212.95
11-01-18	463.32	230.00	233.32
12-01-18	551.70	227.60	324.10
13-01-18	576.08	222.40	353.68
14-01-18	555.98	217.80	338.18
15-01-18	454.85	229.50	225.35
16-01-18	483.95	227.00	256.95
17-01-18	478.35	243.00	235.35
18-01-18	433.90	209.50	224.40
19-01-18	440.69	262.50	178.19
20-01-18	480.83	231.00	249.83
21-01-18	487.77	247.00	240.77
22-01-18	489.38	211.00	278.38
23-01-18	501.44	225.00	276.44
24-01-18	474.60	219.00	255.60
25-01-18	514.01	227.00	287.01
26-01-18	441.74	246.50	195.24
27-01-18	461.49	230.00	231.49
28-01-18	530.92	222.40	308.52
29-01-18	539.88	209.50	330.38
30-01-18	452.79	262.50	190.29
31-01-18	456.50	231.00	225.50
Promedio	480.00	226.08	253.92

Fuente: Elaboración propia