

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

CARRERA DE MECÁNICA INDUSTRIAL

MAESTRIA EN GESTIÓN DE MANTENIMIENTO.

TESIS DE GRADO



MANTENIMIENTO DE LOS TUBOS DE LAS CALDERAS GENERADORAS  
DE VAPOR Y LA MITIGACION DE LOS GASES RESIDUALES.

Maestrante: Ing. Cesar Ruíz Ortíz

TUTOR: MSc. Ing. Carlos E. Andrade Mallea

La Paz, Bolivia.

Marzo- 2013

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE TECNOLOGÍA

CARRERA DE MECÁNICA INDUSTRIAL

Tesis de Grado:

MANTENIMIENTO DE LOS TUBOS DE LAS CALDERAS GENERADORAS  
DE VAPOR Y LA MITIGACIÓN DE LOS GASES RESIDUALES.

Presentada por: Ing. Cesar Ruiz Ortíz

Para optar por el grado académico de: Magister en Ciencias

Nota numeral:.....

Nota literal:.....

Ha sido: aprobado con.....

Director de la Carrera de Mecánica Industrial: Lic. Gonzálo Gerl Pardo

Tutor: MSc. Ing. Carlos Andrade Mallea

Tribunal: MSc. Ing. Carlos Herbas Camacho

Tribunal: MSc. Lic. Jhonny Tenorio Misto.

## AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Mayor de San Andrés por la oportunidad que me dio de aportar con un grano de arena al conocimiento de profesionales y otras personas a través de esta obra.

A la carrera de Mecánica Industrial y a la Facultad de Tecnología por acogerme en sus aulas.

A mi esposa e hijos por su apoyo incondicional en este periodo de mi existencia, a quienes los amo y les deseo mucha dicha en la vida.

A mi hija Daniela por su gran colaboración y aporte en el desarrollo de esta Tesis de Grado.

A mi tutor, por su apoyo y orientación en este trabajo.

## RESUMEN.

Se realizó una investigación experimental del mantenimiento de aguas de las calderas, con el objetivo de reducir y evitar los tres principales problemas asociados a la generación de vapor.

- La formación de incrustaciones en los tubos y superficies calientes de la caldera.
- La corrosión.
- Los arrastres.

Para conseguir estos objetivos, el agua dura de aporte ha sido sometida a un mantenimiento externo, utilizando el proceso de intercambio iónico para reducir la presencia de contaminantes a concentraciones convenientes. Para contrarrestar el efecto de los contaminantes residuales que ingresan a la caldera generadora de vapor, se ha aplicado el tratamiento interno, empleando el programa de fosfatos coordinado, el programa solubilizante con dispersante y el tratamiento anticorrosivo.

Los mencionados programas han permitido dispersar los sólidos que se forman en el interior de la caldera, mantener los tubos y superficies calientes libres de incrustaciones, aumentar la alcalinidad para evitar la corrosión, ahorrar el combustible utilizado en la generación de vapor y no permitir el sobrecalentamiento de los tubos.

Otro elemento que se ha tomado en cuenta en el control de la calidad del agua en el ciclo de vaporización- condensación, para que no exista arrastre de sólidos es la purga de una parte del agua de la caldera para mantener las concentraciones máximas admisibles.

Para el control de la calidad del agua de alimentación y del agua del interior de las calderas, se ha utilizado la UNE 9-075-78, la cual es una norma española y las informaciones químicas Merck para calderas de baja presión.

Los gases residuales en especial el  $CO_2$ , contaminantes del medio ambiente, causantes del efecto invernadero y del calentamiento global de la tierra, que se producen durante la combustión en la producción de vapor han sido transformados en productos inocuos, como ser agua carbonatada y/o carbonato de calcio.

El trabajo permitirá disponer a las empresas de un método de mantenimiento químico eficaz, para conservar limpios de incrustaciones sus sistemas de generación de vapor y el de preservar el medio ambiente que los rodea.

## ABSTRACT

An experimental investigation was carried out on the maintenance of boiler water, with the aim of reducing and preventing the three main problems associated with steam generation.

- The formation of incrustations in pipes and hot surfaces of the boiler.
- Corrosion.
- Entrainment of particles.

To achieve these objectives, the hard water supply has undergone an external maintenance, using the ion exchange process to reduce the presence of contaminants to suitable concentrations. To counteract the effect of residual contaminants entering the steam generating boiler, an internal treatment was applied using the coordinate phosphate program, a solubilizing program with dispersant and rustproofing.

The above programs have effectively dispersed the solids that form inside the boiler, maintain pipes and hot surfaces free of incrustations, increase alkalinity to prevent corrosion, save fuel used in steam generation, and not allow overheating of pipes.

Another element that has been taken into account in quality control of the water in the cycle of vaporization and condensation, so that there is no entrainment of solids, is the purging of the water of the boiler to maintain maximum allowed concentrations.

For quality control of the water supply and the water inside of the boiler, we used UNE 9-075-78, which is a Spanish standard, and Merck chemical information for low pressure boilers.

Waste gases especially  $CO_2$ , polluting the environment, causes of the greenhouse effect and global warming of the earth, which are produced during the combustion of fuel in the steam production have been transformed into harmless products such as carbonated water and/or calcium carbonate.

This work will provide companies an effective method of chemical maintenance to keep steam generating systems free from incrustations and help preserve the environment around them.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.	IV
Abstract.	VI
Índice.	VIII
Índice de tablas.	XIV
Índice de figuras.	XVII
1. Introducción	1
1.1. Calderas	1
1.2. Riesgos, seguridad en calderas	1
1.2.1. Factores de riesgo en las calderas	1
1.2.2. Descripción de factores de riesgo en las calderas	1
1.2.3. Factores de riesgo en el mantenimiento de calderas	2
1.3. Prevención	3
1.4. Seguridad	3
1.5. Clasificación de las calderas	5
1.5.1. Calderas de tubo de humo (pirotubulares)	6
1.5.2. Calderas de tubos de agua (acuotubulares)	6

2. Marco Teórico	7
2.1. Mantenimiento preventivo	7
2.2. Mantenimiento correctivo	8
2.3. Mantenimiento predictivo	9
3. Antecedentes	11
4. Justificación	11
5. Objetivos	12
5.1. Objetivo general	12
5.2. Objetivos específicos	12
6. Hipótesis	13
7. Metodología de la investigación	14
8. Plan de mantenimiento químico preventivo para los tubos de calderas generadoras de vapor de agua	15
8.1. Dureza	16
8.2. Alcalinidad	17
8.3. Sólidos disueltos	17
8.4. Sólidos en suspensión	18
8.5. Sólidos totales	18
8.6. Sulfatos	19
8.7. Nitratos	19

8.8. Sílice	20
8.9. Bicarbonatos y carbonatos	20
8.10. Calcio	20
8.11. Magnesio	21
8.12. Fosfatos	21
8.13. Hierro	21
8.14. Proceso unitario de tratamiento de aguas	22
8.15. Mantenimiento del agua fuera de la caldera generadora de vapor	22
8.16. Mantenimiento interno del agua de la caldera del Hotel Radisson	32
9. Plan de mantenimiento químico preventivo para los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera generadora de vapor de agua del Hotel Plaza	48
10. Plan de mantenimiento correctivo para los tubos de calderas generadoras de vapor de agua	62
10.1. Extracción de los tubos viejos con incrustaciones	62
10.2. Instalación de los tubos nuevos	67
11. Plan de mantenimiento predictivo	75
12. Comparación de costos entre el plan de mantenimiento químico preventivo y el mantenimiento correctivo de los tubos que presentan incrustaciones poco críticas de la caldera de vapor	76

ubicada en el Hotel Plaza

13. Mitigación de los gases residuales generados en la producción de vapor	78
13.1. Producción de gases, ecuaciones químicas	78
13.2. Determinación de los gases de combustión en Kg- mol	78
13.3. Cálculo de la presión de trabajo	80
13.4. Cálculo de la masa de agua necesaria para el proceso de enfriamiento de los gases de combustión	80
13.5. Cálculo de la masa de agua necesaria para llevar a cabo el proceso de absorción	82
13.5.1. Producción de carbonato de calcio ( $CO_3Ca$ )	85
13.5.2. Cantidad de hidróxido de calcio requerido	86
13.5.3. Cálculo del diámetro de la torre de absorción	86
13.6. Balance de materia y energía necesarias en el diagrama de flujo del equipo de mitigación de gases del proceso por hora de operación	88
14. Comprobación de la hipótesis con la que partió la presente investigación	89
15. Conclusiones	91

15.1.	Protección de los tubos y superficies calientes de la caldera generadora de vapor	91
15.2.	Transformación de los gases de combustión producidos en la generación de vapor	91
15.3.	Beneficio para las empresas generadoras de vapor de agua	92
16.	Recomendaciones	93
17.	Referencias bibliográficas	95
18.	Anexos	97
18.1.	Control y análisis químico de los compuestos	97
18.1.1.	Alcalinidad	97
18.1.2.	Determinación de la dureza total	100
18.1.3.	Dureza en la muestra de agua	101
18.1.4.	Sólidos disueltos	104
18.1.5.	Determinación de sólidos en suspensión	104
18.1.6.	Determinación de fosfatos en aguas de calderas generadoras de vapor	105
18.1.7.	Test de fosfatos	108

18.1.8.	Determinación del pH de las muestras	108
18.2.	Instrumentos de control y equipos utilizados	109
18.3.	Normas de control utilizadas	114
18.3.1.	Informaciones químicas MERCK	114
18.3.2.	Norma UNE 9-075-78 para aguas de calderas	115

## ÍNDICE DE TABLAS

8.1. Análisis de aguas	23
8.2. Análisis de agua potable	23
8.3. Saturación de la resina con iones calcio y magnesio	31
8.4. Reactivos químicos utilizados en el ablandamiento residual del agua para el mantenimiento de los tubos dentro de la caldera por mes de operación	42
8.5. Concentraciones resultantes del mantenimiento químico por mes	44
8.6. Mantenimiento químico de los tubos considerando valores promedio por mes	45
8.7. Control coordinado del pH-fosfato del agua de la caldera	46
9.1. Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor, en el primer mes	52
9.2. Concentraciones de productos dentro de la caldera en el primer mes de mantenimiento	53
9.3. Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el segundo mes	54

9.4. Concentraciones de productos dentro de la caldera en el segundo mes de mantenimiento	55
9.5. Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el tercer mes	56
9.6. Concentraciones de productos dentro de la caldera en el tercer mes de mantenimiento	57
9.7. Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el cuarto mes	58
9.8. Concentraciones de productos dentro de la caldera en el cuarto mes de mantenimiento	59
9.9. Consumo de combustible durante el proceso de desincrustación	60
9.10. Consumo de reactivos desincrustantes durante el proceso de mantenimiento	60
12.1. Costos de mantenimiento preventivo de los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera generadora de vapor del Hotel Plaza	76
12.2. Costos del mantenimiento correctivo de los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera de vapor del Hotel Plaza	77

13.1. Composición química del gas licuado de petróleo	78
13.2. Peso de los componentes del gas licuado	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

8.1. Ablandador de agua del Hotel Radisson	30
8.2. Dureza con caudal de agua	32
8.3. Caldera de tubos de humo	33
8.4. Reactivos utilizados respecto al tiempo de operación por mes	43
8.5. Control coordinado pH-fosfato	47
9.1. Caldera generadora de vapor	48
10.1. Tubos de caldera en mal estado	62
10.2. Corte del reborde del lado de la caja	63
10.3. Contracción del extremo del tubo	63
10.4. Corte del reborde soldado del tubo	64
10.5. Corte de todo el contorno del tubo	64
10.6. Apertura del extremo contraído del tubo	65
10.7. Eliminación del extremo soldado del tubo	65
10.8. Contracción del rebordeado	66
10.9. Golpeado del tubo para eliminar incrustaciones	66

10.10 Lijado de la superficie de apoyo del tubo	67
10.11 Introducción del tubo en la superficie de apoyo	68
10.12 Acuñado del tubo	68
10.13 Cortado del tubo	69
10.14 Colocado del tubo en las placas de los tubos	69
10.15 Acuñado del tubo	70
10.16 Colocado del avellanador en el lugar correcto	70
10.17 Lubricado del avellanador	71
10.18 Apretado del tubo	71
10.19 Martillado del tubo	72
10.20 Desplazamiento del rebordeador	72
10.21 Avellanador del otro extremo del tubo	73
10.22 Ajuste del tubo	73
10.23 Soldado del tubo en el hogar	74
18.2.1 Conductivímetro	109

18.2.2 pH metro	109
18.2.3 Caldera	109
18.2.4 Vernier	110
18.2.5 Espectrofotómetro de absorción UV visible	110
18.2.6 Equipo de absorción	111
18.2.7 Intercambio de calor	112
18.2.8 Balanza analítica	112
18.2.9 Equipo de titulación	113

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1. Calderas.

Las calderas se utilizan en la industria para generar calor. Se realizan mediante combustibles que transforman la energía en calor, que generalmente se transporta en forma de líquido o vapor. Son aparatos a presión. Pueden ser calderas de agua caliente, de agua sobrecalentada, de fluido térmico o de vapor.

### 1.2. Riesgos, seguridad en calderas.

Las calderas y recipientes a presión y sus sistemas de tuberías plantean accidentes por explosiones por exceso o reducción excesiva de la presión interna, o por falta de la resistencia de las paredes o sus componentes a cualquier presión.

Estas explosiones provocan daños por la propagación de la onda de presión liberada, humos y escapes de fluidos y por los fragmentos que salen proyectados.

#### 1.2.1. Factores de riesgo en las calderas.

Estos pueden ser: físicos, químicos, biológicos, fallas metalúrgicas en las partes de presión de la caldera.

#### 1.2.2. Descripción de los factores de riesgo.

Físicas: se pueden evaluar como aquellos riesgos generados por la caldera como son: ruido, radiaciones, temperaturas extremas, vibraciones, presiones anormales.

Estas se pueden presentar debido al mal manejo de la misma o falta de inspecciones y rutinas de mantenimiento preventivo.

Químicas: estas se generan dentro de la caldera por falta de rutinas de mantenimiento o por falta de tratamiento de las aguas que circulan dentro de ella; estos pueden ser: polvos orgánicos, polvos inorgánicos, humos, vapores, líquidos, gases.

Biológicos: se pueden catalogar como aquellos riesgos que sufre el operario dentro del área de trabajo (área de calderas), debido a las instalaciones o ambiente de trabajo; estos pueden ser: virus, bacterias, parásitos, hongos, etc.

Fallas metalúrgicas. Pueden ser:

Sobrecalentamiento a corto plazo.

Sobrecalentamiento a largo plazo.

Corrosión.

Fragilidad.

Soldadura en metales disímiles.

Grafitización.

Fatiga térmica.

Erosión.

Tensión bajo presión.

1.2.3. Factores de riesgo en el mantenimiento de calderas

Ausencia del plan de mantenimiento (diario, semanal, mensual, anual).

Inexistencia de manuales de mantenimiento y de reparaciones.

Personal no certificado ni acreditado para esta labor.

Ausencia de rutinas de chequeo.

Ausencia de pruebas de seguridad.

Ausencia de inspecciones internas y externas del equipo.

Mala práctica en ensayos destructivos.

Mala práctica en ensayos no destructivos.

Uso de herramientas y elementos de seguridad deficientes o mal calibrados.

### 1.3. Prevención.

Se basa en el adecuado mantenimiento, regulación y supervisión de la caldera y sus partes.

Debe desarrollarse un programa técnico de mantenimiento especialmente evitando los riesgos de incrustaciones y corrosiones en los tubos.

Las calderas deben instalarse en los lugares donde en caso de averías, incendios, explosiones, las consecuencias sean mínimas.

La prevención y protección correspondiente al tipo de productos químicos usados, ya sea por la toxicidad, o por el riesgo de quemaduras.

Inspecciones periódicas de las calderas por personal competente.

### 1.4. Seguridad.

Los trabajadores que usan y hacen mantenimiento a las calderas saben que estas son potencialmente peligrosas. Las calderas son recipientes cerrados con quemadores de gas o electricidad que calientan agua para generar vapor. El vapor está a presión y sobrecalentado, y se usa para generar electricidad, para calefacción o para otros propósitos industriales. Aunque las calderas normalmente están equipadas con una válvula de alivio de presión. Si la caldera no puede resistir la presión, la energía que

contiene el vapor se libera instantáneamente. Esta combinación de metal explotando y vapor sobrecalentado puede ser extremadamente peligrosa.

Solo trabajadores autorizados y debidamente capacitados deben operar las calderas.

Los trabajadores deben conocer bien el manual de operación y las instrucciones del fabricante de la caldera. Los operadores de caldera deben inspeccionar las calderas con frecuencia en búsqueda de fugas, combustión correcta, funcionamiento de los dispositivos de seguridad e indicadores, así como otras funciones.

Muchas calderas viejas, así como las tuberías de vapor o agua caliente pueden tener recubrimientos aisladores. Los trabajadores deben inspeccionar esas áreas periódicamente para asegurarse de que los materiales no estén dañados, que no se estén descascarando y que no estén deteriorados. Deben reportarse la existencia de materiales dañados y deben repararse o eliminarse de inmediato por un contratista certificado para trabajos en recubrimientos aisladores. Indicios de superficies rajadas, prominencias, corrosión u otras deformidades deben ser reparados de inmediato por un técnico autorizado. Los registros detallados de la operación y el mantenimiento de la caldera pueden ayudar a asegurar su seguridad.

Las calderas deben siempre conectarse lentamente, y nunca se debe inyectar agua fría a un sistema caliente. Cambios súbitos de temperatura pueden torcer o quebrar la caldera. Debido a que muchas calderas queman gas natural, gas licuado, combustible diesel, es necesario tomar precauciones especiales. Los operadores de caldera deben asegurar que el sistema de combustible, incluyendo las válvulas, tuberías y tanques, estén funcionando correctamente y sin fugas. Para prevenir

explosiones en la caldera, es imperativo que los operadores purguen la caldera antes de encender el quemador. Los trabajadores deben verificar la relación de aire a combustible, la condición del tiro y la llama para asegurarse de que ésta no sea demasiado alta ni que eche humo. Los sistemas de ventilación también deben inspeccionarse y mantenerse para asegurar que los gases productos de la combustión no se acumulen en la sala de calderas. Asegurarse de que haya suficiente iluminación y que cualquier lámpara defectuosa se repare de inmediato. Debido a que las calderas tienen superficies calientes, debe haber suficiente espacio a su alrededor para que los trabajadores puedan moverse en la sala de calderas. Las salas de calderas pueden ser ruidosas, por lo tanto el área debe estar identificada como tal y los trabajadores deben usar protectores para los oídos cuando trabajen dentro de la sala de calderas.

Cuando el personal especializado entre en una caldera para efectuar reparaciones o tareas de mantenimiento deben tratarla como un espacio cerrado que requiere permisos.

Cuando se para una caldera para reparaciones, todas las fuentes de energía deben desconectarse usando procedimientos de bloqueo (Lock-out/Tag-out), y los residuos de presión en tuberías de vapor, agua y combustible deben aliviarse siguiendo los procedimientos correctos de vaciado o bloqueo, o taponamiento.

#### 1.5. Clasificación de las calderas.

Por sus características las calderas se clasifican, generalmente como calderas de tubo de humo (pirotubulares), o de tubos de agua (acuotubulares).

#### 1.5.1. Calderas de tubo de humo (pirotubulares).

En las calderas de tubos de humo, la llama y los productos de combustión, pasan a través de los tubos y el agua caliente, rodea el hogar interno y los bancos de tubos.

Generalmente las unidades de tubos de humo (pirotubulares), se suministran para aplicaciones de hasta 13500 Kg. De vapor/hora, operan hasta una presión máxima de 17 atmósferas.

#### 1.5.2. Calderas de tubos de agua (acuotubulares)

Las calderas de tubos de agua se presentan en una gran variedad de diseños y de configuraciones, en este tipo de unidad, los productos de combustión rodean los bancos de los tubos y el agua circula por el interior de dichos tubos, los cuales tienen una inclinación vertical hacia un recipiente o colector de vapor localizado en el punto más alto de la caldera. Algunos fabricantes ofrecen calderas con tubos rectos, mientras que otros ofrecen con tubos doblados.

Las calderas de tubos de agua para uso en aplicaciones industriales se ofrece en capacidades de hasta casi 450000 Kg. de vapor/hora. Operan hasta una presión máxima de 218 atmósferas, con rangos en las temperaturas desde vapor saturado hasta 540°C.

## 2. MARCO TEÓRICO.

Dado el actual contexto económico, del cual somos partícipes, en el que se vive un periodo de grandes transformaciones y cambios que apuntan hacia una integración y participación de las economías de mercado a nivel internacional. Mantenimiento se constituye en un pilar fundamental para alcanzar niveles de calidad y competitividad que exige el mercado actual.

Para efectuar un programa o sistema correcto de mantenimiento se debe efectuar el dimensionamiento del mismo que permita establecer las estrategias de mantenimiento, la cantidad de personal, el presupuesto destinado a este fin y los esfuerzos en orden de prioridad dedicado a la realización del servicio.

El resultado del trabajo de dimensionamiento, permitirá emplear diferentes estrategias o técnicas de mantenimiento definidas de acuerdo a normas de mantenimiento, estas técnicas son:

### 2.1. Mantenimiento preventivo.

Es un conjunto de técnicas que tiene como finalidad disminuir y/o evitar las reparaciones de los ítems con tal de asegurar su total disponibilidad y rendimiento al menor costo posible. Para llevar a cabo esta práctica se requiere rutinas de inspección y renovación de los elementos malogrados y deteriorados.

Las inspecciones son los procesos por el cual se procede al desmontaje total o parcial del equipo a fin de revisar el estado de sus elementos. Durante la inspección

se reemplazan aquellos elementos que no cumplan con los requisitos de funcionamiento de la máquina.

Los elementos también pueden ser sustituidos tomando como referencia su vida útil o su tiempo de operación con tal de reducir su riesgo de falla.

El mantenimiento preventivo también está comprendido por el llamado mantenimiento rutinario, conjunto de técnicas que sin llegar al desmontaje de los equipos los conserva en el mejor estado posible por medio de engrases, dosificaciones químicas, limpiezas, sustituciones periódicas, etc.

El mantenimiento preventivo se aplicará en aquellos casos en que éste sea económicamente rentable frente a un programa de reparaciones de tipo correctivo.

Los programas de mantenimiento preventivo requieren también que exista una prioridad en función de la vida esperada de algunos componentes y de su importancia para el funcionamiento del conjunto.

## 2.2. Mantenimiento correctivo.

Es una forma de mantenimiento del sistema que se realiza después de un fallo o problema que surge en un sistema, con el objetivo de restablecer la operatividad del sistema. En algunos casos puede ser imposible de predecir o prevenir un fracaso, lo que hace el mantenimiento correctivo la única opción. En otros casos un sistema de mantenimiento deficiente puede exigir la reparación como consecuencia de la falta de mantenimiento preventivo, y en algunas situaciones la gente puede optar por centrarse en correctivas, en lugar de preventivas, reparaciones como parte de una estrategia de mantenimiento.

El mantenimiento está definido por la EFNMS (Federación Europea de Asociaciones Nacionales de Mantenimiento), como “el conjunto de actividades técnicas y administrativas cuya finalidad es conservar o restituir un sistema, subsistema, instalación, planta, máquina, equipo, estructura, edificio, conjunto, componente o pieza en o a la condición que le permita desarrollar su función” (Francisco Solar Preciado, 2007).

### 2.3. Mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo es el conjunto de técnicas que permiten; reduciendo los costes del programa de mantenimiento tradicional, preventivo y correctivo, asegurar la disponibilidad y rendimiento de los elementos que componen la planta. Este tipo de mantenimiento se basa en la realización de un seguimiento del estado del equipo mediante monitorizaciones que permiten realizar sustituciones y reparaciones cuando estos no se encuentren en buen estado, sin necesidad de realizar ciertas inspecciones, y reducir los fallos imprevistos por medio de un programa de detección de anomalías.

Este tipo de programa de mantenimiento reporta un gran ahorro de costes ya que además de detectar los fallos de manera precoz permite programar con suficiente antelación el tiempo de reparación y los suministros y mano de obra que requerirá la tarea. Dado además que el mantenimiento predictivo se basa en la monitorización de los parámetros que están relacionados con fallos en los equipos, este puede aprenderse a medida que se opera la maquinaria, de manera que los fallos reiterados pueden llegar a erradicarse.

Estas técnicas requieren que los elementos gocen de indicadores suficientemente relacionados con el estado del equipo, además de la posibilidad de que estos sean vigilados y medidos durante su vida útil. Su principal inconveniente es la dificultad que conlleva obtener una respuesta clara y segura ya que no existe ningún parámetro ni conjunto de parámetros que revele a la perfección el estado del equipo. La vigilancia continua no es viable, tampoco, en la mayoría de elementos y solo supone una ventaja realizada en elementos muy críticos por lo que en general la vigilancia resulta periódica.



### 3. ANTECEDENTES.

En algunas industrias donde se genera vapor de agua, no se efectúa la eliminación total de la dureza del agua de reposición que se utiliza, por tanto, no existe una consciencia clara y generalizada sobre la importancia y los aspectos que tienen relación con la problemática de llevar a cabo el mantenimiento del agua de manera adecuada, lo que ocasiona incrustaciones en los tubos y superficies calientes de las calderas generadoras de vapor, situación que provoca pérdidas apreciables de carácter económico, debido al aumento de la resistencia a la transferencia de calor, disminución de la eficiencia y vida útil de la caldera y el aumento de consumo de combustible.

### 4. JUSTIFICACIÓN.

El mantenimiento de aguas para eliminar la dureza tanto externa como interna de las calderas generadoras de vapor preservan la estructura de los tubos, no permiten la deposición de sustancias extrañas formadoras de películas en la superficie de los tubos y en lugares donde existe mayor transferencia de calor, mantiene la eficacia de la transmisión de calor, evitan el recalentamiento del metal, la corrosión y el arrastre de los sólidos hacia los condensados. Forman y dispersan otros sólidos que permanecen suspendidos en la masa de agua como lodos, que no se adhieren a las

paredes y tubos de la caldera, su concentración se controla mediante un programa de purgas.

## 5. OBJETIVOS.

### 5.1. Objetivo general.

Desarrollar planes de mantenimiento, para conservar los tubos de las calderas de vapor limpios de incrustaciones y mitigar los gases residuales formados en la generación de vapores.

### 5.2. Objetivos específicos.

- Utilizar el plan de mantenimiento químico preventivo para los tubos de la caldera generadora de vapor de agua.
- Utilizar el mantenimiento correctivo en las calderas de vapor de agua cuando los tubos tienen incrustaciones críticas.
- Emplear el plan de mantenimiento químico preventivo a los tubos de las calderas de vapor que tienen un determinado espesor no crítico de incrustaciones debido a un inadecuado control de las sustancias que lo causan.
- Mitigar los gases de dióxido de carbono que se producen durante la obtención de vapor en las calderas debido al proceso de combustión.
- Comparar los costos entre el mantenimiento químico preventivo y el mantenimiento correctivo de los tubos de la caldera de vapor ubicado en el Hotel Plaza para un determinado tiempo de operación.

## 6. HIPÓTESIS.

El agua que se utiliza para la generación de vapor, tiene sustancias químicas como ser calcio, magnesio, etc., que dañan la estructura de los tubos de las calderas produciendo incrustaciones en los mismos.

La dureza debido a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio mide la capacidad del agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones en calderas.

El agua potable que se utiliza en la generación de vapor es dura.

El proceso de intercambio iónico reduce la dureza de agua a un valor mínimo.

El empleo de programa de fosfatos coordinado, el programa solubilizante con dispersante, el tratamiento anticorrosivo y las purgas, eliminan la dureza residual del agua, evitan incrustaciones en los tubos y superficies calientes de las calderas, dispersan las sustancias extrañas formadas, aumentan la salinidad del agua y reducen los sólidos formados.

Al no efectuarse el mantenimiento químico se producen incrustaciones en los tubos y superficies calientes en la caldera, corrosión y arrastre de sólidos hacia los condensados.

Los gases residuales contaminantes del medio ambiente y causantes del efecto invernadero que se producen durante la combustión en la generación de vapor, son transformados en productos no contaminantes.

## 7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

A partir de una investigación experimental se pretende llevar a cabo el mantenimiento de los tubos y superficies calientes de la caldera generadora de vapor, para tal propósito se reducirá el espesor de la capa continua formada por sustancias extrañas incrustadas en la superficie de los tubos, se cambiarán los tubos inutilizados, se procederá a reducir la dureza del agua para evitar que los tubos y superficies calientes sufran incrustaciones y rupturas. Se llevará a cabo la comparación de costos entre el mantenimiento de los tubos con incrustaciones poco críticas y el cambio de los mismos.

Se mitigará el efecto de los gases producidos en la generación de vapor de agua en la caldera, debido al proceso de combustión, transformándolos en productos inocuos.

## 8. PLAN DE MANTENIMIENTO QUÍMICO PREVENTIVO PARA LOS TUBOS DE CALDERAS GENERADORAS DE VAPOR DE AGUA.

El agua perfecta para alimentar calderas es aquella que no deposita sustancias incrustantes, no corroe al metal, no ocasiona arrastres ni espumas, no contamina el vapor y en general que no afecte a las propiedades mecánicas de la caldera. Para lograr este efecto existen diversos métodos de tratamiento de agua, los cuales se formulan en base a un análisis químico, el cual de paso también sirve para rectificar periódicamente las dosificaciones y tratamientos que se hagan sobre las aguas.

El agua que se utiliza para la generación de vapor tiene sustancias químicas como ser: calcio, magnesio, etc. Que dañan la estructura de los tubos produciendo incrustaciones en los mismos.

Antes de proceder a una descripción de los procesos disponibles para mejorar la calidad de las aguas, es conveniente revisar los parámetros utilizados para definir su calidad. Algunos de estos parámetros se utilizan en el control de los procesos de tratamiento realizando mediciones de forma continua y discreta.

Los parámetros se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: físicos, químicos, biológicos y radiológicos.

Solo se tomarán en cuenta los parámetros químicos, tales como:

pH

El pH es una medida de la concentración de iones, hidrógeno y se define como  $\text{pH} = -\log (1/ H^+)$ . Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua.

La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.

Su medición se realiza fácilmente con un pH metro bien calibrado, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indican el pH. Los valores del pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues varían con ella.

#### 8.1. Dureza.

La dureza, debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones, afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones en calderas, tubos de calderas, intercambiadores de calor, etc.

Existen distintas formas de dureza.

Dureza total o título hidrotimétrico, TH. Mide el contenido total de iones,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  se puede distinguir entre la dureza de calcio, THCa, y la dureza de magnesio, THMg.

Dureza permanente o no carbonatada, mide el contenido de iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  después de someter al agua a ebullición durante media hora, filtración y

recuperación del volumen inicial con agua destilada. El método es de poca exactitud y depende de las condiciones de ebullición.

La dureza se puede expresar como meq/l en ppm de  $CO_3 Ca$ , o en grados hidrométricos de los cuales el más común es el francés. Las aguas con menos de 50 ppm en  $CO_3 Ca$ , se llaman blandas, hasta 100, ligeramente duras, y a partir de 200 ppm muy duras. Es frecuente encontrar aguas con menos de 300 ppm como  $CO_3 Ca$ , pero pueden llegar a 1000 ppm o incluso hasta 2000 ppm.

Para disminuir la dureza de las aguas, pueden someterse a tratamiento de ablandamiento o desmineralización. En las calderas se usan complementariamente tratamientos internos.

### 8.2. Alcalinidad.

La alcalinidad es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato,  $CO_3 H^-$ , carbonato,  $CO_3^{2-}$ , y oxidrilo,  $OH^-$ , pero también los fosfatos y ácido silícico u otros ácidos de carácter débil.

### 8.3. Sólidos disueltos.

Los sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, determinada por evaporación de volumen de agua previamente filtrada, corresponde al residuo seco con filtración previa. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas subterráneas

como superficiales. Aunque para las aguas potables, se indica un valor máximo deseable de 500 ppm, el valor de los sólidos disueltos no es por sí solo suficiente para determinar la bondad del agua. En los usos industriales la concentración elevada de los sólidos disueltos puede ser objeccionable por la posible interferencia en procesos de fabricación, o como causa de espuma en calderas.

Los procesos de tratamiento son múltiples en función de la composición, incluyendo la precipitación, intercambio iónico, destilación.

#### 8.4. Sólidos en suspensión.

Los sólidos en suspensión, SS, es una medida de los sólidos sedimentables (no disueltos) que, pueden ser retenidos en un filtro. Se pueden determinar pesando el residuo que queda en el filtro, después de secado. Son indeseables en las aguas de proceso porque pueden causar depósitos en las conducciones, calderas, equipos, etc. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, pero en las superficiales varía mucho en función del origen y las circunstancias de captación. Se separan por filtración y decantación.

#### 8.5. Sólidos totales.

Los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos y de los sólidos en suspensión.

#### 8.6. Sulfatos.

El ión sulfato,  $SO_4^-$  corresponde a sales moderadamente solubles o muy solubles.

Las aguas dulces contienen de 2 a 150 ppm, y el agua de mar cerca de 3000 ppm.

Aunque en agua pura se satura a unos 1500 ppm, como  $SO_4Ca$ , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

La determinación analítica por gravimetría con cloruro de bario es la más segura.

No afecta especialmente al agua en cantidades moderadas. Industrialmente es importante porque, en presencia de iones calcio, se combina para formar incrustaciones de sulfato de calcio.

Su eliminación se realiza por intercambio iónico.

#### 8.7. Nitratos.

El ion nitrato,  $NO_3^-$  forma sales muy solubles y bastante estables. Las aguas normales contienen menos de 10 ppm. Industrialmente no tiene efectos muy significativos, e incluso es útil para controlar la fragilidad del metal de las calderas.

Se determina en el laboratorio por espectrofotometría, resultante de la absorción de la radiación uv por el ión de nitrato. Se elimina por intercambio iónico.

#### 8.8. Sílice.

La sílice,  $SiO_2$ , se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico y como materia coloidal. Contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua. Las aguas naturales contienen entre 1 y 40 ppm. Se determina analíticamente por colorimetría.

La sílice tiene mucha importancia en los usos industriales porque forma incrustaciones en las calderas. Su eliminación se consigue parcialmente por precipitación pero fundamentalmente mediante resinas de intercambio iónico fuertemente básicas.

#### 8.9. Bicarbonatos y Carbonatos.

Existe una estrecha relación entre los iones bicarbonato,  $CO_3H^-$ , carbonato,  $CO_3^{2-}$ . Estos iones contribuyen a la alcalinidad del agua. Los carbonatos precipitan en presencia de iones calcio. Las aguas dulces suelen contener entre 50 y 350 ppm de ion bicarbonato y si el pH es inferior a 8,3 no hay ión bicarbonato.

#### 8.10. Calcio.

El ión calcio,  $Ca^{++}$ , forma sales desde moderadamente solubles a muy insolubles. Precipita fácilmente como  $CO_3Ca$ . Contribuye de forma muy especial a la dureza del agua y a la formación de incrustaciones. Las aguas dulces suelen contener de 10 a 250 ppm o incluso 600 ppm. El agua de mar contiene unos 400 ppm. Se determina analíticamente por complexometría con EDTA.

La eliminación de calcio se realiza por precipitación e intercambio iónico.

#### 8.11. Magnesio.

El ión magnesio,  $Mg^{++}$ , tienen propiedades muy similares a las del ión calcio pero sus sales son, en general muy solubles y difíciles de precipitar; por el contrario, su hidróxido,  $Mg(OH)_2$  es menos soluble. Las aguas dulces suelen contener entre 1 y 100 ppm.

Contribuye a la dureza del agua y a pH alcalino puede formar incrustaciones de hidróxido.

Su determinación analítica se realiza por complexometría. Se puede precipitar como hidróxido pero su eliminación se realiza fundamentalmente por intercambio iónico.

#### 8.12. Fosfatos.

El ión fosfato,  $PO_4^{-3}$  en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al corresponder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas.

En general no se encuentra en el agua más de 1 ppm, se determina colorimétricamente.

#### 8.13. Hierro.

El ión hierro se puede presentar como ión ferroso,  $Fe^{++}$ , o en la forma más oxidada de ión férrico,  $Fe^{+3}$ .

La presencia de hierro, es un inconveniente en las aguas industriales por dar lugar a depósitos e incrustaciones. Se determina analíticamente por colorimetría y espectrofotometría de absorción atómica, dando el hierro total que incluye las formas soluble, coloidal y en suspensión fina. También se puede emplear el intercambio catiónico.

#### 8.14. Proceso unitario de tratamiento de aguas.

Para separar las impurezas que se encuentran en el agua como materia en solución, estas pueden tratarse en el propio estado molecular o iónico.

El agua que se utiliza para la generación de vapor tiene sustancias químicas disueltas como ser, calcio, magnesio que dañan la estructura de los tubos produciendo incrustaciones en los mismos.

Para eliminar estas sustancias debe efectuarse un mantenimiento químico programado tanto adentro como afuera de la caldera.

#### 8. 15. Mantenimiento del agua fuera de la caldera generadora de vapor.

El agua potable que utiliza el Hotel Radisson para la generación de vapor, es dura tal como lo demuestra las tablas 8.1 y 8.2.

Tabla 8.1 Análisis de aguas.

Parámetro	Unidad	Muestra agua potable
Temperatura	°C	9,10
pH	Unidades	8,10
Conductividad	$\mu s/cm$	0,95
Sólidos totales	g/l	0,77
Sólidos disueltos	g/l	0,48
Sólidos en suspensión	g/l	0,29
Sólidos Sedimentables	g/l	Menor a 6
Dureza Total.	ppm	240

Fuente: Instituto de Investigaciones Químicas-UMSA.

La calidad del agua que provee EPSAS es variable como se observa en la tabla 8.2.

Tabla 8.2 Análisis de agua potable.

Parámetro	Unidad	Muestra de agua potable
Temperatura.	°C	12,9
pH	Unidades	6,0
Conductividad	$\mu s$	627,0
Alcalinidad $CO_3$	ppm	4,98
$HCO_3$	ppm	13,65
Dureza Total	ppm	207,5
$Ca^{+2}$	ppm	60,92
$Mg^{+2}$	ppm	13,42
Sólidos totales disueltos	ppm	291

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz

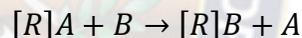
Para reducir la dureza total variable del agua de 207,5-240 ppm a un mínimo antes de introducir a la caldera, debe efectuarse el proceso de intercambio iónico.

Intercambio iónico.

Se utilizan resinas de intercambio iónico, las cuales tienen la capacidad, en contacto con una solución acuosa, de eliminar selectivamente los iones disueltos, mantenerlos temporalmente unidos en combinación química, y cederlos de nuevo frente a una solución fuerte de regenerante.

Las resinas se comportan como un electrolito cualquiera, con la particularidad que todos los grupos reactivos están unidos a un polímero insoluble que forma la matriz de la resina.

La acción de intercambio iónico es una reacción reversible. Si se designa a la resina por  $[R]$ , se escribe:



Y aplicando la ley de acción de masas se obtiene un coeficiente de selectividad (equivalente a la constante de equilibrio)

$$K = \frac{(A)([R]B)}{([R]A)(B)}$$

Que no es exactamente una constante sino que depende de las condiciones experimentales.

Aunque la resina tome con preferencia unos iones A frente a otros iones B, al tratarse de una reacción reversible se puede invertir esta tendencia aumentando la concentración de B muy por encima de la de A. este es el fundamento de la regeneración de las resinas.

Las propiedades que rigen el proceso de intercambio iónico y determinan sus características principales son las siguientes.

- Las resinas actúan selectivamente de forma que pueden preferir un ión sobre otros con factores de afinidad.
- La reacción de intercambio iónico es reversible, es decir puede avanzar en los dos sentidos.
- En la reacción se mantiene la electroneutralidad, un ión simple se intercambiará por otro ión simple.

Las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de agua son los siguientes.

- Se adapta a las necesidades de las aguas en que las concentraciones de las impurezas iónicas son relativamente bajas.
- Las resinas actuales tienen altas capacidades de intercambio que permiten conseguir procesos compactos requiriendo inversiones moderadas.
- Las resinas son estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración.
- Las instalaciones pueden ser automáticas o manuales para adaptarse a las condiciones específicas.

Principales tipos de resinas.

La mayoría de las resinas empleadas hoy en día son sintéticas, basadas en un copolímero de estireno- divinilbenceno, tratado apropiadamente para añadirle los grupos funcionales. La sulfonación da lugar a resinas catiónicas y a la aminación a

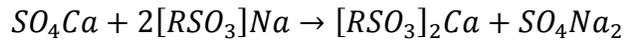
resinas aniónicas. Algunas resinas tienen una matriz acrílica en lugar de estirénica, u otros grupos polimerizantes (epoxi, etc.).

Existen cuatro tipos principales: catiónica fuerte (CF), catiónica débil (CD), aniónica fuerte (AF) y aniónica débil (AD).

La diferencia más importante es que las resinas fuertes operan a cualquier pH, pero tienen una capacidad más limitada que las débiles y deben regenerarse más frecuentemente. Su regeneración es ineficiente e implica un alto coste de regenerantes. En cambio las resinas de carácter débil, además de mayor capacidad, se regeneran casi estequiométricamente, es decir, con un exceso mínimo de regenerante, pero operan dentro de pH limitados y no captan todos los iones.

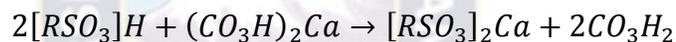
Resinas catiónicas fuertes.

Son capaces de eliminar todos los cationes del agua. Presentan una máxima selectividad para los cationes trivalentes, intermedia para divalentes e inferior para los monovalentes. Se emplea en el ablandamiento en ciclo sódico, regenerando con cloruro de sodio, y en la desmineralización en ciclo de ión hidrógeno, regenerando con ácido. La velocidad de intercambio es rápida y de poca fuga iónica. Son resinas muy estables y pueden durar hasta 20 años o más. En ablandamiento se regeneran con solución de cloruro de sodio al 10% empleando de 100 a 300g de cloruro de sodio por litro. Se hinchan poco, menos del 8% al pasar de la forma  $Na^+$  a la  $H^+$ . Las resinas catiónicas aguantan temperaturas altas de más de 100 °C.



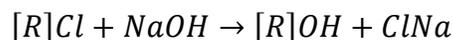
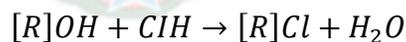
Resinas catiónicas débiles.

Captan el calcio y magnesio de la alcalinidad bicarbonatada, liberando ácido carbónico, que se puede eliminar de forma simple y barata por desgasificación mediante aeración. No operan a pH inferior a 7, necesitando una acción tamponante. Su capacidad es aproximadamente el doble de la catiónica fuerte y, aunque su fuga de calcio es baja, es alta en sodio. Incluso se puede emplear en su regeneración el exceso de ácido usado en la regeneración de la catiónica fuerte.



Resinas aniónicas fuertes.

Son capaces de eliminar todos los aniones de ácidos débiles o fuertes operando a cualquier pH. Su selectividad para los aniones divalentes es superior a los monovalentes. Son menos estables que las homólogas catiónicas. Su duración bastante inferior y resisten temperaturas límites inferiores.



Resinas aniónicas débiles.

Eliminan los aniones de los ácidos fuertes  $Cl^-$ ,  $SO_4^{=}$ ,  $NO_3^-$ , pero no los de los ácidos débiles  $CO_3^{=}$ ,  $CO_3H^-$ ,  $SiO_3H^-$ , y no funcionan a pH superior a 6. Su capacidad es el doble de las aniónicas fuertes y resisten el ensuciamiento orgánico.

Se distingue básicamente dos tipos de intercambio iónico. El ablandamiento y la desmineralización.

Ablandamiento.

En el ablandamiento, o descalcificación, se emplea una sola columna con resina catiónica fuerte, que se regenera con una solución de sal común. Los iones calcio y magnesio del agua se substituyen por iones sodio. Su coste operativo es muy bajo, pero al no disminuir la salinidad total del agua solamente se puede emplear para tratar aguas destinadas a calderas de baja presión.

La siguiente ecuación muestra el proceso de ablandamiento.



Para estos efectos la resina utiliza el ciclo del sodio, que es el intercambio dejando el agua con sales que no son incrustantes.

Desmineralización.

Existen múltiples maneras de combinar los cuatro tipos básicos de resinas descritos anteriormente. Algunos de ellos son fundamentales para conseguir una calidad

requerida del agua a partir de una alimentación determinada. Otras son combinaciones más complejas, o incluyen un desgasificador de  $CO_2$ , para mejorar el rendimiento económico de la operación.

Las etapas que se siguen para elegir un sistema de desmineralización son las siguientes.

- Determinar la calidad y volumen diario del agua requeridas.
- Analizar las calidades de los suministros de agua disponibles.
- Seleccionar el tipo de pretratamiento necesario.
- Decidir el sistema de desmineralización y el tipo de resinas.
- Especificar la duración del ciclo, el tipo de regenerante y la disponibilidad de almacenamiento de agua tratada.
- Determinar, en función de las capacidades de intercambio, velocidades de paso, nivel regenerante y parámetros físicos, los volúmenes de resina y de más características del sistema.

La operación de intercambio iónico siempre debe ir precedida del pretratamiento adecuado.

Operación del equipo de ablandamiento de agua.

Para el ablandamiento externo del agua, se emplea el ablandador mostrado en la siguiente figura.

Figura 8.1 Ablandador de agua del Hotel Radisson.



El equipo consta:

- Tanque de disolución de cloruro de sodio de 2000 litros de capacidad.
- Bomba de 1,5 HP de potencia.
- Ablandador de 4000 litros de capacidad con 1500 litros de resina catiónica fuerte.

Servicio del ablandador.

En este paso el equipo se encuentra tratando el agua que de acuerdo a los análisis realizados tiene una dureza total de aproximadamente de 240 ppm a la entrada, obteniéndose a la salida agua blanda con una dureza de 15 ppm.

A medida que el caudal de agua dura circula por el interior del ablandador, la resina catiónica fuerte capta iones calcio y magnesio y cede iones sodio hasta que se satura, dejando de llevar a cabo el intercambio iónico de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 8.3 Saturación de la resina con iones calcio y magnesio

Análisis de agua	Dureza	Caudal
Muestra	Ppm	$m^3$
1	15	10
2	15	20
3	15	30
4	15	40
5	15	50
6	20	60
7	30	70
8	55	80
9	90	90
10	120	100
11	140	110
12	152	120
13	163	130
14	170	140
15	175	150

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Graficando los datos experimentales se obtiene la siguiente figura.

Figura 8.2 Dureza contra caudal de agua.



Regeneración de la resina catiónica fuerte.

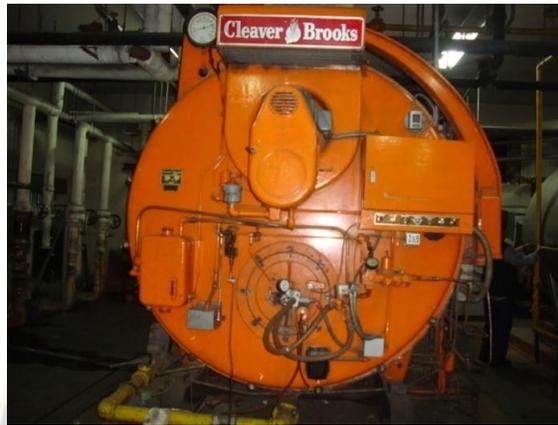
Los iones calcio y magnesio que contienen la resina se sustituyen por iones sodio, llevando a cabo el intercambio iónico, dejando pasar una solución regenerante al 10% de cloruro de sodio (200kg de sal), a través de la resina contenida en el ablandador, a una velocidad de 10m/h, luego se procede al enjuague eliminándose todos los residuos del regenerante, utilizando agua pura a una velocidad de 20m/h, de esta manera se activa nuevamente la resina con la capacidad de llevar a cabo el ablandamiento del agua dura.

8.16. Mantenimiento interno del agua de la caldera del Hotel Radisson.

Para el tratamiento residual del agua que tiene la dureza de aproximadamente 15 ppm que se introduce a la caldera, se emplea el mantenimiento químico para proteger los tubos de la caldera.

En la siguiente figura se muestra la caldera utilizada.

Figura 8.3 Caldera de Tubos de Humo



Características de la caldera.

- Generación de vapor 1200kg/h
- Volumen ocupado por el agua dentro de la caldera  $8m^3$
- Área  $2m^2$
- Largo 3,4m
- Presión de trabajo 150 PSI
- Diámetro de los tubos  $2\frac{1}{4}$  pulgada
- Número de tubos 177

La formación de incrustaciones y el depósito de fangos se debe a:

- Contaminantes presentes en el agua de aporte.
- Productos de la corrosión interna.
- Contaminantes introducidos en el condensado como fugas.

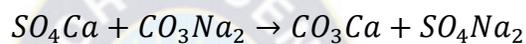
Las incrustaciones, las formas más sólidas y preocupantes, se producen sobre los tubos y otras superficies calientes de la caldera en el proceso de evaporación. Al evaporarse parte del agua las sustancias contaminantes se concentran y depositan sobre los tubos formando películas. Este depósito disminuye la transferencia de calor y provoca un recalentamiento del metal que puede llegar a la rotura. El problema doble: por un lado reduce la eficacia de la transmisión de calor, y por otro lado reclama un mayor mantenimiento del sistema o la parada por avería. La mayoría de los compuestos incrustantes tienen una solubilidad que disminuye con la temperatura, y de ahí que el problema sea más grave en las calderas que operan a altas presiones y temperaturas.

Además de las incrustaciones se forman y depositan otros sólidos que permanecen suspendidos en la masa de agua como fangos sin adherirse a las paredes y tubos de las calderas y cuya concentración se controla mediante un programa de purgas. Sus efectos son muy inferiores a las de las incrustaciones y, por este motivo. Una forma de controlar las incrustaciones es provocar la formación de fangos.

Programa de carbonatos.

El tratamiento interno de las aguas para controlar la formación de incrustaciones, persigue o bien mantener la dureza e impurezas en solución, o hacerlas precipitar al tiempo que se usan acondicionadores de fangos para prevenir la formación de incrustaciones.

El primer tipo de tratamiento que se realizó consistía en añadir cantidades estequiométricas de carbonato sódico para precipitar las sales de dureza cálcica en forma de carbonato cálcico. El sulfato cálcico, que daría una incrustación más dura y difícil de eliminar, es algo más soluble que el carbonato y, por tanto, es este último el que precipita.

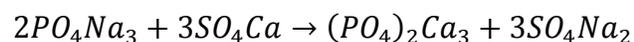


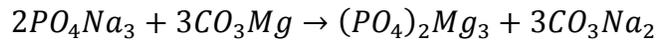
Bajo condiciones alcalinas, el magnesio y la sílica precipitan como hidróxido magnésico y silicato magnésico. Este método está limitado a calderas de baja presión empleando aguas de aporte de elevada dureza.

A mayores presiones es preferible que no hayan altas concentraciones de fangos porque contribuyen a la formación de incrustaciones. Además a mayores presiones y temperaturas se hace difícil mantener en el agua de la caldera la concentración suficiente de carbonato para que reaccione con toda la dureza cálcica. Con la alta temperatura el carbonato sódico se descompone liberando  $CO_2$  que aumenta la corrosividad de los condensados.

Programa de fosfatos.

Los fosfatos de calcio y magnesio que se forman son fácilmente dispersables y eliminados por purga. Las dos reacciones más interesantes son:





El magnesio y la sílice se separan preferentemente como hidróxido magnésico y silicato magnésico. La principal forma en que precipita el fosfato cálcico, en aguas de suficiente alcalinidad, es como apatita.  $(PO_4)_2Ca_3 \cdot Ca(OH)_2$

Manteniendo en la solución acuosa un pH entre 10,5 y 11,5 y un fosfato residual de 20 a 50 ppm, se forma un fango de fácil dispersión mediante un polímero o un dispersante orgánico natural.

Programa de fosfato coordinado.

En las calderas a alta presión y alta velocidad de transferencia de calor, es conveniente minimizar los sólidos presentes. También hay que evitar la alcalinidad caústica por el potencial ataque del metal. El fosfato sódico puede ser utilizado para alcanzar la alcalinidad conveniente sin tener que utilizar sosa caústica.

Normalmente se utilizan mezclas proporcionadas de fosfato trisódico,  $PO_4Na_3$ , fosfato disódico,  $PO_4HNa_2$ , porque entre ambos se aseguran las condiciones correctas y se evitan las posibilidades de una adición errónea. La adición de más fosfato disódico tiene poco efecto sobre el pH en el intervalo de 10 a 11 unidades.

Para controlar correctamente un programa de fosfatos coordinado, el agua de alimentación debe ser muy pura y de calidad consistente. Se usa normalmente en calderas de presiones hasta  $40\text{kg}/\text{cm}^2$  y aguas de aporte que no sobrepasen las 15 ppm.

Condiciones de uso.

Presión < 1200PSI, dureza total < a 60ppm de  $CaCO_3$ , dureza de magnesio baja  
 $SiO_2 > 1/3 Mg$ .

Programa solubilizante con dispersantes.

Para evitar la formación de grandes precipitados cristalinos se incluyen, en los programas de tratamiento, agentes dispersantes específicos. Desde hace muchos años se han utilizado una serie de productos orgánicos que incluyen taninos, ligninas y almidones; estos no reaccionan estequiométricamente. Funcionan por adsorción sobre la superficie de los precipitados evitando su aglomeración, manteniendo las partículas blandas y relativamente no adherentes.

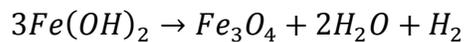
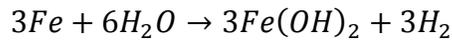
Tratamiento Anticorrosivo.

La forma más común de corrosión es el ataque del acero por el oxígeno, acelerado por las altas temperaturas y un pH bajo.

Para asegurar el correcto funcionamiento de los tubos de la caldera, se debe efectuar el tratamiento interno a base de un reductor químico que se combine con el oxígeno residual.

La corrosión puede tener lugar aún después de eliminar el oxígeno, debido al ataque directo del acero por el vapor de agua a alta temperatura.

Las reacciones fundamentales que tienen lugar son.

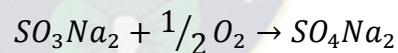


La corrosión por oxígeno en medio húmedo produce unas picaduras típicas.

La reacción del hierro y el agua se acelera con la presencia de oxígeno que reacciona con los óxidos ferrosos de forma localizada y origina poros en el metal. Además, el oxígeno reacciona con el hidrógeno permitiendo la disolución gradual de más hierro. Las picaduras son muy acusadas en zonas sometidas a esfuerzos, tales como las soldaduras, secciones trabajadas en frío o discontinuidades del metal.

Tratamiento con sulfito sódico.

El sulfito sódico reacciona con el oxígeno para formar sulfato sódico soluble.

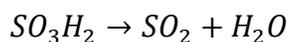
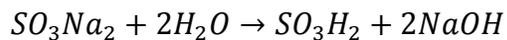


La formación de sulfato sódico aumenta la concentración de sólidos en el agua de la caldera.

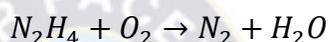
La temperatura afecta la reactividad y la estabilidad del reactivo.

La reacción del sulfato tiene lugar incluso a temperatura ambiente, pero de forma muy lenta.

La velocidad de reacción aumenta con la temperatura pero si es muy alta inicia su descomposición según la reacción



También se utiliza la hidrazina para eliminar oxígeno, la reacción química es la siguiente.

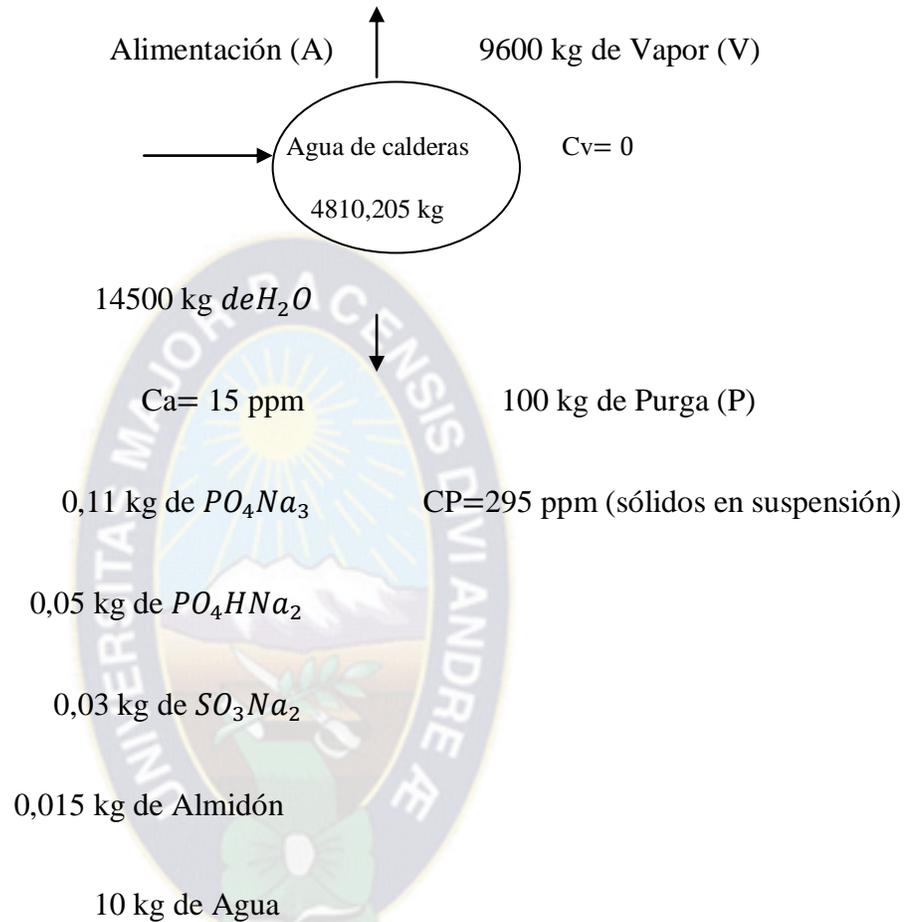


Programas de mantenimiento químico.

Para eliminar la dureza residual del agua proveniente del ablandador (15 ppm y más), que ingresa a la caldera, se ha utilizado el programa de fosfatos coordinados, el programa solubilizante con dispersante y el tratamiento anticorrosivo.

Las dosificaciones de los reactivos químicos utilizados y los requerimientos de las concentraciones de los productos que se forman dentro de la caldera para proteger a los tubos de las incrustaciones, estuvieron de acuerdo con la Norma española UNE 9-075-78 y con las informaciones químicas MERCK, para calderas de baja presión (ver anexos).

Matemática de la caldera por día de operación.



1. Balance de masa  $A=V+P$
2. Balance de impurezas A.  $Ca=P.Cp$

Nota: agua en estado líquido se cumple

$$1 m^3 = 1 Ton$$

3. Se define: ciclos de concentración.

$$Nc = \frac{Cp}{Ca}$$

4. De 1 y 2 se tiene

$$A = \frac{Nc}{Nc - 1} \cdot V$$

Además

$$\% \text{ de purga respecto "A"} = \frac{1}{Nc} \cdot 100$$

Donde

V → Vapor de agua.

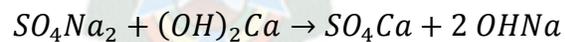
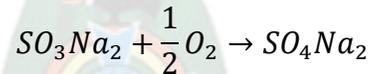
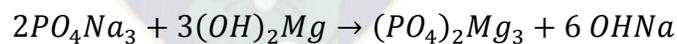
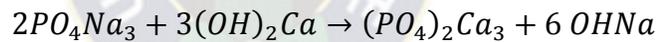
A → Alimentación

Cp → Concentración de la purga

Ca → Concentración del agua

Cv → Concentración del vapor

Las reacciones principales que se producen dentro de la caldera son las siguientes.



Las cantidades de los reactivos químicos utilizados en la caldera por mes se detallan en la siguiente tabla.

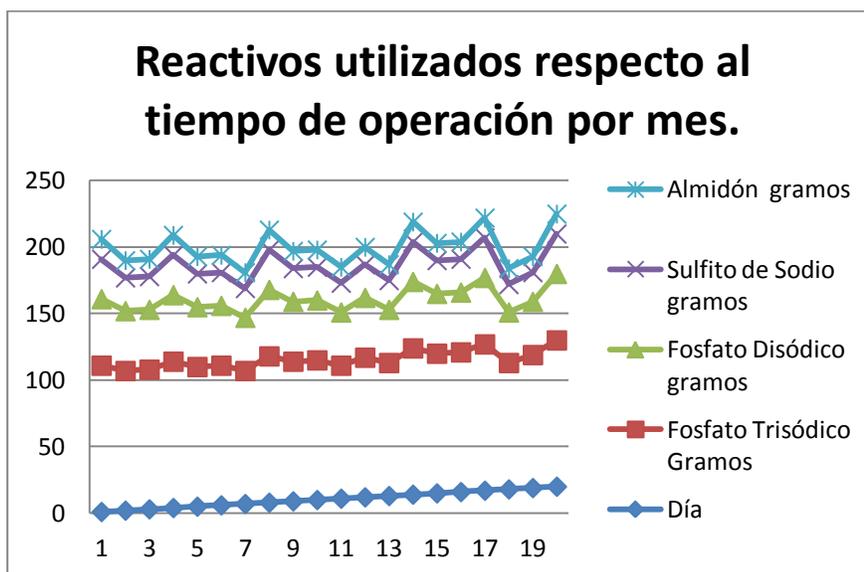
Tabla 8.4 Reactivos químicos utilizados en el ablandamiento residual del agua para el mantenimiento de los tubos dentro de la caldera por mes de operación.

Día	$PO_4Na_3$ gramos	$PO_4HNa_2$ gramos	$SO_3Na_2$ gramos	Almidón gramos
1	110	50	30	15
2	105	45	25	13
3	105	45	25	13
4	110	50	30	15
5	105	45	25	13
6	105	45	25	13
7	100	40	22	12
8	110	50	30	15
9	105	45	25	13
10	105	45	25	13
11	100	40	22	12
12	105	45	25	13
13	100	40	22	12
14	110	50	30	15
15	105	45	25	13
16	105	45	25	13
17	110	50	30	15
18	95	38	21	12
19	100	40	22	12
20	110	50	30	15

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz

Los reactivos utilizados contra el tiempo de representan en la siguiente figura.

Fig. 8.4 Reactivos utilizados respecto al tiempo de operación por mes.



Para disolver los reactivos químicos, se han utilizado por día 10 kg de agua, la disolución obtenida se ha introducido al dosificador ubicado en la línea de alimentación y de acuerdo a requerimiento se ha ido consumiendo dicha disolución. Para mantener la concentración de los productos obtenidos y evitar la acumulación de sólidos en suspensión en la caldera se han efectuado tres purgas discontinuas por día de operación. Se ha representado las concentraciones de los productos formados dentro de la caldera a consecuencia de los reactivos químicos utilizados, estos son representados en la siguiente tabla.

Tabla 8.5 Concentraciones resultantes del mantenimiento químico por mes.

Día	pH unidades.	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión ppm	Alcalinidad ppm
1	11	44	300	597
2	10,5	35	290	590
3	10,5	36	288	589
4	11,0	43	298	597
5	10,5	39	292	590
6	10,5	38	294	588
7	10,0	19	289	580
8	11,0	43	300	598
9	10,5	39	295	588
10	10,5	37	296	589
11	10,0	20	293	581
12	10,5	37	295	587
13	10,0	22	292	580
14	11,0	44	300	598
15	10,5	39	297	591
16	10,5	37	295	593
17	11,0	44	299	598
18	9,5	18	289	578
19	10,0	20	291	580
20	11,0	46	300	599

Evalúador. Cesar Ruiz Ortiz

De la misma manera se efectúa el mantenimiento químico para los meses siguientes, obteniéndose valores promedio, los cuales están representados en la siguiente tabla.

Tabla 8.6 Mantenimiento químico de los tubos considerando valores promedio por mes.

Mes	pH Unidades	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión ppm	Alcalinidad Ppm
Mayo- 98	10,5	35	295	590
Junio- 98	10,0	27	295	575
Julio- 98	10,5	25	245	560
Agosto- 98	10,5	30	280	570
Noviembre- 98	10,5	25	295	590
Enero- 99	10,5	22	275	580
Febrero- 99	10,5	25	260	595

Evaluador. Cesar Ruiz Ortiz

Los resultados obtenidos en la tabla 8.6 permiten mantener los tubos exentos de dureza, libres de incrustaciones, evitan la corrosión y el arrastre de los sólidos.

Control coordinado del pH- fosfato del agua de la caldera a temperatura ambiente (15°C).

Para la determinación de la concentración residual óptima de los reactivos a utilizar en el programa de fosfatos coordinados, que permitan mantener en el interior de la caldera un pH entre 10 y 11 unidades, se ha llevado a cabo un control del pH y la dosificación de fosfatos utilizados. Estas cantidades se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 8.7 Control coordinado del pH- fosfato del agua de la caldera.

Fosfato Trisódico (gramos)	Fosfato Disódico (gramos)	pH	Fosfato residual Ppm
0	0	8,0	0
80	30	8,3	1
85	32	8,5	5,0
90	35	9,0	10,0
95	38	9,5	18,0
100	40	10,0	25,0
105	45	10,7	38,0
110	50	11,0	44,0

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

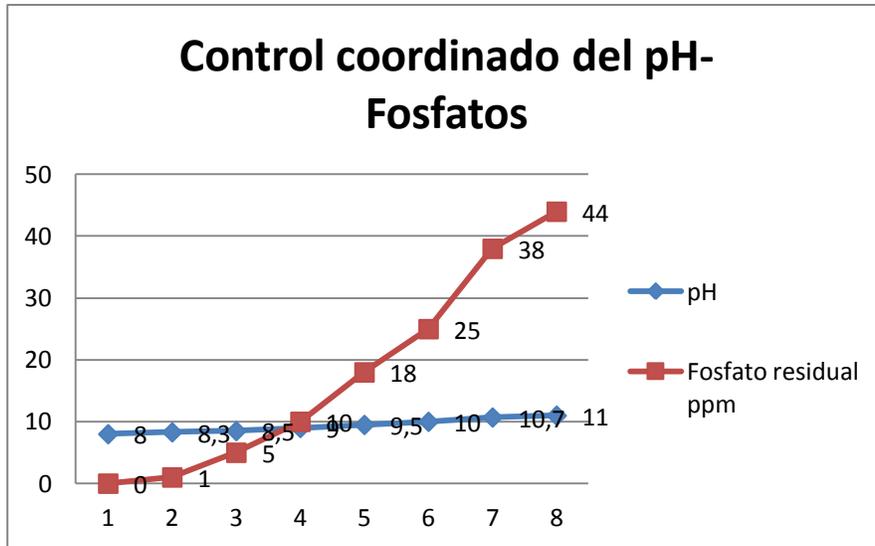
La dosificación óptima de los reactivos químicos a utilizar para mantener el pH entre 10,5 y 11,0 unidades del agua dentro de la caldera es:

Fosfato Trisódico de 105 a 110 gramos por día

Fosfato Disódico de 45 a 50 gramos por día

Representando los valores de la tabla 8.7 el pH contra la concentración del fosfato residual se obtiene la siguiente figura:

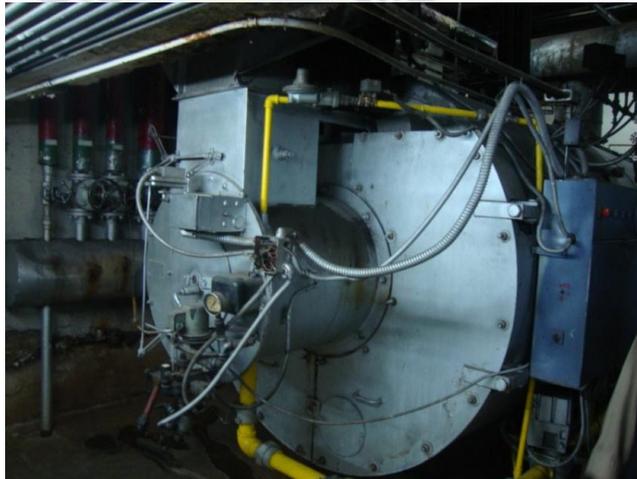
Figura 8.5 control coordinado pH- Fosfato



9. PLAN DE MANTENIMIENTO QUÍMICO PREVENTIVO PARA LOS TUBOS CON INCRUSTACIONES POCO CRÍTICAS DE LA CALDERA GENERADORA DE VAPOR DE AGUA DEL HOTEL PLAZA.

En la siguiente figura se muestra la caldera donde se llevó a cabo la desincrustación de los tubos.

Figura 9.1 Caldera generadora de vapor.



Efectuada la inspección a la caldera, se comprobó que por un mal mantenimiento interno del agua de alimentación utilizada en la producción de vapor, en la superficie externa de los tubos se ha adherido una capa continua de material extraño. Estos depósitos denominados incrustaciones son malos conductores del calor, reducen la eficiencia de la caldera, a menudo son causantes de que se quemen los tubos, exista ruptura de los mismos produciéndose fugas de agua, también pueden llegar a producir explosiones violentas.

Los formadores de incrustaciones son el calcio, magnesio, fierro, sílice y aluminio. Estas incrustaciones no son normalmente sales simples, sino compuestos combinados de las diferentes sales originales presentes en el agua, obtenidos como consecuencia lógica de los fenómenos físico- químicos resultantes de las reacciones a alta temperatura y presión existente en la caldera de vapor.

Estos incrustantes se eliminan, retirando las especies formadoras de incrustaciones o transformándolas en formas inocuas. Para tal fin se efectúa un mantenimiento químico adecuado.

Bajo un plan de mantenimiento químico preventivo se ha llevado a cabo la desincrustación paulatina de las sustancias cálcicas, magnésicas u otras, que se han adherido en la superficie externa de los tubos, y superficies calientes de la caldera, utilizando reactivos químicos adecuados de manera continua, por el lapso de 4 meses.

a. Determinación del espesor del incrustante en la superficie externa de los tubos.

Se ha efectuado la medición del diámetro externo de los tubos, comprobándose que tenían una capa continua de materia extraña adherida a la superficie de los tubos, de aproximadamente 2 milímetros de espesor.

Para dar inicio al proceso de desincrustación, se puso en marcha la caldera hasta alcanzar la presión de vapor de 60 PSI. La temperatura inicial del agua fue de 15°C y la cantidad de combustible utilizado de 157 kg y el espesor del incrustante de 2 milímetros.

Para reducir el espesor de la capa formada en la superficie externa de los tubos se han utilizado los siguientes reactivos químicos.

NALCO 75, constituido por los siguientes compuestos:

- Carbonato de sodio
- Hexametáfosfato de sodio
- Polipropilén glicol.
- Lignosulfonato de sodio.
- Hidróxido de sodio.

Este producto comercial dispersa y reduce los depósitos de sustancias incrustadas en la superficie de los tubos de la caldera.

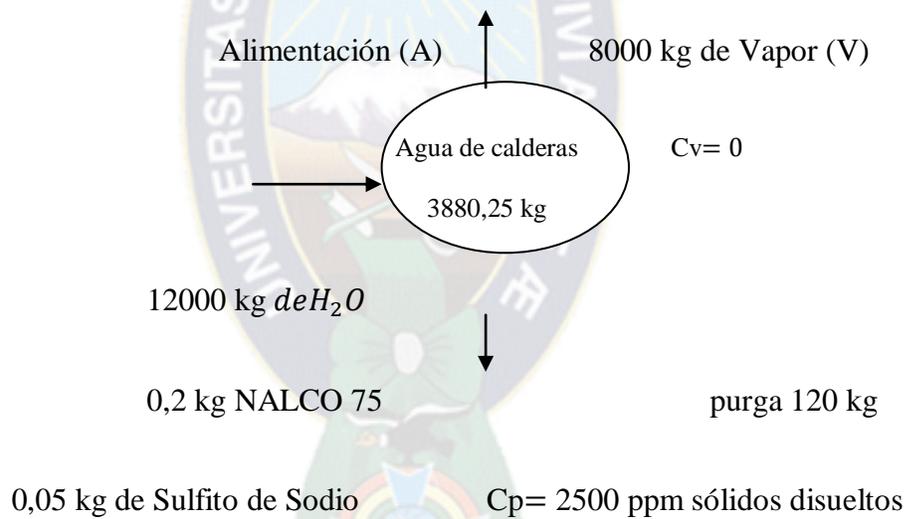
Sulfito de sodio, es un producto químico secuestrante de oxígeno de acción rápida, diseñado para reducir la corrosión por oxígeno en sistemas de generación de vapor.

Características de la caldera de tubos de humo.

- Producción de vapor 1000kg/h
- Presión de trabajo 60 PSI
- Largo 3m
- Diámetro 1,75m

- Número de tubos 110 unidades
- Volumen total  $7,2 m^3$
- Volumen para producir vapor de agua  $5m^3$
- Diámetro de los tubos 2 pulgadas.

Balance de materia en la caldera por día de operación (8 hrs).



Las cantidades requeridas de estos compuestos químicos para el primer mes de mantenimiento se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9.1 Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor, en el primer mes.

Operación	NALCO 75 (gramos)	Sulfito de Sodio (gramos)
1	200	50
2	190	45
3	190	45
4	200	50
5	200	50
6	190	45
7	190	45
8	200	50
9	190	45
10	190	45
11	200	50
12	200	50
13	190	45
14	190	45

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Las concentraciones de los productos formados dentro de la caldera como consecuencia de los reactivos introducidos son los siguientes:

Tabla 9.2 Concentraciones de productos dentro de la caldera en el primer mes de mantenimiento.

Operación	pH	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión. ppm	Sólidos disueltos. ppm	Alcalinidad ppm
1	11,0	46	351	2510	702
2	10,5	36	402	3045	747
3	10,5	37	459	3208	793
4	11,0	45	498	3533	861
5	11,0	46	545	4062	902
6	10,5	37	601	4150	845
7	10,5	38	647	4395	900
8	11,0	46	668	4412	905
9	10,5	36	662	4420	907
10	10,5	36	667	4431	909
11	11,0	45	670	4436	913
12	11,0	46	674	4440	915
13	10,5	37	677	4442	916
14	10,5	36	680	4448	918

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Para eliminar los sólidos en suspensión acumulados y toma de muestras para análisis, se efectuaron cuatro purgas discontinuas por día. Luego de la catorceava operación, la caldera dejó de operar por el lapso de una semana, durante este tiempo se midió el espesor de la capa incrustante, resultando ser de 1,6 milímetros. Concluido este periodo de tiempo nuevamente la caldera se puso en funcionamiento

anotándose la temperatura inicial del agua de 14°C y el consumo del combustible de 155,4 kg cuando se alcanzó la presión de 60 PSI.

Para el segundo mes de mantenimiento los reactivos utilizados se detallan a continuación.

Tabla 9.3 Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el segundo mes.

Operación	NALCO 75 (gramos)	Sulfito de Sodio (gramos)
1	200	50
2	190	45
3	200	50
4	190	45
5	200	50
6	200	50
7	200	50
8	190	45
9	200	50
10	190	45
11	200	50
12	200	50

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Las concentraciones logradas dentro de la caldera a consecuencia de los reactivos introducidos por operación se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9.4 Concentraciones de productos dentro de la caldera en el segundo mes de mantenimiento.

Operación	pH	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión ppm	Sólidos disueltos ppm	Alcalinidad. Ppm
1	11,0	48	680	4503	921
2	10,5	38	705	4615	945
3	11,0	46	720	4793	961
4	10,5	39	802	4855	972
5	11,0	46	830	4890	1000
6	11,0	47	821	4852	952
7	11,0	48	818	4847	945
8	10,5	38	816	4840	939
9	11,0	46	814	4832	930
10	10,5	37	812	4825	926
11	11,0	46	810	4815	919
12	11,0	47	808	4812	915

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Se efectuaron 5 purgas por día para la eliminación de los sólidos en suspensión y toma de muestras para análisis.

Concluido el segundo mes de mantenimiento, con caldera parada se efectuó la medición de la capa continua, resultando ser de 1,2 milímetros de espesor.

Posteriormente se puso en marcha la caldera hasta alcanzar la presión de 60 PSI. El consumo de combustible fue de 154 kg y la temperatura inicial del agua de 15°C.

Para el tercer mes de mantenimiento los reactivos utilizados se detallan a continuación.

Tabla 9.5 Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el tercer mes.

Operación	NALCO 75 (gramos)	Sulfito de Sodio (gramos)
1	190	45
2	200	50
3	200	50
4	190	45
5	200	50
6	180	40
7	190	45
8	200	50
9	200	50
10	190	45
11	200	50
12	180	40

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Las concentraciones logradas dentro de la caldera se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9.6 Concentraciones de productos dentro de la caldera en el tercer mes de mantenimiento.

Operación	pH	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión ppm	Sólidos disueltos ppm	Alcalinidad. Ppm
1	10,5	36	809	4810	912
2	11,0	43	753	4703	850
3	11,0	42	652	4520	833
4	10,5	35	708	3517	800
5	11,0	42	452	3020	755
6	10,0	34	421	3000	732
7	10,5	36	418	2993	725
8	11,0	44	413	2987	719
9	11,0	43	411	2983	714
10	10,5	36	410	2980	701
11	11,0	43	409	2977	670
12	10,6	35	407	2973	660

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Se efectuaron seis purgas por día para evitar el arrastre de sólidos hacia los condensados.

Para llevar a cabo el mantenimiento para el cuarto mes la temperatura inicial del agua fue de 13°C, el consumo de combustible fue de 153,0 kg.

El espesor de la capa incrustante fue de 0,8 mm.

Los reactivos utilizados se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9.7 Mantenimiento químico preventivo para desincrustar los tubos de la caldera generadora de vapor en el cuarto mes.

Operación	NALCO 75 (gramos)	Sulfito de Sodio (gramos)
1	190	45
2	200	50
3	190	45
4	200	50
5	190	45
6	180	40
7	190	45
8	200	50
9	190	45
10	200	50
11	190	45
12	180	40

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Las concentraciones de los reactivos químicos logradas dentro de la caldera se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 9.8 Concentraciones de productos dentro de la caldera en el cuarto mes de mantenimiento.

Operación	pH	Fosfatos ppm	Sólidos en suspensión ppm	Sólidos disueltos ppm	Alcalinidad. Ppm
1	10,5	35	405	2970	653
2	11,0	43	355	2510	575
3	10,5	35	300	2220	558
4	11,0	42	350	2050	571
5	10,5	36	280	1520	553
6	10,0	38	270	1430	542
7	10,5	36	266	1420	533
8	11,0	44	263	1407	525
9	10,5	35	260	1400	520
10	11,0	43	257	1390	527
11	10,5	36	254	1381	510
12	10,2	33	250	1372	501

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

La capa continua de incrustante se redujo a 0,4 mm de espesor, el consumo de combustible fue de 152 kg.

En la siguiente tabla se representa el consumo de combustible y la energía liberada durante el proceso de mantenimiento.

Tabla 9.9 Consumo de combustible durante el proceso de desincrustación.

Temperatura inicial. °C	Espesor de la capa. mm	Energía liberada. Kcal	Combustible. Kg.
15	2,0	1831745,7	157,0
14	1,6	1813078,2	155,4
15	1,2	1796744,2	154,0
13	0,8	1785077,0	153,0
14	0,4	1773409,8	152,0

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

El consumo de los reactivos desincrustantes durante el mantenimiento se representa en la tabla 9.10.

Tabla 9.10 Consumo de reactivos desincrustantes durante el proceso de mantenimiento.

Mes	NALCO 75 Gramos	Sulfito de Sodio Gramos
1	2720	660
2	2360	580
3	2320	560
4	2300	550

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Concluido el proceso de desincrustación, se cambiaron los reactivos químicos, posteriormente se aplicó el programa de fosfatos coordinados, el programa

solubilizante con dispersante y el tratamiento anticorrosivo, durante 7 años más. Pasado este tiempo se procedió al cambio de un 80% de los tubos (los expuestos a la llama directa, cerca del hogar donde existe mayor transmisión de calor).



## 10. PLAN DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO PARA LOS TUBOS DE CALDERAS GENERADORAS DE VAPOR DE AGUA.

Al no efectuarse un mantenimiento químico adecuado del agua que se utiliza en la caldera generadora de vapor, la superficie de los tubos sufre incrustaciones críticas irreversibles, ocasionando la ruptura de los mismos como se observa en la figura 10.1 lo que implica emplear el mantenimiento correctivo para el cambio inmediato de los tubos.

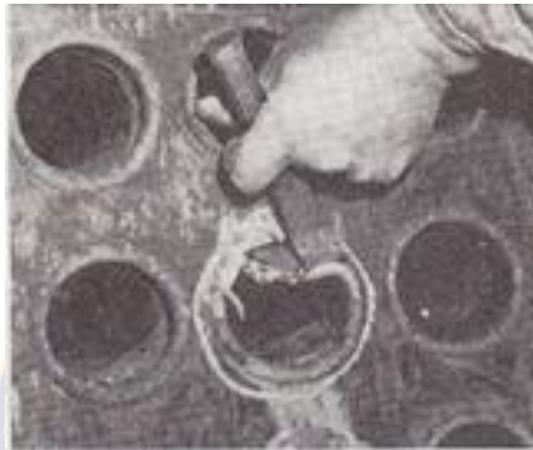
Figura 10.1. Tubos de la caldera en mal estado.



### 10.1. Extracción de los tubos viejos con incrustaciones.

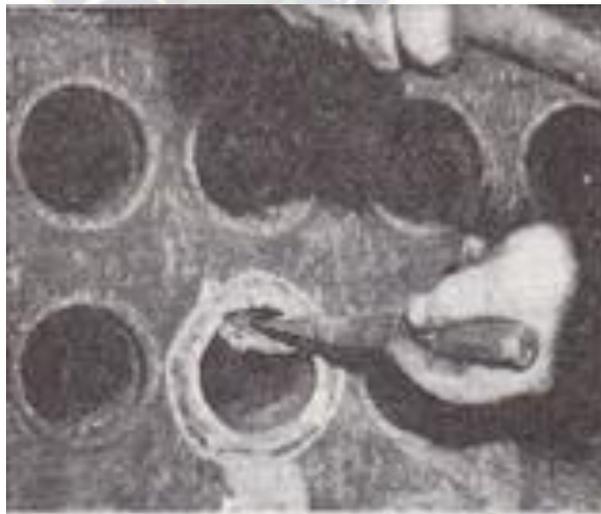
Para la extracción de los tubos viejos se aplica la siguiente técnica.

Fig.10.2 Corte del reborde del lado de la caja.



Corte con cincel el reborde en el lado de la caja de humo para poder sacar el tubo de la placa de tubos.

Fig. 10.3 Contracción del extremo del tubo.



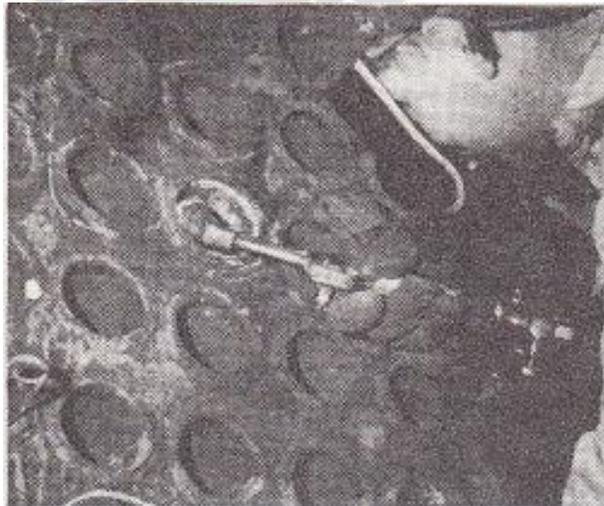
Contraiga el extremo del tubo con un cincel hasta que la parte ensanchada quede libre.

Fig. 10.4 Corte del reborde soldado del tubo



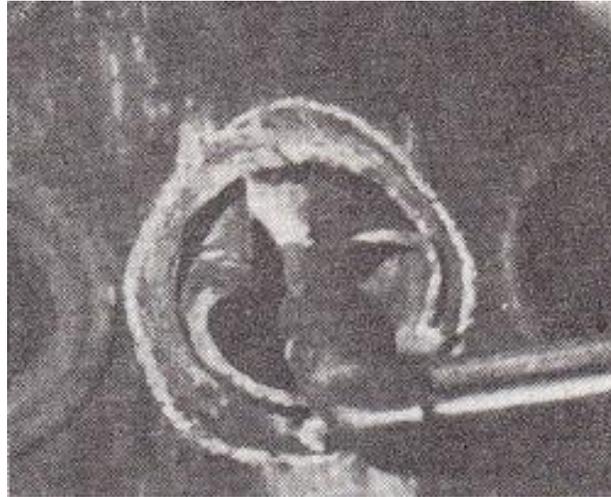
Corte el reborde del lado soldado del mismo tubo con soplete. No confunda el tubo.

Fig. 10.5 Corte de todo el contorno del tubo



Corte todo el contorno del tubo con soplete unas 2 pulgadas dentro de la lámina del tubo.

Fig. 10.6 Apertura del extremo contraído del tubo



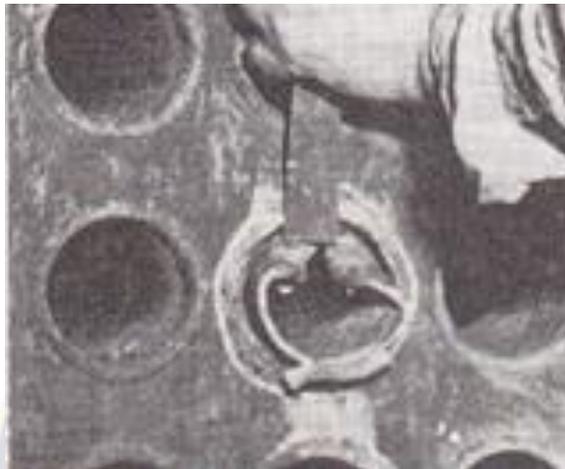
Abra el extremo contraído del tubo con soplete si está abolsado en el interior.

Fig. 10.7 Eliminación del extremo soldado del tubo.



Quite el extremo soldado del tubo y expulse el tubo para poder sacarlo.

Fig. 10.8 Contracción del rebordeado.



Si el lado rebordeado quizá no esté todavía libre para salir del agujero en la lámina contráigalo.

Fig. 10.9 Golpeado del tubo para eliminar incrustaciones.

Dé unos golpecitos a lo largo del tubo mientras lo saca, si hay problemas con las incrustaciones.

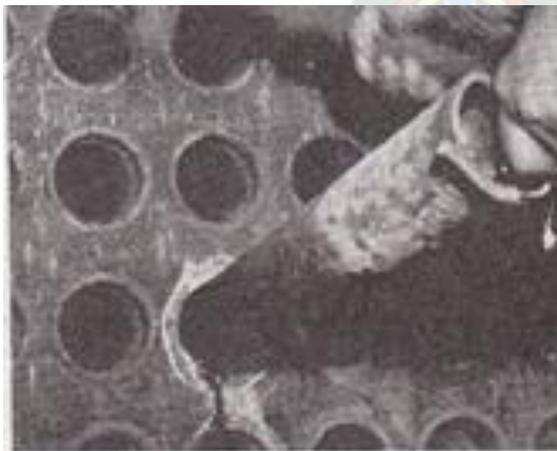
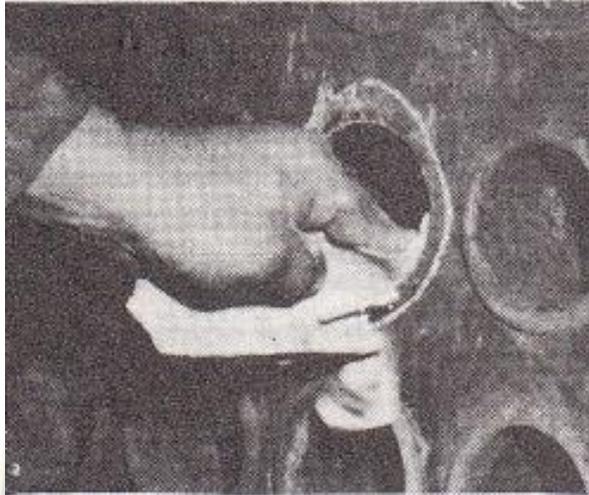


Fig. 10.10 Lijado de la superficie de apoyo del tubo.



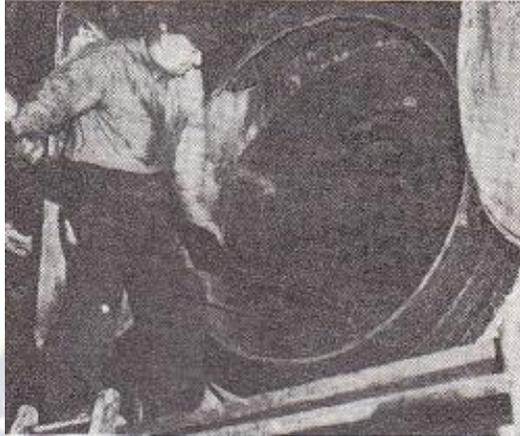
Lije la superficie de apoyo en la placa de tubos para que el tubo nuevo apoye con una superficie lisa.

Mediante el procedimiento seguido, ya se tiene las condiciones para instalar los nuevos tubos en la caldera.

#### 10.2. Instalación de los nuevos tubos.

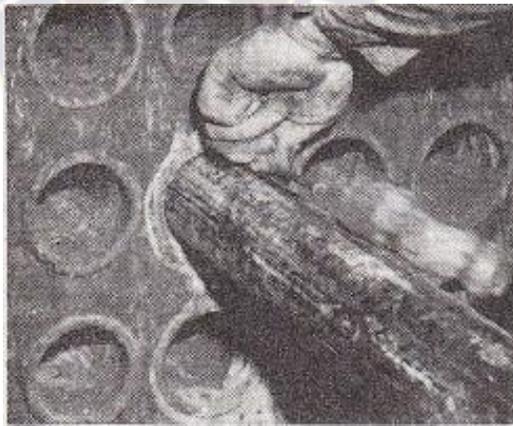
Conforme al siguiente procedimiento, se llevará a cabo la instalación de los tubos nuevos.

Fig. 10.11 Introducción del tubo en la superficie de apoyo



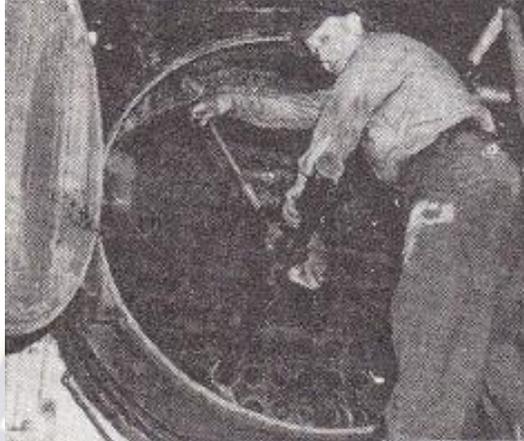
Corra el nuevo tubo. Puede ser necesario guiar el otro extremo con una varilla larga.

Fig. 10.12 Acuñado del tubo.



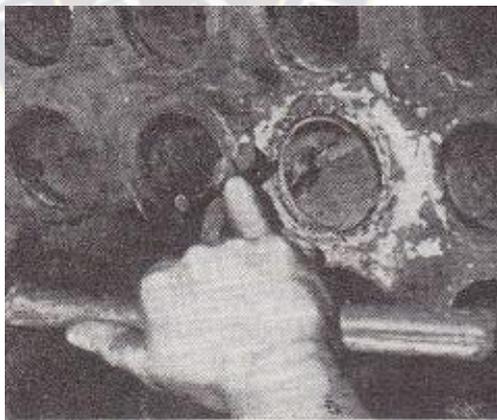
Con el tubo marcado hasta  $\frac{3}{8}$  de pulgada para extenderse en cada extremo, sáquelo y acúñelo.

Fig. 10.13 Cortado del tubo.



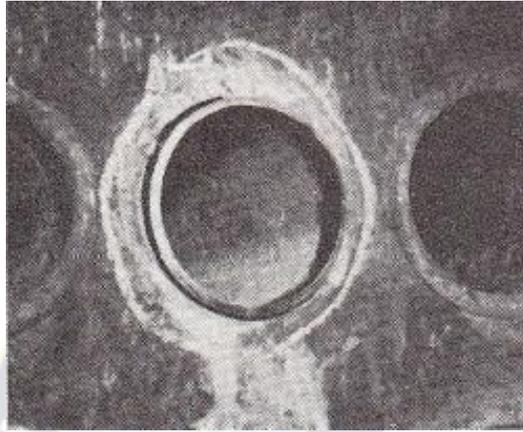
Con el tubo acañado para que no gire, corte en la marca con el cortador de tubos.

Fig. 10.14 Colocado del tubo en las placas de los tubos



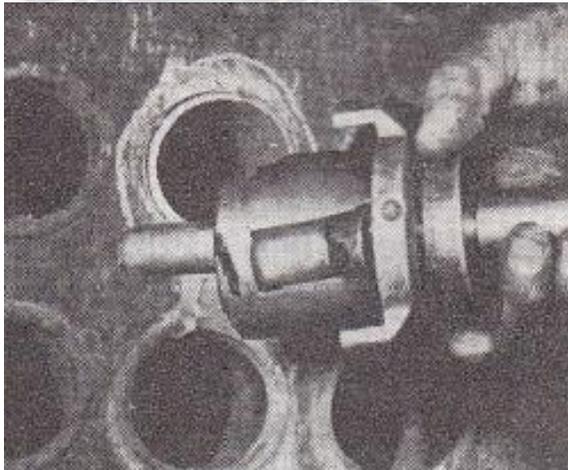
Coloque el tubo en las placas de tubos y sujételo con una cuña delgada.

Fig. 10.15 Acuñado del tubo



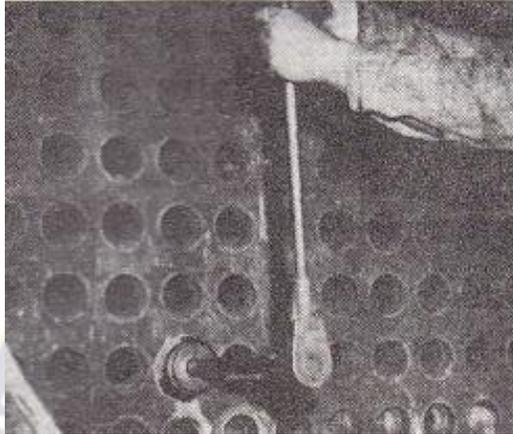
Este lado sobresale  $\frac{3}{8}$  de pulgada, está listo para rectificar. Las cuñas no lo dejan girar.

Fig. 10.16 Colocado del avellanador en el lugar correcto



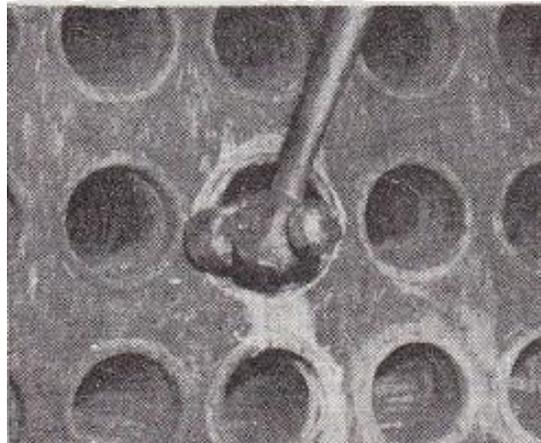
Ponga el avellanador de tubos (ensanchador) de modo que los rodillos abocinadores (dar mayor abertura por un lado del tubo que por otro) chicos estén en el lugar correcto desde el tope.

Fig. 10.17 Lubricado del avellanador.



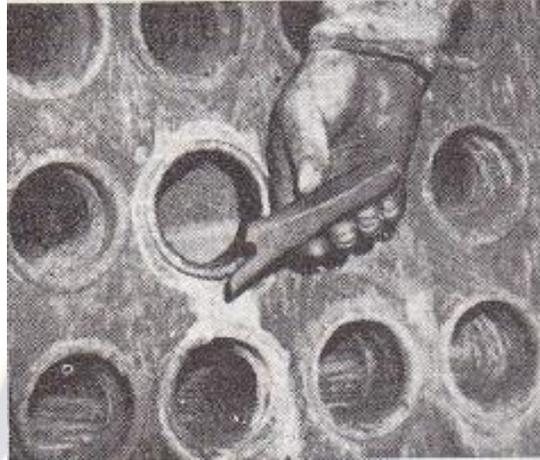
Aceite el avellanador, introduzca la herramienta y gírela con un movimiento uniforme de empuje.

Fig. 10.18 Apretado del tubo.



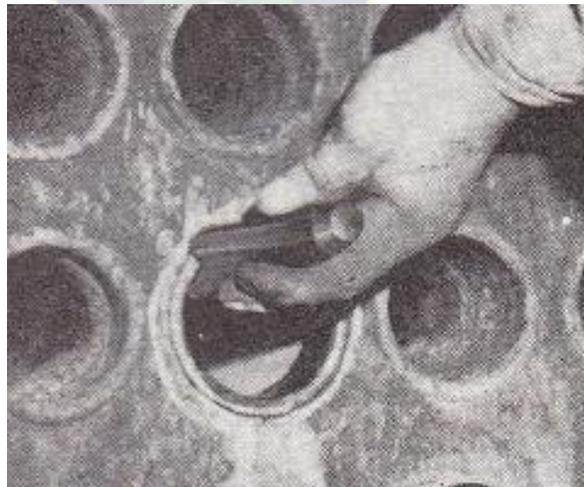
Cuando esté avellanado lo preciso para apretarlo, recalque con suavidad el extremo.

Fig.10.19 Martillado del tubo.



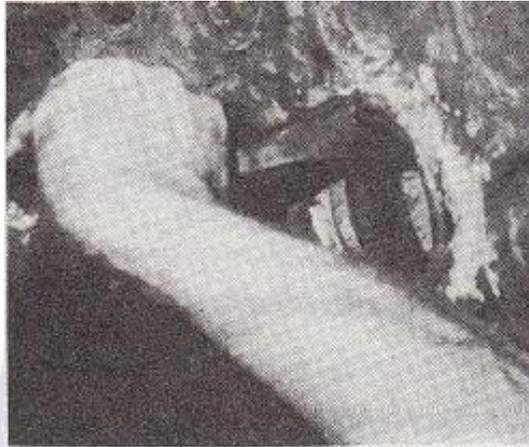
El tubo dúctil se recalca rápido con un martillo, pero se acaba con esta herramienta (rebordeador).

Fig. 10.20 Desplazamiento del rebordeador.



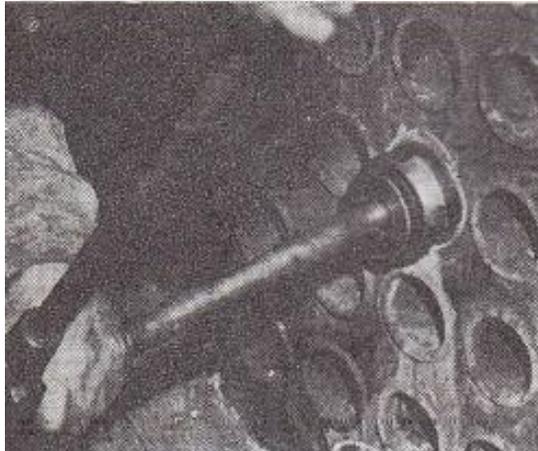
Mueva el rebordeador más o menos la mitad de su anchura después de cada golpecito con el martillo.

Fig. 10.21 Avellanador del otro extremo del tubo.



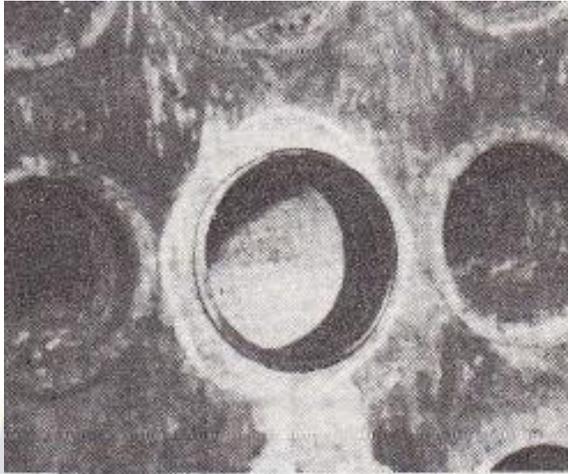
Después de avellanar el otro lado del tubo, el martineumático lo rebordea con rapidez.

Fig. 10.22 Ajuste del tubo.



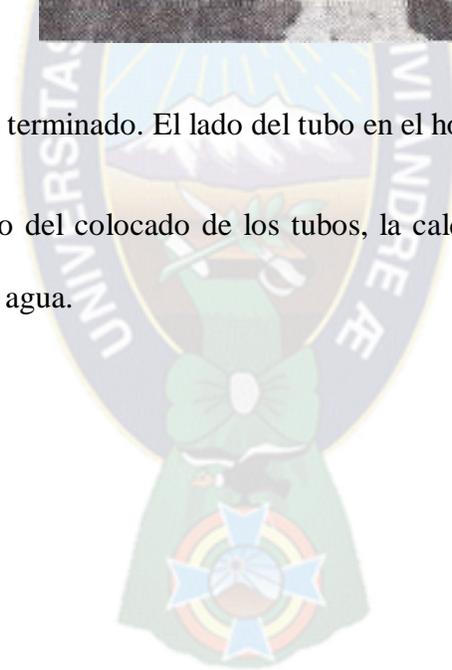
Vuelva a avellanar para acabado después de rebordear a fin de comprobar que el tubo no se aflojó.

Fig. 10.23 Soldado del tubo en el hogar.



Este es el trabajo terminado. El lado del tubo en el hogar se suelda para evitar fugas.

Luego del trabajo del colocado de los tubos, la caldera está lista para nuevamente generar vapor de agua.



## 11. PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Para llevar a cabo el mantenimiento predictivo de los tubos de la caldera, se ha efectuado un seguimiento del estado de los tubos mediante el control permanente del consumo de combustible y la liberación de energía en la generación de vapor, desde una presión manométrica mínima hasta una presión de trabajo de 60 PSI.

Se ha demostrado que para una incrustación en la superficie de los tubos de 2 mm de espesor, el consumo de combustible era de 157 Kg y una energía liberada de 1831745,7 Kcal. Para un espesor de 0,4 mm el consumo de combustible era de 152 kg y una energía liberada de 1773409,8 Kcal. Por lo tanto el consumo de combustible y la liberación de energía, son indicadores que están relacionados directamente con el estado de los tubos y de las superficies calientes de la caldera generadora de vapor.

Durante la vida útil de los tubos, deberá controlarse en cada puesta en marcha de la caldera el consumo de combustible, si este es igual a 152 kg o menor que este valor para una presión de trabajo de 60 PSI, los tubos estarán exentos de incrustaciones, al igual que las superficies calientes de la caldera. Esta técnica permitirá no abrir la caldera y garantizará su normal funcionamiento en la generación de vapor.

12. COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE EL PLAN DE MANTENIMIENTO QUÍMICO PREVENTIVO Y EL MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE LOS TUBOS QUE PRESENTAN INCRUSTACIONES POCO CRÍTICAS DE LA CALDERA DE VAPOR UBICADA EN EL HOTEL PLAZA.

Las cantidades de los reactivos químicos utilizados, la mano de obra empleada, los análisis químicos efectuados para la determinación de las concentraciones de los productos formados dentro de la caldera y los costos en el plan de mantenimiento químico preventivo, empleado en los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera generadora de vapor del Hotel Plaza durante cuatro meses continuos, se representa en la siguiente tabla.

Tabla 12.1. Costos de mantenimiento preventivo de los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera generadora de vapor del Hotel Plaza.

Detalle	Cantidad Kg	Costo unitarios \$us	Costo parcial \$us
Nalco-75	9,70	7,0	67,90
Sulfito de Sodio	2,35	5,0	11,75
Análisis de Fosfatos		1,5	75,00
Análisis del pH		1,0	50,00
Análisis de Alcalinidad		1,0	50,00
Análisis de Sólidos en suspensión.		1,0	50,00
Análisis de sólidos disueltos.		1,0	50,00
Mano de obra empleada		400,0	1600,00
Costo total			1954,65

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

El costo que representa el cambio de los tubos con incrustaciones poco críticas y la mano de obra empleada se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 12.2. Costos del mantenimiento correctivo de los tubos con incrustaciones poco críticas de la caldera de vapor del Hotel Plaza.

Detalle	Cantidad unidad	Costo unitario \$us	Costo parcial \$us
Tubos	100	50	5000
Mano de obra empleada por el cambio de tubos.	100	50	5000
Costo total			10000

Fuente: Hotel Plaza.

Comparando los costos de las tablas 12.1 y 12.2, al efectuar el mantenimiento preventivo de los tubos con incrustaciones poco críticas, en lugar de cambiarlos, se tiene un ahorro de \$us 8045,35.

### 13. MITIGACIÓN DE LOS GASES RESIDUALES GENERADOS EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR.

#### 13.1. Producción de gases, ecuaciones químicas.

Para la mitigación de los gases residuales generados en la producción de vapor para un determinado tiempo de operación se ha utilizado la ecuación química del proceso de combustión, determinándose la cantidad de gases producidos en la caldera generadora de vapor. El combustible utilizado es gas licuado de petróleo, y tiene el siguiente análisis de los componentes que contiene.

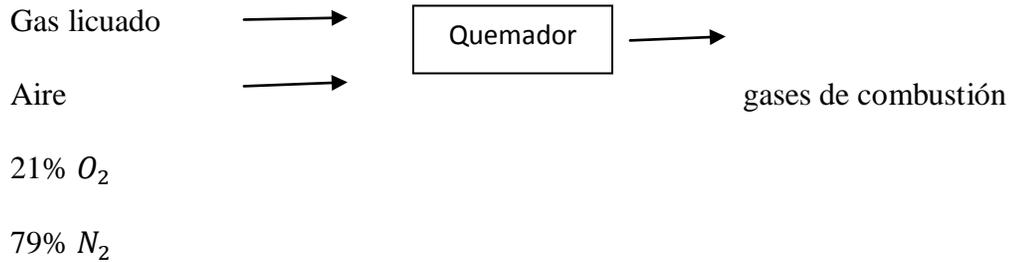
Tabla 13.1 Composición química del gas licuado de petróleo.

Componentes	Fórmula	Porcentaje
Etano	$C_2H_6$	0,75
Propano	$C_3H_8$	58,52
ISO-Butano	$(CH_3)_2CH - CH_3$	11,61
Normal-Butano	$CH_3 - CH_2 - CH_2 - CH_3$	26,90
ISO-Pentano	$(CH_3)_2 - CH - CH_2 - CH_3$	0,21
Porcentaje de Carbono		82,44
Porcentaje de Hidrógeno		17,56
Densidad (lb/gal)		4,43
Poder calorífico (Btu/lb)		21000

Fuente: YPFB

#### 13.2. Determinación de los gases de combustión en $Kg - mol$

La determinación de los gases que se producen debido al proceso de combustión, se realiza mediante el siguiente balance.



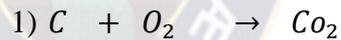
El cálculo se realiza sobre la base de 25 kg/h de combustible, lo cual se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 13.2 Peso de los componentes del gas licuado.

Componentes	Kg por unidad de GLP	Peso molecular divisor	Kg-mol de GLP
Carbono	20,61	12	1,72
hidrógeno	4,39	2	2,19

Evaluador: Ing. Cesar Ruiz Ortiz.

Partiendo de las reacciones de combustión estequiométricamente balanceadas.



$$1,72 \quad 1,72 \quad 1,72$$



$$2,19 \quad \frac{1}{2} \times 2,19 \quad 2,19$$

Oxígeno requerido.

$$20,61 \text{ kg C} \times \frac{32 \text{ Kg } O_2}{12 \text{ Kg C}} \times \frac{\text{Kg-mol } O_2}{32 \text{ Kg } O_2} = 1,72 \text{ Kg - mol } O_2$$

$$4,39 \text{ Kg } H_2 \times \frac{1 \text{ Kg - mol } H_2}{2 \text{ Kg } H_2} \times \frac{0,5 \text{ Kg - mol } O_2}{1 \text{ Kg - mol } H_2} = 1,095 \text{ Kg - mol } O_2$$

Total Oxígeno requerido	2,815 Kg – mol O <sub>2</sub>
Nitrógeno provisto	$\frac{79 \times 2,815}{21} = 10,59 \text{ Kg} - \text{mol } N_2$
Gases que salen de la caldera	
Dióxido de Carbono producido	1,72 Kg – mol CO <sub>2</sub>
Agua	2,19 Kg – mol H <sub>2</sub> O
Nitrógeno	10,59 Kg – mol N <sub>2</sub>
Total de gases de combustión	14,50 Kg – mol

### 13.3. Cálculo de la presión de trabajo.

Aplicando la ley de los gases ideales  $PV = NRT$

Volumen disponible para los gases de combustión 0,30 m<sup>3</sup>

Temperatura de salida de los gases de combustión 513 °K

$$P = \frac{NRT}{V} = \frac{14,50 \text{ mol} \times 0,082 \text{ atm l} \times 513 \text{ }^\circ\text{K}}{300 \text{ l} \text{ }^\circ\text{K mol}} = 2,03 \text{ atm}$$

### 13.4. Cálculo de la masa de agua necesaria para el proceso de enfriamiento de los gases de combustión.

La masa de los gases de combustión que sale de la caldera y entra al intercambiador de calor es:

- 75,68 Kg CO<sub>2</sub>

- 39,42 Kg H<sub>2</sub>O

- 296,52 Kg N<sub>2</sub>

Total: 411,62 Kg.

Temperatura de entrada de los gases de combustión al intercambiador de calor de 240°C.

Medio refrigerante Agua, temperatura a la entrada del intercambiador de calor de 15°C.

Temperatura de salida del agua de intercambiador de calor de 30°C.

Temperatura de salida de los gases de combustión del intercambiador de calor de 20°C.

Calor absorbido por el agua es igual al calor desprendido por los gases.

$$Q_{abs} = -Q_{desp}$$
$$m_{agua} C_{p\ agua} \Delta T = -m_{gas} C_{p\ gas} \Delta T \quad (1)$$

Donde  $C_{p\ gas}$  es la capacidad calorífica de los gases,  $C_{p\ agua}$  es la capacidad calorífica del agua,  $m_{gas}$  es la masa total de los gases y  $m_{agua}$  es la masa del agua.

13.4.1. Cálculo de la capacidad calorífica media de los gases de combustión  $\overline{C_p}$

$$\overline{C_p} = C_{p\ CO_2} X_{CO_2} + C_{p\ H_2O} X_{H_2O} + C_{p\ N_2} X_{N_2} \quad (2)$$

Donde X son las fracciones molares de los compuestos, para el  $CO_2$  es:

$$X_{CO_2} = \frac{\text{masa del } CO_2}{\text{masa total}} = \frac{75,68\ Kg}{411,62\ Kg} = 0,184$$

$$\text{Para el agua: } X_{H_2O} = \frac{\text{masa del } H_2O}{\text{masa total}} = \frac{39,42\ Kg}{411,62\ Kg} = 0,096$$

$$\text{Para el nitrógeno: } X_{N_2} = \frac{\text{masa del } N_2}{\text{masa total}} = \frac{296,52\ Kg}{411,62\ Kg} = 0,720$$

Datos obtenidos de la bibliografía:

$$C_{p\ CO_2} = 0,844\ KJ/Kg^{\circ}K$$

$$C_{pN_2} = 1,040 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{pH_2O(g)} = 1,865 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$C_{pH_2O(l)} = 4,182 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Reemplazando en la ecuación (2) por sus valores se tiene:

$$\overline{C}_{p_{gas}} = (0,844 \times 0,184 + 1,865 \times 0,096 + 1,040 \times 0,720) \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

$$\overline{C}_{p_{gas}} = 1,083 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Para determinar la masa del agua de la ecuación (1) se despeja la masa del agua.

$$m_{agua} = - \frac{C_{p_{gas}} \Delta T_{gas} m_{gas}}{C_{pH_2O(l)} \Delta T_{H_2O}}$$

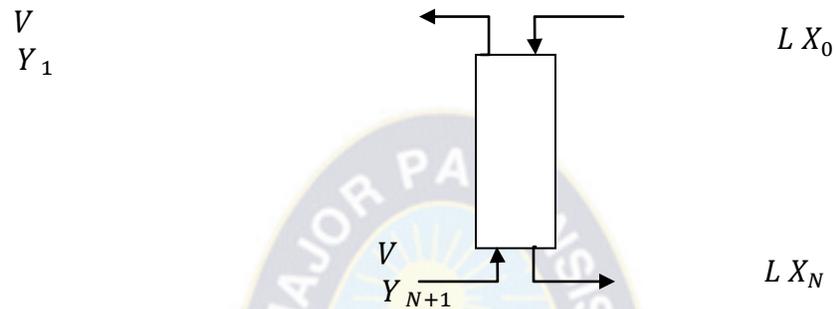
Reemplazando por sus valores se tiene:

$$m_{agua} = - \frac{1,083 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K} (293 - 513)^\circ\text{K} \times 411,62 \text{ Kg/h}}{4,182 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K} (303 - 288)^\circ\text{K}}$$

$$m_{agua} = 1563,37 \text{ Kg/h}$$

13.5 Cálculo de la masa de agua necesaria para llevar a cabo el proceso de absorción.

Balance de masa en la torre de absorción por hora de operación.



Entrada= Salida

$$V Y_{N+1} + \cancel{L X_0} = V Y_1 + L X_N \quad (1)$$

$$\text{Despejando } L = \frac{V(Y_{N+1}-Y_1)}{X_N} \quad (2)$$

Donde:

$V$  = Masa de los gases que entran y salen de la torre

$L$  = Masa del agua que circula por la torre

$Y_{N+1}$  = Relación molar del gas a la entrada de la torre

$Y_1$  = Relación molar del gas a la salida de la torre

$X_0$  = fracción molar del  $CO_2$  en el agua a la entrada de la torre y que es igual a cero

$X_N$  = fracción molar del  $CO_2$  a la salida de la torre

Para calcular la relación molar del gas a la entrada se tiene la siguiente relación:

$$Y_{N+1} = \frac{y_{N+1}}{1 - y_{N+1}} \quad (3)$$

Donde:  $y_{N+1}$  = Fracción molar del  $CO_2$  a la entrada de la torre y se determina mediante:

$$y_{N+1} = \frac{Kg - mol CO_2}{Kg - mol CO_2 + Kg - mol N_2} = \frac{1,72}{1,72 + 10,59} = 0,140$$

Reemplazando el valor calculado en (3) se tiene:

$$Y_{N+1} = \frac{0,140}{1-0,140} = 0,162$$

Para determinar la masa de los gases:

$$V = \text{masa del } N_2 + \text{masa del } CO_2$$

$$\text{masa del } N_2 = 10,59 \text{ Kg} - \text{mol de } N_2 \times \frac{28 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg} \cdot \text{mol } N_2} = 296,52 \text{ Kg}$$

$$\text{masa del } CO_2 = 1,72 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_2 \times \frac{44 \text{ Kg}}{\text{Kg} - \text{mol } CO_2} = 75,68 \text{ Kg}$$

Luego.

$$V = (296,52 + 75,68) \text{ Kg} = 372,20 \text{ Kg}$$

$$\text{Cálculo de } Y_1 = \frac{\text{Kg-mol } CO_2 \text{ fuera}}{\text{Kg-mol } N_2 \text{ fuera}} \quad (4)$$

Análisis de recuperación porcentual: Sale 8% de  $CO_2$

(entra  $0,140 \text{ Kg} - \text{mol } CO_2$ ) (sale  $0,08 \text{ Kg} - \text{mol } CO_2$ )

$$= 0,011 \text{ Kg} - \text{mol } CO_2 \text{ fuera}$$

$$\text{Kg} - \text{mol } N_2 \text{ fuera} = 10,59 \text{ Kg} - \text{mol } N_2$$

Reemplazando por sus valores en (4) se tiene:

$$Y_1 = \frac{0,011 \text{ Kg} - \text{mol } CO_2 \text{ fuera}}{10,59 \text{ Kg} - \text{mol } N_2 \text{ fuera}} = 0,001$$

Para  $X_N$  =se absorbe en el agua 0,92 de  $CO_2$  (92%)

Reemplazando los valores obtenidos en (2) se tiene:

$$L = \frac{372,20 \text{ Kg} (0,162 - 0,001)}{0,92} = 65,30 \text{ Kg } H_2O$$

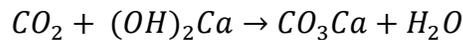
Total de agua  $L = (65,30 + 39,42) \text{ Kg} = 104,72 \text{ Kg } H_2O$

De los 75,68 Kg de  $CO_2$  que entran a la torre de absorción, 69,63 Kg de  $CO_2$  son absorbidos por los 104,72 Kg  $H_2O$  y 6,05 Kg de  $CO_2$  son enviados al medio ambiente.

13.5.1. Producción de carbonato de calcio ( $CO_3Ca$ ).

Los 69,63 Kg de  $CO_2$ , en lugar de ser absorbidos en agua, se los hace reaccionar con una solución de hidróxido de calcio,  $(OH)_2Ca$  (proceso de absorción con reacción química).

La reacción que se produce es la siguiente:



Cantidad de  $CO_3Ca$  producido.

$$69,63 \text{ Kg de } CO_2 \times \frac{1 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_2}{44 \text{ Kg de } CO_2} \times \frac{1 \text{ Kg. mol de } CO_3Ca}{1 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_2} \\ \times \frac{100 \text{ Kg de } CO_3Ca}{1 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_3Ca} = 158,25 \text{ Kg de } CO_3Ca$$

13.5.2. Cantidad de hidróxido de calcio requerido.

$$69,63 \text{ Kg de } CO_2 \times \frac{1 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_2}{44 \text{ Kg de } CO_2} \times \frac{1 \text{ Kg. mol de } (OH)_2Ca}{1 \text{ Kg} - \text{mol de } CO_2} \\ \times \frac{74 \text{ Kg de } (OH)_2Ca}{1 \text{ Kg} - \text{mol de } (OH)_2Ca} = 117,10 \text{ Kg de } (OH)_2Ca$$

Cantidad de agua producida.

$$69,63 \text{ Kg } CO_2 \times \frac{18 \text{ Kg } H_2O}{44 \text{ Kg } CO_2} = 28,48 \text{ Kg } H_2O$$

13.5.3. Cálculo del diámetro de la torre de absorción.

Se emplea la siguiente fórmula:

$$D = \left( \frac{4n \times 22,4 (273 + T) \times 760}{\pi v 3600 P \times 273} \right)^{1/2}$$

Donde:

n= moles totales que ingresan (14,5 Kg-mol/h)

T= temperatura de los vapores (20°C)

P= presión media (1565,6 mm Hg)

$v$  = velocidad de los vapores (0,91 m/seg)

Se sugiere para el cálculo de  $v$  valores comprendidos entre 0,91 a 1,83 m/s

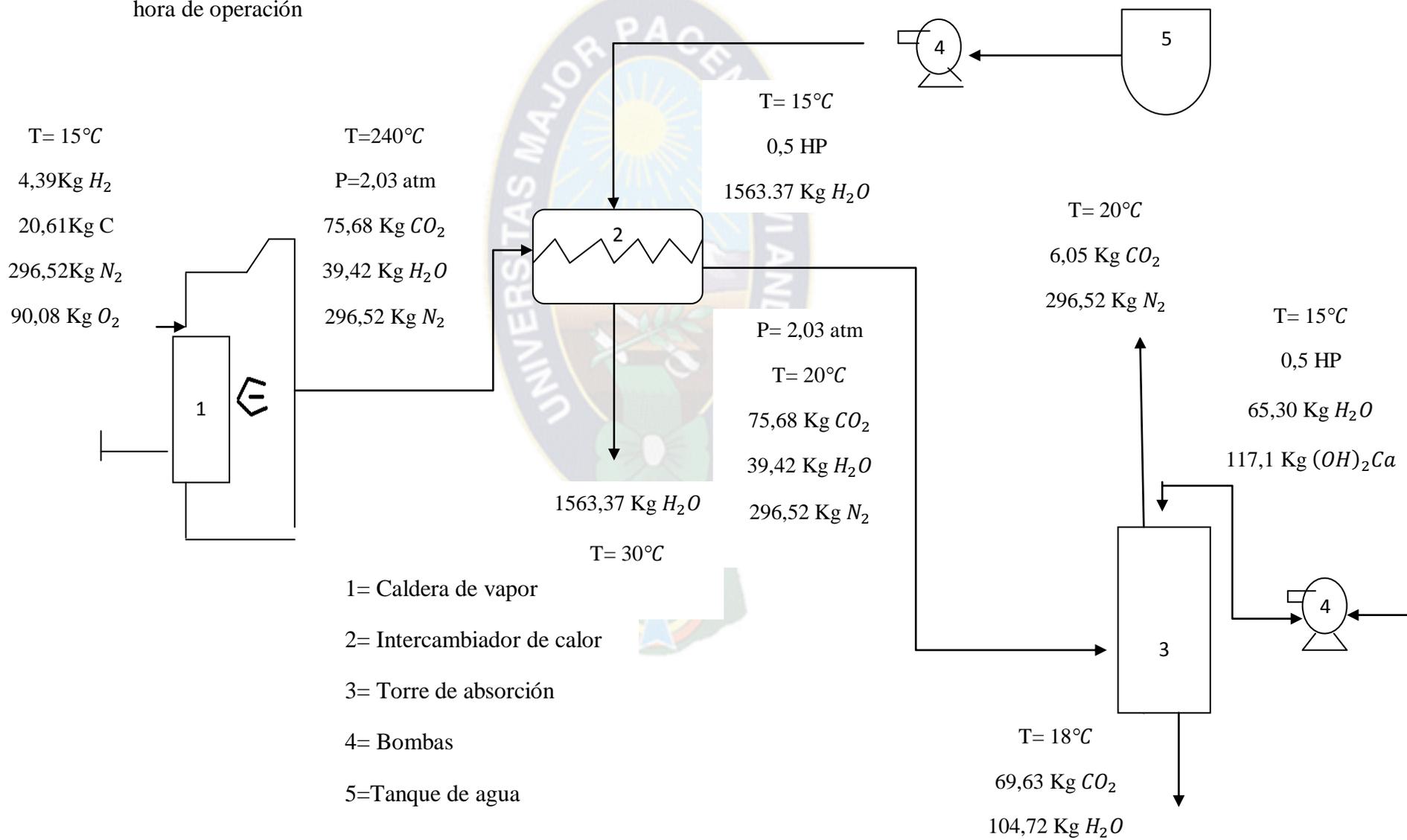
Reemplazando por sus valores en la fórmula:

$$D = \left( \frac{4 \times 14,5 \times 22,4 (273 + 20) \times 760}{\pi \times 0,91 \times 3600 \times 1565,6 \times 273} \right)^{1/2} = 0,26 \text{ m}$$

Altura de la torre 2,5 m.



13.6. Balance de materia y energía necesarias en el diagrama de flujo del equipo de mitigación de gases del proceso por hora de operación



- 1= Caldera de vapor
- 2= Intercambiador de calor
- 3= Torre de absorción
- 4= Bombas
- 5= Tanque de agua

28, 48 KG  $H_2O$  + 158,25 Kg  $CO_3Ca$

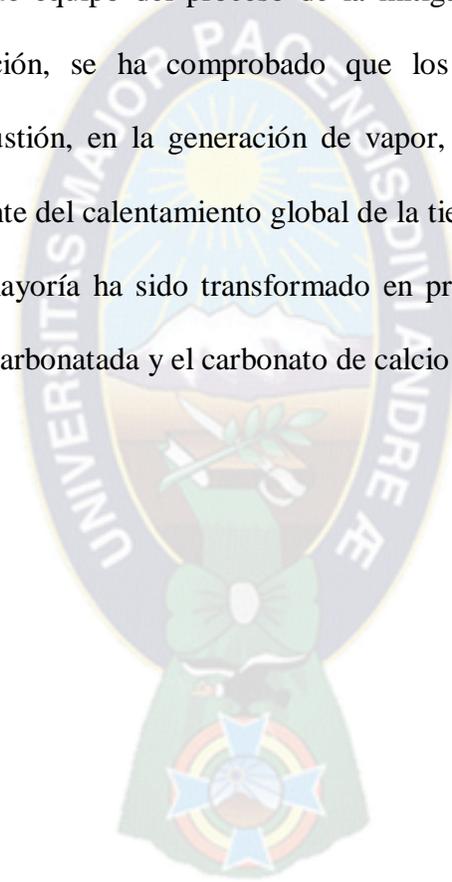
#### 14. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS CON LA QUE PARTIÓ LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.

Tomando en cuenta la hipótesis con la que se partió en la presente investigación, se ha comprobado que:

- El agua potable que utilizan los Hoteles Radisson y Plaza para la generación de vapor, es dura, contiene sustancias químicas tales como, calcio, magnesio y otras que dañan los tubos de las calderas, produciendo incrustaciones, como lo demuestran las tablas 8.1 y 8.2.
- Para disminuir la dureza que contiene el agua de alimentación aun valor mínimo, se ha empleado el proceso de intercambio iónico, utilizando para tal objetivo un ablandador con resinas catiónicas, las cuales permiten eliminar con exclusividad, los iones calcio y magnesio que endurecen el agua (fig. 8.1).
- Al no efectuarse el mantenimiento químico se producen incrustaciones en los tubos y superficies calientes de la caldera, ocasionando la corrosión, ruptura y disminución de la vida útil de los tubos, mayor resistencia a la transferencia de calor y uso de combustible en demasía.
- Mediante el empleo del programa de fosfatos coordinado, el programa solubilizante con dispersante, el tratamiento anticorrosivo con dosificaciones de fosfatos comprendidas entre valores de 25 a 44 ppm y el pH de 10 a 11 unidades (tabla 8.7), y las purgas efectuadas, se ha eliminado la dureza residual del agua, lo que permitió evitar la formación

de incrustaciones en los tubos y superficies calientes, dispersar las sustancias extrañas que se forman, aumentar la alcalinidad y eliminar los lodos formados dentro de la caldera.

- Mediante el balance de materia y energía mostrado en el diagrama de flujo de equipo del proceso de la mitigación de los gases por hora de operación, se ha comprobado que los gases formados debido a la combustión, en la generación de vapor, en especial el  $CO_2$ , el cual es causante del calentamiento global de la tierra y del efecto invernadero, en una mayoría ha sido transformado en productos inocuos, tales como el agua carbonatada y el carbonato de calcio (ver 13.6.).



## 15. CONCLUSIONES.

Las conclusiones obtenidas del trabajo efectuado son las siguientes.

15.1. Protección de los tubos y superficies calientes de la caldera generadora de vapor.

Para proteger los tubos y superficies calientes de la caldera, se ha empleado el plan de mantenimiento químico preventivo para controlar la dureza del agua, tanto fuera como dentro de la caldera generadora de vapor.

El mantenimiento químico ha permitido que en los tubos y superficies calientes de la caldera no se depositen sustancias extrañas denominadas incrustaciones.

Al mantener los tubos limpios de incrustaciones, se logra una buena transferencia de energía, se produce vapor a un menor tiempo de operación, se ahorra combustible, se evitan diferentes factores tales como, las pérdidas apreciables de carácter económico, el sobrecalentamiento, la corrosión, el arrastre de sólidos hacia los condensados, la rotura de los tubos, la disminución de la eficiencia y vida útil de la caldera.

15.2. Transformación de los gases de combustión producidos en la generación de vapor.

Los gases residuales producidos durante la combustión en la generación de vapor, en especial el  $CO_2$ , contaminantes del medio ambiente, causantes del efecto invernadero y del calentamiento global de la tierra, han sido transformados en productos inocuos, como ser, agua carbonatada y/o carbonato de sodio.

### 15.3. Beneficio para las empresas generadoras de vapor de agua.

El trabajo permitirá disponer a las empresas de un mantenimiento químico eficaz, para conservar limpios de incrustaciones sus sistemas de generación de vapor y el de preservar el medio ambiente que los rodea.

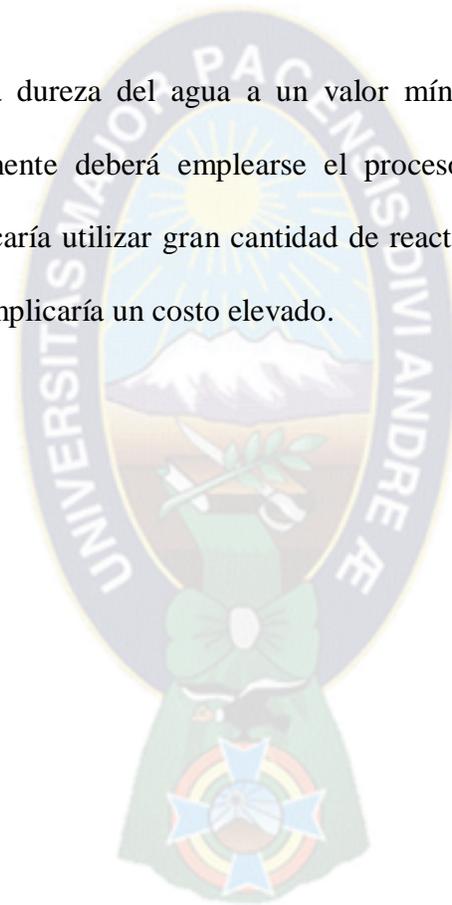


## 16. RECOMENDACIONES.

Se sugiere las siguientes recomendaciones.

- Para la eliminación de la dureza del agua que se utiliza en la caldera, para proteger los tubos y mantenerlos libres de incrustaciones, se deberá emplear el programa de fosfatos coordinado, el programa solubilizante con dispersante, el tratamiento anticorrosivo y las purgas intermitentes.
- Periódicamente se debe controlar la dosificación de los reactivos que se utilicen en la caldera generadora de vapor, para evitar incrustaciones en los tubos.
- Se debe tener precaución con las purgas largas, para evitar la pérdida de los reactivos utilizados en el mantenimiento químico, debido al costo elevado de los mismos.
- Es conveniente trabajar dentro de la caldera a pH comprendidos entre los valores de 10,5- 11,0 unidades, y concentraciones de fosfatos residuales de aproximadamente 40 ppm, para evitar corrosión en los tubos y superficies calientes.
- Controlar durante toda la vida útil de los tubos, el consumo de combustible en cada puesta en marcha de la caldera, hasta que se alcance la presión de vapor de 65 PSI, el cual deberá ser menor o igual a 152 Kg (caso, caldera del Hotel Plaza), por ser un buen indicador directo del estado de los tubos.
- Contar con personal capacitado en el mantenimiento químico preventivo y predictivo de las calderas generadoras de vapor para su buen funcionamiento.

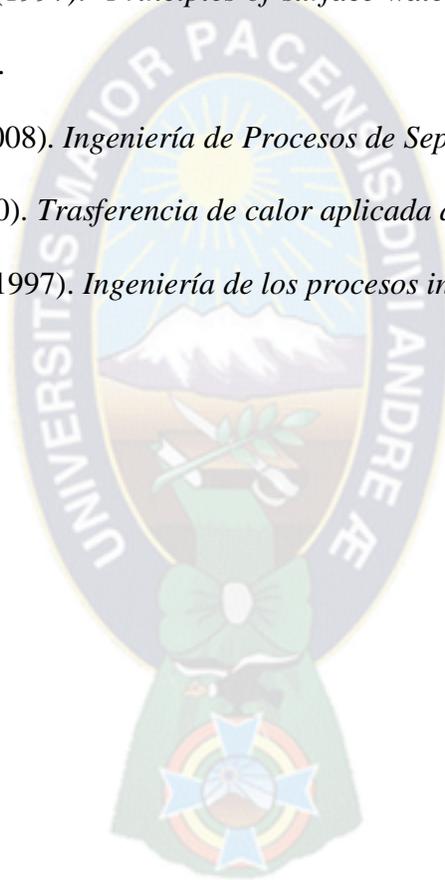
- Para no contaminar el medio ambiente con los gases producidos por la combustión en la generación de vapor, estos deben ser transformados, en especial el  $CO_2$  en productos inocuos.
- Se deberá contar con un presupuesto destinado para el mantenimiento químico de la caldera.
- Para reducir la dureza del agua a un valor mínimo antes de introducirla a la caldera, previamente deberá emplearse el proceso de intercambio iónico, caso contrario significaría utilizar gran cantidad de reactivos químicos en el tratamiento interno, lo que implicaría un costo elevado.



17. BIBLIOGRAFÍA

- a) Austin, T. (1995). *Manual de Procesos Químicos en la Industria*. Ed. Mc Graw Hill.
- b) Benedetti, J. (2012). *Manutencao centrada em confiabilidade e analise de vibracao*. Tesis de maestria.
- c) Calvimontes, W. (2011). *Desgaste del motor a gasolina por uso y mantenimiento y cuantificación de HC y CO*. Tesis de maestría.
- d) Espinoza, G. (2010). *Aplicada inorgánica, guía de laboratorio de análisis químico*.
- e) Foust, S. (1985). *Principio de Operaciones Unitarias*. Ed. CECSA
- f) Gonzáles, H. (1992). *G y H Consultores Asociados*.
- g) Gómez de León, C. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Ed. Murcia.
- h) Grenberg, A. (1985). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Diaz de Santos, S.A.
- i) Hernandez, R. (1997). *Metodología de la Investigación*. Ed. Mc Graw Hill.
- j) Himemelblau, (1988). *Balance de Materia y Energía*. Ed. Prentice Hall.
- k) Holzbock, W. (1993). *Instrumentos para medición y control*. Ed. Cecsca.
- l) Kitson, R. (1984). *Colorimetric determination of phosphorus as molybdovanadophosphoric acid*. Ed. Ind. Eng, Chem, Anal.
- m) Ling, F. (1988). *Equipos Industriales*. Ed. Mc Graw Hill
- n) Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de aguas industriales*. Ed. Mc Graw Hill

- o) Monmpin, J. (1991). *Ingeniería ambiental, residuos sólidos y contaminación*. Ed. Marcombo S.A.
- p) Rigora, M. *Tratamiento de aguas Industriales*. Ed. Marcombo
- q) Solar, F. (2007). *Mantenimiento mecánico de máquinas*. Ed. Al.
- r) Thomann, R. (1997). *Principles of surface water quality modeling and control*. Ed. McGraw Hill.
- s) Wankat, P. (2008). *Ingeniería de Procesos de Separación*. Ed. Prentice Hall.
- t) Welty, J. (1990). *Trasferencia de calor aplicada a la ingeniería*. Ed. Limusa.
- u) Williams, T. (1997). *Ingeniería de los procesos industriales*. Ed. Alhambra.



## 18. ANEXOS

### 18.1. CONTROL Y ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS COMPUESTOS

#### 18.1.1. Alcalinidad.

La alcalinidad del agua puede definirse como la capacidad para neutralizar ácidos o como la capacidad para reaccionar con iones hidrógeno.

La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad, es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión en equipos generadores de vapor.

En aguas naturales la alcalinidad es debida generalmente a la presencia de tres clases de iones.

- a) Bicarbonatos
- b) Carbonatos
- c) Hidróxidos.

En algunas aguas es posible encontrar otras clases de compuestos tales como los boratos, fosfatos que contribuyen a su alcalinidad.

La alcalinidad del agua se denomina por titulación con ácido sulfúrico (ácido fuerte) y se expresa como mg/l o ppm de carbonato de calcio equivalente a la alcalinidad determinada.

La fenolftaleína y metil naranja o el metacresol púrpura y el bomocresol verde, son los indicadores usados para la determinación de la alcalinidad.

La fenolftaleína vira a color rosado para valores de pH mayores a 8,3.

Análisis de agua procedente de EPSAS:

Se han determinado parámetros tales como: temperatura, pH, conductividad, alcalinidad, dureza y sólidos totales disueltos.

Determinación de la alcalinidad total del agua.

Se determinará los iones  $CO_3^{2-}$  y  $HCO_3^-$ .

Materiales:

Matraz aforado de 100 ml

Bureta de 50 ml.

Determinación del  $CO_3^{2-}$ .

Introducir en el matraz aforado 50 ml de la muestra de agua potable y añadir gotas de fenolftaleína.

Introducir en la bureta el ácido sulfúrico estandarizado y llevar a cabo el proceso de titulación.

Concentración del ácido sulfúrico 0,0207 N.

Volumen de ácido sulfúrico gastado en la titulación de 0,4 ml.

Se aplica la siguiente fórmula:

$$N_T V_T = N_R V_R \quad (1)$$

$$N_T = \frac{N_R V_R}{V_T} \quad (2)$$

Donde:

$N_R$  = normalidad del ácido sulfúrico (0,0207 N)

$V_R$  = Volumen gastado en la titulación (0,4 ml)

$V_T$  = Volumen de la muestra de agua (50 ml)

$N_T$  = Normalidad del ión  $CO_3^{2-}$

Efectuando cálculos en (2) se tiene:

$$N_T = \frac{0,4 \text{ ml} \times 0,0207 \text{ N}}{50 \text{ ml}} = 1,66 \times 10^{-4} \text{ N } CO_3^{2-}$$

$$\begin{aligned} \frac{1,66 \times 10^{-4} \text{ eq} - \text{g}}{1 \text{ l dis}} \times \frac{1 \text{ eq} - \text{g } CO_3Ca}{1 \text{ eq} - \text{g } CO_3^{2-}} \times \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g } CO_3^{2-}} &= 4,98 \frac{\text{mg}}{\text{l}} CO_3^{2-} \\ &= 4,98 \text{ ppm } CO_3^{2-} \end{aligned}$$

Determinación del ión  $HCO_3^-$ .

Introducir en el matraz aforado 50 ml de la muestra de agua potable y añadir gotas del indicador verde de bromocresol y titular con ácido sulfúrico estandarizado.

Concentración del ácido sulfúrico 0,0207 N.

Volumen de ácido sulfúrico gastado en la titulación 1,1 ml.

Se aplica la siguiente fórmula.

$$N_T V_T = N_R V_R \quad (1)$$

$$N_T = \frac{N_R V_R}{V_T} \quad (2)$$

Donde.

$N_R$  = Normalidad del ácido sulfúrico (0,0207 N)

$V_R$  = Volumen gastado en la titulación (1,1 ml)

$V_T$  = Volumen de la muestra de agua (50 ml)

$N_T$  = Normalidad del ión  $HCO_3^-$

Efectuándose cálculos en (2) se tiene:

$$N_T = \frac{1,1 \text{ ml} \times 0,0207 \text{ N}}{50 \text{ ml}} = 4,55 \times 10^{-4} \text{ N } HCO_3^-$$

$$\begin{aligned} \frac{4,55 \times 10^{-4} \text{ eq} - \text{g } HCO_3^-}{1 \text{ ldis}} \times \frac{60 \text{ g } HCO_3^-}{2 \text{ eq} - \text{g } HCO_3^-} \times \frac{1000 \text{ ml } HCO_3^-}{1 \text{ g } HCO_3^-} &= 13,65 \frac{\text{ml}}{\text{l}} \\ &= 13,65 \text{ ppm } HCO_3^- \end{aligned}$$

18.1.2. Determinación de la dureza total.

Preparación de soluciones.

Preparar una solución de 0,01 M de EDTA (250 ml).

$$250 \text{ ml} \times \frac{0,01 \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{372,4 \text{ g EDTA}}{1 \text{ mol}} = 0,931 \text{ g EDTA}$$

Preparar una solución de 0,01 M de  $CO_3Ca$  (250ml).

$$250 \text{ ml} \times \frac{0,01 \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100,09 \text{ g } CO_3Ca}{1 \text{ mol}} = 0,25 \text{ g } CO_3Ca$$

Solución buffer  $NH_4^+ / NH_3$  (50ml). Indicador NET.

EDTA= Ácido etilendiaminotetraacético

NET= Negro de eriocromot

Estandarización del EDTA a partir del patrón primario  $CO_3Ca$ .

Introducir en el matraz 20 ml de la solución de  $CO_3Ca$  0,01 M más 50 ml de agua destilada, 2 ml de la solución buffer y 6 gotas del indicador NET.

Colocar en la bureta 25 ml de EDTA 0,01 M (vira de color rojo vino a color azul).

Aplicando la siguiente fórmula:

$$M_T V_T = M_R V_R \quad (1)$$

$$M_T = \frac{M_R V_R}{V_T} \quad (2)$$

Donde:

$M_T$  = Molaridad del EDTA estandarizado

$V_T$  = Volumen gastado de EDTA (21 ml)

$M_R$  = Molaridad del EDTA no estandarizado.

$V_R$  = Volumen de la solución del  $CO_3Ca$  (20 ml)

Reemplazando en (2) por sus valores se tiene:

$$M_T = \frac{20 \text{ ml} \times 0,01 \text{ M}}{21 \text{ ml}} = 0,00952 \text{ M EDTA}$$

18.1.3. Dureza en la muestra de agua.

Introducir 50 ml de muestra de agua en el matraz, 2 ml de la solución buffer y 6 gotas del indicador NET y titular con EDTA estandarizado, 0,00952 M (existe un cambio de color rojo vino a color azul)

Aplicando la siguiente fórmula:

$$M_T V_T = M_R V_R \quad (1)$$

$$M_T = \frac{M_R V_R}{V_T} \quad (2)$$

Donde:

$M_R$  = Molaridad del EDTA estandarizado (0,00952 M).

$V_R$  = Volumen gastado de EDTA estandarizado en la titulación (10,9 ml)

$V_T$  = Muestra de agua (50 ml)

$M_T$  = Molaridad del ión  $Ca^{++}$

Reemplazando en (2) por sus valores se tiene:

$$M_T = \frac{10,9 \text{ ml} \times 0,00952 \text{ M}}{50 \text{ ml}} = 0,002075 \text{ M } Ca^{++}$$

$$\begin{aligned} & \frac{0,002075 \text{ mol } Ca^{++}}{1 \text{ ldis}} \times \frac{1 \text{ mol } CO_3Ca}{1 \text{ mol } Ca^{++}} \times \frac{100 \text{ g } CO_3Ca}{1 \text{ mol } CO_3Ca} \times \frac{1000 \text{ mg } CO_3Ca}{1 \text{ g } CO_3Ca} \\ & = 207,5 \frac{\text{mg}}{\text{l}} = 207,5 \text{ ppm } CO_3Ca \end{aligned}$$

Determinación de  $Ca^{++}$ .

Colocar en un matraz 50 ml de muestra de agua, 2 ml OHNa 1N, más una pisco de indicador sólido murexida y titular con EDTA estandarizado 0,00952 M.

Aplicando la siguiente fórmula se tiene:

$$M_T V_T = M_R V_R$$

$$M_T = \frac{M_R V_R}{V_T}$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$M_T = \frac{8 \text{ ml} \times 0,00952}{50 \text{ ml}} = 0,001523 \text{ M } Ca^{++}$$

$$\begin{aligned} & \frac{0,001523 \text{ mol } Ca^{++}}{1 \text{ ldis}} \times \frac{40 \text{ g } Ca^{++}}{1 \text{ mol } Ca^{++}} \times \frac{1000 \text{ mg } Ca^{++}}{1 \text{ g } Ca^{++}} = 60,92 \frac{\text{mg}}{\text{l}} Ca^{++} \\ & = 60,92 \text{ ppm } Ca^{++} \end{aligned}$$

Determinación del  $Mg^{++}$ .

El volumen gastado para el  $Mg^{++}$ , solo será la diferencia entre el volumen total gastado en la determinación de la dureza y el volumen que se gasta para el  $Ca^{++}$ .

$$(10,9 - 8) = 2,9 \text{ ml EDTA}$$

$$M_T = \frac{2,9 \text{ ml} \times 0,00952 \text{ M}}{50 \text{ ml}} = 0,0005521 \text{ M } Mg^{++}$$

$$\begin{aligned} \frac{0,0005521 \text{ mol } Mg^{++}}{1 \text{ ldis}} \times \frac{24,3 \text{ g } Mg^{++}}{1 \text{ mol } Mg^{++}} \times \frac{1000 \text{ mg } Mg^{++}}{1 \text{ g } Mg^{++}} &= 13,416 \frac{\text{mg}}{\text{l}} Mg^{++} \\ &= 13,416 \text{ ppm } Mg^{++} \end{aligned}$$

#### 18.1.4. Sólidos disueltos.

Se calcula de la siguiente manera.

- Pesar el crisol de porcelana.
- Colocar en el crisol de porcelana 20 ml de agua procedente de las purgas de la caldera generadora de vapor, y someter a evaporación en un baño maría hasta sequedad total, luego enfriar y volver a pesar el crisol y determinar la cantidad de los sólidos formados.

#### 18.1.5. Determinación de sólidos en suspensión.

- Pesar el papel filtro y colocar en un embudo.
- Filtrar 50 ml de agua procedente de las purgas de la caldera generadora de vapor, sacar el papel filtro con los sólidos retenidos.

- Someter a un proceso de secado, luego pesar y determinar los sólidos retenidos en el proceso de filtrado.

Sólidos + filtro de papel – filtro de papel exento de sólidos

Efectuar los cálculos para determinar su concentración en ppm.

#### 18.1.6. Determinación de fosfatos en aguas de calderas generadoras de vapor.

El procedimiento de análisis que se describe es específico para la determinación de fosfatos en muestras de agua, procedentes de la caldera generadora de vapor.

Se determina la cantidad de fosfatos, en aguas de caldera mediante un método sencillo como es la colorimetría.

Material necesario:

Un vaso de precipitado de 10 ml, pipetas aforadas de 2 y 5 ml, una probeta de 100 ml, una bureta de 10 ml, seis matraces de 50 ml, espátulas, un matraz de 500 ml, 2 matraces de 250 ml, 1 matraz de 100 ml, un vaso de precipitado de 500 ml, dos vasos de precipitado de 250 ml, un vaso precipitado de 100 ml, seis frascos cristal de borosilicatado, un vaso precipitado de 50 ml.

Instrumentación:

- Balanza analítica.
- Espectrofotómetro de absorción UV. Visible.

Reactivos:

- Ácido sulfúrico concentrado.
- Molibdato amónico.
- Tartrato amónico de potasio.
- Ácido ascórbico.
- Fosfato dihidrógeno de potasio.

#### Preparación de disoluciones.

- Ácido sulfúrico 5 N: diluir 70 ml de  $H_2SO_4$  concentrado (98%) sobre agua hasta un volumen final de 500 ml.
- Molibdato amónico 4%: disolver 10 g de molibdato amónico en agua, diluir a 250 ml.
- Tartrato antimónico potásico: disolver 0,2743 g de tartrato antimónico potásico en agua destilada hasta 100 ml.
- Ácido ascórbico 0,1 N: disolver 1,32 g de ácido ascórbico en 75 ml de agua.
- Reactivo mixto: mezclar 125 ml de ácido sulfúrico 5 N con 37,5 ml de disolución de molibdato amónico. Añadirle a continuación 75 ml de ácido ascórbico 0,1 N y 12,5 ml de disolución de tartrato antimónico potásico.
- Disolución madre patrón de fosfato de 1000 ppm: disolver 0,7160 g de  $KH_2PO_4$  en agua destilada y enrasar hasta 500 ml.
- Disolución patrón de fosfato de 50 ppm: tomar 5 ml de la disolución madre de 1000 ppm y diluir con agua destilada hasta 100 ml.

#### Procedimiento.

Obtención de la recta de calibrado.

En una serie de matraces de 50 ml introducir en el siguiente orden.

Nº de Matraces	B	1	2	3	4
Disolución patrón de 50 ppm de $PO_4^{3-}$ (ml)	0	0,5	1	2	3
Agua destilada (ml)	35	35	35	35	35
Reactivo mixto (ml)	8	8	8	8	8

Esperar 10 minutos hasta que se desarrolle el color y enrasar con agua destilada.

Efectuar las lecturas en el espectrofotómetro frente al blanco a 882 nm. Representar o calcular la recta de calibrado, relacionando valores de absorbancia frente a concentraciones de fosfato.

Determinación de fosfatos de aguas de calderas generadoras de vapor.

En una serie de matraces de 50 ml introducir en el siguiente orden:

Nº de los Matraces	A	B
Agua problema (ml)	5	5
Agua destilada (ml)	30	30
Reactivo mixto (ml)	8	8

Dejar que se desarrolle el color y llevar a un volumen final de 50 ml en un matraz aforado. Medir la absorbancia en el espectrofotómetro a 882 nm. Determinar la

concentración en el problema original a partir de la recta de calibrado. Expresar el resultado como la media  $\pm$  desviación estándar ( $\mu g/ml$ ).

#### 18.1.7. Test de fosfatos.

Para la determinación de fosfatos de las muestras procedentes de la caldera generadora de vapor, se emplea en método colorimétrico, que consiste en utilizar el reactivo Merckoquant Test de fosfatos  $\times 100$  strips, para concentraciones de fosfatos que están comprendidas entre 10-15-50-100-250-500 ppm. Los strips se introducen directamente en las muestras de agua, los cuales se tornan de un color amarillo y la intensidad de este color es proporcional a la concentración de fosfatos, dando valores de concentración directamente en ppm.

Esta determinación de fosfatos ha sido utilizada en el presente trabajo por ser un método rápido y preciso.

#### 18.1.8. Determinación del pH de las muestras.

Se ha utilizado un pH metro, obteniéndose los valores directamente.

## 18.2. Instrumentos de control y equipos utilizados.

Figura 18.2.1. Conductividimetro.



Figura 18.2.2 pH metro.



Figura 18.2.3. Caldera.

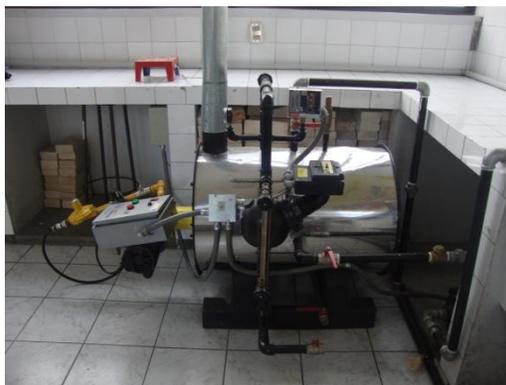


Figura 18.2.4. Vernier.



Figura 18.2.5. Espectrofotómetro de absorción UV visible.



Figura 18.2.6. Equipo de absorción.

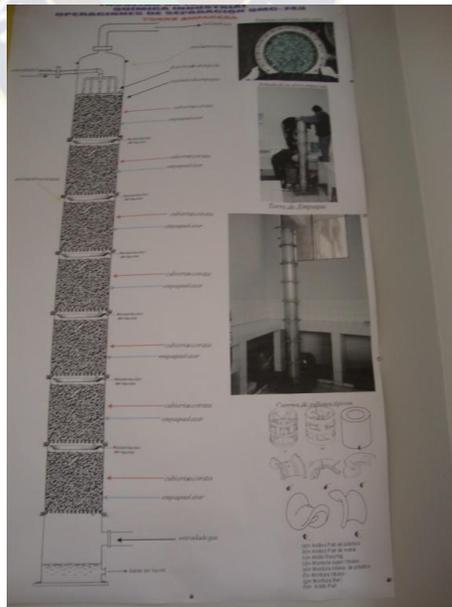


Figura 18.2.7. Intercambiador de calor.



Figura 18.2.8. Balanza analítica.



Figura 18.2.9. Equipo de titulación



### 18.3. Normas de control utilizadas.

#### 18.3.1. Informaciones químicas MERCK.

#### Calderas de baja presión

0- 250 PSI      0- 17 Kg/cm<sup>2</sup>

Parámetro químico	Agua de alimentación	Condensado	Agua de caldera
pH	8- 9,5	8- 8,5	10,5- 11,5
Sólidos totales disueltos (ppm)	+	10	3500
Alcalinidad total (ppm $CO_3Ca$ )	+	5- 10	300-600
Dureza total (ppm $CO_3Ca$ )	0	0	0-5
Cloruros (ppm $Cl^-$ )	+	0	Max 1000 ppm NaCl Max 600 ppm $Cl^-$
Fosfatos (ppm $PO_4^{-3}$ )	0	0	40-60
Silice (ppm $SiO_2$ )	+	0	Max 125
Hierro	++	0	++
Oxígeno	+	0	0
Sulfito (ppm $SO_3^{-2}$ )	0	0	20-40 +++
Hidracina	0	0	0,1-0,2 +++

+ Los valores correspondientes a cada parámetro dependerán de la calidad del agua suministrada al ablandador si no se utiliza un sistema de ablandamiento, los valores dependerán solo de la calidad del agua.

++ Los valores límites de hierro dependerán de la calidad del agua. Algunos autores dan tolerancia máxima de 0,1 ppm.

El hierro en estado iónico en el agua de caldera incrementará los sólidos totales disueltos, no siendo nocivo.

Debido al estado alcalino del agua precipitará eliminándose por purgas de fondo.

+++ Ambos parámetros se toleran en agua de caldera pero se dosifican en agua de alimentación.

### 18.3.2. Norma UNE 9- 075- 78 para aguas de calderas.

Presión ( $\text{kg/cm}^2$ )	$P = < 11$	$11 > P = < 17$	$P > 17$
Salinidad total (mg/l)	$= < 5000$	$= < 4000$	$= < 3000$
Sólidos en suspensión (mg/l)	$= < 300$	$= < 250$	$= < 200$
Alcalinidad total (mg/l)	$= < 1000$	$= < 800$	$= < 600$
pH a 20°C	9,5	a	11,5
Fosfatos (mg/l de $P_2O_5$ )	15- 40	15- 30	15- 25
Sílice (mg/l de $SiO_2$ )	$= > 200$	$= < 150$	$= < 100$