



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO OVERHAUL PARA  
CALDERAS PIROTUBULARES HASTA 350 BHP**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Mecánico

AUTORES: DARÍO XAVIER GUEVARA CARRERA  
RICHARD ALEXANDER ORTA SÁNCHEZ

TUTOR: ESTEBAN LEONIDAS RAMÍREZ GANGOTENA

Quito – Ecuador

2022

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Richard Alexander Orta Sánchez con documento de identificación 1550053209 y Darío Xavier Guevara Carrera con documentos de identificación 1723049928, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de mayo del 2022



---

Richard Alexander Orta Sánchez  
1550053209



---

Darío Xavier Guevara Carrera  
1723049928

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Richard Alexander Orta Sánchez con documento de identificación 1550053209 y Darío Xavier Guevara Carrera con documentos de identificación 1723049928, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Determinación del proceso de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares hasta 350 BHP”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de mayo del 2022

Atentamente,



Richard Alexander Orta Sánchez

1550053209



Darío Xavier Guevara Carrera

1723049928

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Leonidas Esteban Ramírez Gangotena con documento de identificación 1717176356, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DETERMINACIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO OVERHAUL PARA CALDERAS PIROTUBULARES HASTA 350 BHP realizado por Richard Alexander Orta Sánchez con documento de identificación 1550053209 y Darío Xavier Guevara Carrera con documentos de identificación 1723049928, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de mayo del 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

---

Ing. Leonidas Esteban Ramírez Gangotena, Msc

1717176356

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar esta tesis en primer lugar a mis padres, Víctor y Yolanda, quienes con su sacrificio lograron darnos la oportunidad de ser excelentes profesionales y personas de bien a mis hermanos y a mi persona.

A mis hermanos Andrés y Gabriela, que siempre estuvieron en los momentos más difíciles a lo largo de este camino y encontraron las palabras correctas para animarme.

A Dios, por la salud, la vida y el trabajo.

A mi esposa y a mi hija, quienes, con su amor, paciencia y comprensión, han logrado hacer de mí una mejor persona y motivarme para ser mejor cada día.

Con mucho amor.

**Darío Guevara**

Agradezco en primer lugar a Dios que me ha permitido llegar con salud a este punto tan importante de mi vida, a mis padres Fausto y Rosa que han sido un ejemplo para mí y han sabido apoyarme con todo lo necesario para ser un buen profesional, a mi hermano Jimmy que ha sido compañía para momentos tanto difíciles como alegres, a todos mis familiares que me han ayudado a sobresalir en mi carrera con su apoyo moral y académico y finalmente a todos mis amigos e ingenieros que me impulsaron de todas las maneras posibles en el transcurso de mi etapa universitaria.

**Richard Orta**

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos realizar un especial agradecimiento a nuestro tutor el Ingeniero Esteban Ramírez, MSc., por enseñarnos durante la carrera aspectos importantes de nuestra carrera, por guiarnos y encaminarnos en este trabajo de investigación con sus conocimientos y experiencia y sobre todo por su tiempo.

A la empresa Tecncalderas del Ecuador, por brindarnos los recursos necesarios y por todo el apoyo técnico para la realización de este Proyecto Técnico.

Finalmente, agradecemos a todos los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana del campus sur, quienes nos formaron como profesionales capaces de resolver cualquier problema en el ámbito laboral y sobre todo por los valores inculcados para ser excelentes personas.

**Richard Orta y Darío Guevara**

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Justificación.....	2
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Alcance.....	3
CAPÍTULO I.....	4
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	4
1.1 Estado del arte.....	4
1.2 Caldera.....	6
1.2.1 Tipos de calderas.....	6
1.3 Partes de una caldera pirotubular.....	7
1.3.1 Cuerpo de caldera.....	7
1.3.2 Espejo frontal y posterior.....	7
1.3.3 Tubo hogar.....	8
1.3.4 Haz de tubos.....	9
1.3.5 Compuertas.....	9

1.3.6	Base .....	10
1.3.7	Quemador .....	10
1.3.8	Válvula de descarga de vapor.....	11
1.3.9	Chimenea.....	12
1.3.10	Válvulas de seguridad .....	12
1.3.11	Registro pasa mano .....	13
1.3.12	Válvula de descarga .....	13
1.3.13	Control de nivel de agua McDonnell .....	14
1.4	Parámetros que disminuyen la eficiencia de una caldera pirotubular. ....	15
1.4.1	Tratamiento químico del agua de caldera. ....	15
1.4.2	Control del aire de alimentación y temperaturas.....	15
1.4.3	Aislamiento .....	16
1.5	Mantenimiento de calderas.....	17
1.5.1	Mantenimiento preventivo .....	18
1.5.2	Mantenimiento correctivo .....	18
1.5.3	Mantenimiento predictivo .....	18
1.5.4	Mantenimiento overhaul .....	19
1.6	Acero de construcción para calderas .....	19
1.7	Condiciones exigibles de la caldera .....	21
1.8	Procedimiento de pruebas hidrostáticas .....	21
1.8.1	Equipo para pruebas hidrostáticas.....	23
1.8.2	Normas estándar para pruebas hidrostáticas. ....	23
1.8.3	Aspectos positivos y negativos del ensayo de presión hidrostática .....	24
CAPÍTULO II .....		25
MARCO METODOLÓGICO .....		25
2.1.	Metodología para determinar las variables que caracterizan el estado de una caldera ....	25
2.2	Metodología para establecer los valores críticos de cada variable según normativas	
	ASME.....	29
2.2.1	Espesores mínimos.....	31
2.2.2	Soldadura.....	32
2.2.3	Material de fabricación de tubos y placas .....	33
2.2.4	Incrustaciones y depósitos.....	33

2.2.5 Tiempo de duración remanente .....	35
2.3. Procedimiento de diagnóstico de las variables críticas del estado del equipo .....	36
2.4. Metodología para la realización del proceso de pruebas hidrostáticas. ....	36
2.5. Metodología de análisis de costo. ....	38
CAPÍTULO III .....	39
DESARROLLO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS VARIABLES CRÍTICAS DE UNA CALDERA .....	39
3.1. Variables de evaluación del estado una caldera pirotubular .....	39
3.1.1. Tratamiento de agua .....	40
3.1.2. Incrustaciones y depósitos.....	41
3.1.3. Análisis de la hermeticidad del cuerpo y la tubería de las calderas .....	42
3.2. Correlación de variables del overhaul de una caldera pirotubular. ....	42
3.3 Resultados del proceso de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares .....	45
3.3.1 Planificación.....	45
3.3.2 Limpieza Externa e Interna de la Caldera .....	45
3.3.3 Actividades de desmontaje en calderas piro tubulares.....	46
3.3.4 Actividades de reensamblaje de calderas .....	47
3.3.5 Mantenimiento en Componentes y Accesorios .....	47
3.3.6 Cambio de Empaques.....	48
3.3.7 Inspecciones Visuales .....	48
3.3.8 Checklist del mantenimiento overhaul .....	49
3.3.9 Tiempo estimado de duración del mantenimiento overhaul .....	49
CAPÍTULO IV .....	53
ANÁLISIS DE COSTOS DE UNA CALDERA NUEVA VS UNA SOMETIDA A OVERHAUL.....	53
4.1. Cotización de una caldera PowerMaster de 100 BHP.....	53
4.2 Cotización para un overhaul de una caldera pirotubular 100 BHP. ....	55
4.3 Costos de mano de obra de overhaul de una caldera pirotubular 100 BHP .....	56
RESULTADOS .....	58
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	59
PRESUPUESTO .....	60
CONCLUSIONES .....	61

RECOMENDACIONES .....	63
LISTA DE REFERENCIAS .....	64
ANEXOS.....	70

## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de la válvula de seguridad. ....	70
Anexo 2. Ficha técnica del control de nivel McDonnell 150S.....	71
Anexo 3. Ficha técnica del control de nivel McDonnell 157S.....	72
Anexo 4. Ficha técnica del medidor de espesores para los ensayos .....	73
Anexo 5. Checklist para la limpieza interna del cuerpo de caldera pirotubular.....	74
Anexo 6. Herramienta expansora para tubos de fuego.....	75
Anexo 7. Herramienta expansora para tubos de fuego.....	76
Anexo 8. Checklist de la Prueba Hidrostática.....	77
Anexo 9. Checklist General del Mantenimiento Overhaul .....	78
Anexo 10. Diagrama de Gantt de mantenimiento overhaul de una caldera 100 BHP .....	79
Anexo 11. Ficha técnica cemento refractario Concrax 1500 .....	80
Anexo 12. Bomba de pruebas de presión hidrostática HRHG de 500 psi. ....	81
Anexo 13. Checklist de correlación de variables para definir mantenimiento overhaul.....	82
Anexo 14. Checklist de módulo principal de transferencia de calor de caldera. ....	83
Anexo 15. Checklist módulo secundario de accesorios de control de la caldera.....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coraza de caldera pirotubular con aislamiento.....	7
Figura 2. Espejo frontal y posterior de una caldera.....	8
Figura 3. Hogar de tubo liso y corrugado.....	8
Figura 4. Coraza de caldera con haz de tubos de 4 pasos. ....	9
Figura 5. Compuerta frontal y posterior abiertas. ....	10
Figura 6. Base de soporte de una caldera de 250 BHP.....	10
Figura 7. Quemador Riello RL 190 para una caldera de 100 BHP. ....	11
Figura 8. Válvula de salida de vapor.....	11
Figura 9. Chimenea de caldera.....	12
Figura 10. Válvulas de seguridad de caldera pirotubular.....	13
Figura 11. Registros pasa mano. ....	13
Figura 12. Válvula de descarga United de 2”.....	14
Figura 13. Control de nivel McDonnell 150S. ....	14
Figura 14. Condiciones exigibles para una caldera.....	21
Figura 15. Fallo de hermeticidad en prueba hidrostática. ....	22
Figura 16. Implementos necesarios para una prueba hidrostáticas. ....	23
Figura 17. Normas aplicables a pruebas hidrostáticas. ....	23
Figura 18. Casa de la calidad del servicio de overhaul. ....	25
Figura 19. Metodología para determinar las variables del estado de una caldera.....	28
Figura 20. Flujograma para determinar las variables que caracterizan a una caldera.....	29
Figura 21. Disminución de espesor por corrosión.....	32
Figura 22. Presencia de incrustaciones al interior de la caldera.....	35
Figura 23. Procedimiento para pruebas hidrostáticas.....	37
Figura 24. Bomba Helbert para pruebas hidrostáticas. ....	38
Figura 25. Incrustaciones en los tubos de humo y en el cuerpo de la caldera.....	40
Figura 26. Alternativas de tratamiento de aguas de caldera.....	41
Figura 27. Correlación de variables de mantenimiento overhaul.....	44
Figura 28. Tubos de fuego con presencia de hollín en su interior.....	46
Figura 29. Ajuste de tubos de fuego con la herramienta expansor.....	46
Figura 30. Empaques TOPOG-E 3” x 4” x 5/8”. ....	48
Figura 31. Procedimiento de mantenimiento overhaul .....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Exceso de aire mínimo en función del tipo de quemador y combustible .....	16
Tabla 2. Máxima temperatura en tubos permitidas por ASME y otros fabricantes de calderas.....	20
Tabla 3. Valores de los parámetros de evaluación de API – 580.....	27
Tabla 4. Parámetros admisibles para agua de caldera según norma BS – 2486.....	34
Tabla 5. Parámetros admisibles de agua de caldera norma UNE EN-12953-10.....	34
Tabla 6. Variables de evaluación en Calderas Piro-tubulares. ....	36
Tabla 7. Accesorios principales de la caldera. ....	39
Tabla 8. Pérdida de calor y aumento de combustible por incrustación en tubos. ....	41
Tabla 9. Especificaciones y precio de la caldera PowerMaster de 100 BHP .....	53
Tabla 10. Resumen de cotización.....	54
Tabla 11. Costos de Repuestos para mantenimiento overhaul .....	55
Tabla 12. Costos asociados a la mano de obra para overhaul .....	56
Tabla 13. Costos Totales de mantenimiento overhaul. ....	57
Tabla 14. Costos y tiempos de entrega de mantenimiento overhaul .....	57

## RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se presenta el desarrollo de un procedimiento de mantenimiento overhaul completamente práctico aplicado a calderas pirotubulares de 5 hasta 350 BHP y presentar una alternativa viable para la restauración completa de estos equipos.

Este proyecto se fundamenta en normativas ASME, ASTM, API Y UNE en las cuales se encuentran los procesos y materiales para la fabricación de calderas, procesos de evaluación de componentes y calidad del agua de calderas. Por lo cual se identificaron los componentes principales de una caldera además de los requerimientos esenciales de los clientes al solicitar un mantenimiento overhaul de una caldera pirotubular.

Se diseñó un modelo de evaluación de los componentes principales de una caldera mediante la aplicación de un proceso de evaluación de criticidad API, el cual permitió identificar los componentes críticos de la misma y con ellos elaborar un proceso de mantenimiento overhaul.

Se elaboró un flujograma de mantenimiento overhaul con los componentes críticos de una caldera con el cual se busca cambiar componentes que fallaron o están a punto de hacerlo bajo los estándares permitidos por ASME y dejando al equipo en condiciones “0 horas” de funcionamiento, incrementando su vida útil y reduciendo el capital necesario comparado con la compra de una caldera nueva de similares características.

Con estos antecedentes se vio la necesidad de determinar un procedimiento técnico de mantenimiento overhaul con la ayuda de flujogramas, fichas checklist y diagrama de Gantt para que operarios o encargados de mantenimiento de cualquier empresa puedan optimizar sus procesos de mantenimiento.

**PALABRAS CLAVE:** ASME, BHP, criticidad, mantenimiento, overhaul.

## **ABSTRACT**

In this titling project, the development of a completely practical overhaul maintenance procedure applied to fire-tube boilers from 5 to 350 BHP is presented, as well as presenting a viable alternative for the complete restoration of this equipment.

This project is based on ASME, ASTM, API and UNE standards in which the processes and materials for the manufacture of boilers, component evaluation processes and boiler water quality are found. Therefore, the main components of a boiler were identified in addition to the essential requirements of the clients when requesting an overhaul maintenance of a fire-tube boiler.

An evaluation model of the main components of a boiler was designed through the application of an API criticality evaluation process, which allowed to identify the critical components of the same and with them to elaborate an overhaul maintenance process.

An overhaul maintenance flowchart was developed with the critical components of a boiler with which it is sought to change components that have failed or are about to do so under the standards allowed by ASME and leaving the equipment in "0 hours" operating conditions, increasing the lifetime of the same and reducing the necessary capital compared to the purchase of a new boiler with similar characteristics.

With this background, it was seen the need to determine a technical procedure for overhaul maintenance with the help of flowcharts, checklists and Gantt charts so that operators or maintenance managers of any company can optimize their maintenance processes.

**KEYS WORDS:** ASME, BHP, criticality, maintenance, overhaul.

## INTRODUCCIÓN

Una caldera es una máquina térmica con la cual se produce vapor por medio de transferencia de calor entre un fluido como el agua y el calor generado por un combustible y cuya capacidad está dada por su superficie de calentamiento, son ampliamente utilizadas en varios procesos industriales que requieran altas temperaturas y se encuentran presentes en la mayor parte del entorno industrial del país.

En este proyecto se presentan cuatro capítulos cuyo contenido se resume de la siguiente forma:

En el capítulo uno, contiene las definiciones y conceptos necesarios para el entendimiento del tema y funcionamiento de calderas además de los parámetros que afectan el funcionamiento de estos equipos conjuntamente con las alternativas de mantenimiento diferentes al overhaul que existen.

En el capítulo dos, se presenta el método para establecer cuáles de los componentes de una caldera pueden ser considerados como críticos, conjuntamente con la metodología para establecer los valores críticos de cada variable, procedimientos necesarios para la comprobación de un correcto overhaul y metodología de análisis de costos del overhaul de calderas.

En el capítulo tres, se presentan valores de variables críticas que no se encuentran en ASME así como una correlación entre todas las variables críticas del capítulo anterior, con la cual se procede a elaborar un flujograma de procedimiento de mantenimiento overhaul con la ayuda de tablas, cronogramas de Gantt, valores de variables de criticidad y listas de checklist para una caldera de 100 BHP a modo de ejemplo debido a que el procedimiento es similar para el rango establecido en el título de este proyecto.

Finalmente, en el capítulo cuarto, se presentan un análisis técnico – económico de la compra de una nueva caldera en comparación al mantenimiento overhaul de una caldera de similar potencia, además del tiempo requerido para cada caso.

La empresa que brindó la asesoría para la realización de este proyecto es Tecnic Calderas del Ecuador, la cual lleva 21 años en el mercado, dedicándose a los servicios de construcción, asistencia técnica, venta de repuestos para calderas pirotubulares y otros equipos que forman parte de la industria de la producción ecuatoriana, se encuentra establecida en el sur de la ciudad de Quito – Ecuador, brindando sus servicios a varias empresas en todo el país.

Se espera que a través de este trabajo de titulación se establezca un correcto proceso de overhaul que pueda suplir los requerimientos de las empresas que opten por este tipo de mantenimiento, de forma que, independientemente de la causa por la cual se haya detenido el servicio de una caldera, se la pueda poner a punto obteniendo unas condiciones de operación comparables al de una nueva.

### **Planteamiento del problema**

Las calderas generadoras de vapor son máquinas esenciales en los diferentes procesos productivos en la industria. Cuando cumplen su ciclo de vida, estos equipos son dados de baja por las industrias y son reemplazados por equipos nuevos cuyo costo es muy elevado. Es por eso por lo que, como alternativa al reemplazo de equipos costosos, se propone el mantenimiento overhaul de equipos cuya vida útil aparentemente ha finalizado, y transformarlos en equipos totalmente funcionales, reduciendo costos de manera considerable.

Con el problema descrito, se crea una interrogante a resolver con este proyecto técnico: ¿Podrá la aplicación de un procedimiento de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares de hasta 350 BHP ahorrar costos de manera significativa de manera que la caldera pueda volver a un estado similar al de un equipo nuevo?

### **Justificación**

Para la elaboración del procedimiento de mantenimiento overhaul se hará uso de artículos científicos, libros, revistas, catálogos además de la información por especialistas en mantenimiento de calderas obteniendo tiempos exactos de mantenimiento de calderas, se comparará los costos de materia prima invertida en el overhaul de una caldera de 100 BHP con uno nuevo, recalcando la importancia que brinda a la industria este tipo de mantenimiento, debido a que da la oportunidad de ahorrar costos y mejorar la producción mediante la recuperación de las calderas a través de un mantenimiento overhaul. Son fundamentales conocer los procedimientos de desmontaje de calderas, los materiales de construcción para soportar las altas temperaturas y presiones a la cual se encuentra sometida la caldera, los tipos de uniones y los procedimientos de pruebas hidrostáticas para la determinación de tiempos de mantenimiento en el mantenimiento overhaul de calderas, con estos datos un encargado de la producción puede tener una idea más clara de los tiempos de mantenimiento en una planta

permitiendo así una optimización de la producción y ahorro de dinero para la empresa a largo plazo.

### **Objetivo General**

Determinar el procedimiento de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares hasta 350 BHP

### **Objetivos Específicos**

- Definir las variables que caracterizan el estado técnico del equipo.
- Determinar el procedimiento de diagnóstico de las variables críticas del estado del equipo.
- Correlacionar los niveles de aceptación y rechazo de las variables identificadas para la decisión del mantenimiento overhaul.
- Elaborar el procedimiento de mantenimiento overhaul de la caldera pirotubular.
- Realizar el análisis técnico económico del mantenimiento overhaul en comparación con una caldera nueva.

### **Alcance**

La aplicación de esta alternativa de mantenimiento se puede realizar y comprobar en los talleres de la empresa TECNICALDERAS DEL ECUADOR, que tiene las herramientas necesarias para aplicar el procedimiento de mantenimiento overhaul.

La empresa se encuentra ubicada en el sur de Quito, en el barrio Santa Bárbara Baja, calles Tabiazo y Arsenio Andrade S24 42

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Este capítulo presenta los conceptos necesarios acerca de las calderas pirotubulares, los tipos de mantenimiento a los cuales son sometidas juntamente con las actividades de desmontaje y reensamblaje, además de las normativas que rigen la elección y construcción de estos generadores de vapor.

### 1.1 Estado del arte

Las tareas de mantenimiento dan como resultado no solo un buen desempeño del equipo, como lo demuestran Behzad et al [2], realizaron un estudio en una sala de calderas de vapor mediante la aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo, comprobando así la eficacia de este, reduciendo el consumo de energía, con un ahorro de 591312 kWh y 151795 litros de agua; esto, representando un ahorro de 2330 dólares en recursos y 35400 dólares en costos de mantenimiento.

A menudo ocurren incrustaciones en los tubos de la caldera, estas son la principal amenaza al estado óptimo de una caldera, Pourabdollah [3] realizó un trabajo de investigación para conocer la composición de las incrustaciones en una caldera, fue un estudio durante 6 años a dos calderas de 3 pasos en un rango de presión de 1378.95 kPa comprobando la composición química de los depósitos encontrados en el exterior de los tubos en los cuales pudo observar la formación de escamas compuestas principalmente de carbonatos y minerales de hematita.

Las fallas por tubos rotos o fugas por lo general se reparan con soldadura sin embargo no es recomendable hacer esto, Liu et al [4] realizaron un estudio en una tubería de humos de caldera reparada con soldadura la cual finalmente falló. Analizaron el tubo por espectroscopia dispersiva de energía y difracción de rayos X encontrando la presencia de productos corrosivos, grietas intergranulares, descarbonización severa y degradación del desempeño mecánico.

De igual manera Mostafa et al [5] analizaron una falla de un tubo de caldera por el lado del agua de acero ASTM A213 Grado T2. En primera instancia aplicaron técnicas de observación macroscópica indicando una fuerte deposición de soldadura de reparación a lo largo de la falla además de una ranura, sin embargo en análisis previos no se reconocieron alteraciones considerables de dureza y microestructura, se obtuvo una alta presencia de óxido de vanadio sódico por el lado de fuego de la tubería y pese a que esto probablemente no fue el factor de la

falla los autores recomendaron que se limpien estas capas de corrosión además de emplear combustibles con una menor cantidad de Na y V.

Uno de los mayores problemas por el cual se para una caldera es por la falla de uno o más tubos de paso de humo. Xue al [6] investigaron las razones por las cuales fallan estos tubos en uno de acero carbono medio SA – 210 Grado C, realizaron observaciones macroscópicas, análisis de composición química, rendimiento mecánico, microscopía óptica y espectroscopia de dispersión de energía. Señalan que cuando la concentración de NaOH es superior al 5 % disuelve la película protectora magnética en la superficie del acero quedando expuesta y produciendo corrosión alcalina, esta es señalada como la principal causa de falla del tubo.

Al ser la corrosión en caliente una de las principales fallas en las calderas investigadores busca materiales alternativos o modificaciones de estos para no tener que aplicar mantenimientos correctivos tan a menudo. Kumar et al [7] investigaron el posible uso de un recubrimiento para frenar la corrosión, encontraron que el metal de los tubos de caldera puede recubrirse con cualquier sustrato con procesos de recubrimiento por pulverización térmica con un espesor alrededor de 200  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  además de seleccionar revestimientos a base de Ni y Cr pues señalan que estos tienen una resistencia a la corrosión en caliente muy alta.

De igual manera es importante la forma de unión de los tubos con la placa de tubos, una de las opciones es la soldadura a pesar de que esta no está exenta de fallas son puestas a prueba con pruebas hidrostáticas. Sui et al [8] realizaron un análisis de las fugas de unión de tubos y placa por medio de análisis químico del material y evaluación de la dureza y perfil de fractura de grieta. Encontraron que la microestructura ferrita – perlita del material no era la causa de la falla y consecuentemente la fuga, sino que las grietas inician en la raíz de la soldadura y se expandieron hacia el tubo, la concentración de tensión fue tal que fue la necesaria para una corrosión cáustica siendo esta la fuente de la falla, llegaron a la conclusión que se debe controlar la velocidad de enfriamiento de la soldadura y realizar un tratamiento térmico para reducir la tensión residual de la misma.

## **1.2 Caldera**

Una caldera se puede considerar como un aparato térmico isobárico, metálico y hermético que funciona a través de la interacción de una fuente de calor con el agua, cambiando su estado, una caldera es imprescindible dentro de una planta de generación de energía térmica, de la cual viene su término por el cual es mayormente conocido definido como un generador de vapor [9].

El diseño de generadores de vapor está hecho de tal manera que transfiere el calor procedente de un foco caliente que suele ser un combustible líquido, dicho líquido debe estar sujeto a ciertas condiciones de seguridad y estándares por seguridad. El vapor de agua o agua caliente se suministra bajo ciertas condiciones requeridas de temperatura presión y calidad [10].

### **1.2.1 Tipos de calderas**

Una caldera trabaja generalmente con agua, la cual se convierte en vapor y se puede encontrar en sus variantes de vapor saturado o sobrecalentado según sean las condiciones requeridas por el aparato consumidor, por otra parte, si el fluido es agua en estado líquido y se encuentra a una temperatura mayor que el punto de ebullición, la caldera se considera de agua sobrecalentada.

La energía necesaria para que el agua cambie de estado ocurre gracias a la forma de aportación calorífica, existiendo calderas para combustibles sólidos, líquidos, gaseosos, mixtos y eléctricos, siempre que se utiliza un combustible es necesario de un lugar donde se pueda consumir, este es el hogar de la caldera y puede situarse en el interior o el exterior de esta.

Cuando se realiza la combustión, los gases generados recorren el interior de los tubos de fuego de la caldera, con lo cual pasará a denominarse caldera pirotubular o de tubos de humo, caso contrario si el líquido recorre el interior de los tubos es denominada caldera acuotubular aunque también existen las denominadas mixtas que constan de ambos modos de intercambio de calor [11].

De estos generadores de vapor existen múltiples tipos, para la situación de estudio de esta tesis tendremos en cuenta la caldera de configuración pirotubular. Abarca P. [12] indica que este tipo de generador de vapor pueden ser vertical u horizontal, además constan de un hogar interior con retorno simple o doble, y dependiendo del llenado de agua se lo puede usar en configuración de tubos semisumergidos y de tubo totalmente sumergidos, las fuentes de calor o combustible pueden ser líquidas (diésel, bunker, aceite térmico) o sólidas (carbón, leña).

### 1.3 Partes de una caldera pirotubular

Existen diferentes tipos de calderas, su tamaño depende de la potencia en BHP que la misma es capaz de generar, pero en esencia todas constan de los mismos componentes.

#### 1.3.1 Cuerpo de caldera

También denominado coraza, generalmente diseñado en láminas o planchas de acero en la cual se alojan el hogar, la cámara de agua y los tubos de humos [13]. El cuerpo y en general cualquier placa sometida o no a presión debe cumplir con la especificación ASME PG-6 [14] y generalmente después de la fabricación y ensamblaje se lo recubre de un material aislante. Ver figura 1.



Figura 1. Coraza de caldera pirotubular con aislamiento.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío

#### 1.3.2 Espejo frontal y posterior

Los espejos son tapas que lleva el cilindro llamado envolvente en cada uno de sus extremos, estas tapas están constituidas de muchos agujeros en donde van colocados los tubos del hogar. Estos espejos están constituidos de acero ASTM A515 que alojan los tubos de fuego cuyo material permite el trabajo a altas temperaturas, según la norma ASME PG 6 [14], además dicho material debe ser capaz de tolerar factores destructivos como la presión, corrosión, choques térmicos, oxidación. Ver figura 2.



Figura 2. Espejo frontal y posterior de una caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío

### 1.3.3 Tubo hogar

Andaur [15] define al tubo hogar como el lugar donde se realiza la reacción de combustión, en uno de sus extremos está conectado el quemador la distancia y el diámetro del hogar varía en función del tipo de caldera y su potencia.

El hogar comúnmente es de tubo liso, sin embargo, existen también configuraciones llamadas corrugadas las cuales producen mayor turbulencia de los gases de combustión y mejoran la eficiencia de la caldera como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Hogar de tubo liso y corrugado.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.4 Haz de tubos

Conocido también como tubos de humos, se compone de varios tubos en el 90 % de 2" y 2.5 " de espesor 2.9 mm según la norma de especificación estándar para tuberías de acero negro y sumergido en caliente ASTM A53 / A53 M – 20 [16] , debido a que en estos sólo circulará los gases de combustión a altas temperaturas, esto quiere decir que estas son las principales superficies de transferencia de calor con las cuales se pueden dimensionar los BHP de una caldera.

Como manera de aprovechar al máximo la energía presente en los gases calientes muchas veces se hace pasar más de una vez los gases a través de la cámara de agua, esto se logra colocando otro haz con un menor número de tubos tratando de mantener la misma tasa de transferencia de calor como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Coraza de caldera con haz de tubos de 4 pasos.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.5 Compuertas

Con el fin de lograr una actividad de limpieza y mantenimiento más eficiente, una caldera pirotubular consta de compuertas en la parte delantera y trasera las cuales pueden abrirse y generalmente se encuentran empernadas, son metálicas y abisagradas, en una de ellas se encuentra acoplado el quemador, mientras que en la otra aloja en su interior cemento refractario [17], en la figura 5, la compuerta frontal aloja el quemador mientras que la compuerta posterior contiene material refractario debido a la llegada de gases de alta temperatura.



Figura 5. Compuerta frontal y posterior abiertas.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.6 Base

Con la finalidad de aislar la caldera del suelo, las calderas se montan sobre bases construidas comúnmente de 15 cm y nivelarlas para evitar transmitir vibraciones que la caldera pueda producir en su funcionamiento [18], Por otro lado, las calderas ya cuentan con apoyos pintados con un material anticorrosivo como se puede apreciar en la figura 6, dejando a elección del cliente el colocar una base extra de concreto en el suelo.



Figura 6. Base de soporte de una caldera de 250 BHP.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.7 Quemador

Es necesaria una fuente de energía para el funcionamiento de la caldera y esta es proporcionada por un quemador. Lizana y Velasco [19] define al quemador como un mecanismo que provoca calcinación que dependiendo del carburante existen diferentes tipos de quemadores compuestos

principalmente por un abastecimiento de aire o ventilador, válvulas solenoides, bomba de combustible, ductor de combustible, boquillas y detector de llama, en la figura 7 se observa un quemador Riello RL 190 que cumple con todas las características mencionadas anteriormente.



Figura 7. Quemador Riello RL 190 para una caldera de 100 BHP.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.8 Válvula de descarga de vapor

Son simplemente válvulas para detener, iniciar o regular el paso del vapor de la caldera, sin embargo, hay que tener puntos en cuenta como lo señala Latre [11], una válvula de salida de vapor debe tener un tamaño considerable en la cual la velocidad de salida del vapor saturado se encuentre entre 30 a 40 m/s [20], en la figura 8 se presenta una válvula de salida de vapor de 2 pulgadas.



Figura 8. Válvula de salida de vapor.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.9 Chimenea

Una vez que los gases de la combustión pierden toda su energía por transferencia de calor al agua es necesaria una vía de escape por lo cual se instala una chimenea en las calderas esta generalmente es vertical y se encuentra cubierta por una envoltura aislante y resistente. Ver figura 9 [21].



Figura 9. Chimenea de caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.3.10 Válvulas de seguridad

Al aumentar la temperatura dentro de la caldera la presión también aumenta; una válvula de seguridad es necesaria debido a que es la encargada de reducir la presión dentro de la caldera, esta se abre cuando la presión supere cierto nivel que viene dado por el fabricante, por ejemplo, una válvula marca Emerson del anexo 1, cuya presión de ajuste es 20.7 bar y según las normas ASME en el apartado PG-73.2.4 [14] se debe activar si está sometida al menos al 75 % de la presión de ajuste.

Como se muestra en la figura 10, se agrega 2 válvulas de seguridad tipo resorte de ser necesarias, puesto que debe garantizar el alivio de presión. Sarkar [22] señala que el volumen de descarga total de todas las válvulas de seguridad debe ser igual o mayor que la generación de vapor de la caldera, sin embargo, algunos autores señalan que debe dimensionarse un 10 % más que la capacidad nominal de la caldera, para evitar fallos por sobrepresión.



Figura 10. Válvulas de seguridad de caldera pirotubular.

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío.

### 1.3.11 Registro pasa mano

Son pequeñas compuertas ubicadas generalmente en un costado de la caldera y sirven para inspeccionar el estado de la tubería sin la necesidad de abrir la tapa frontal o trasera. Como se puede apreciar en la figura 11, los registros pasamano deben llevar empaques para poder sellar herméticamente la caldera.



Figura 11. Registros pasa mano.

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

### 1.3.12 Válvula de descarga

Es una válvula generalmente tipo compuerta instalada en la zona de purga de la caldera, encargada de evacuar algún depósito sólido que se haya filtrado o de vaciar la caldera, presentado en la figura 12.



Figura 12. Válvula de descarga United de 2”.

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

### 1.3.13 Control de nivel de agua McDonnell

Es un componente de vigilancia del nivel de líquido al interior de la caldera, funciona conjuntamente con la bomba de alimentación y el quemador. En el [anexo 2](#) y [anexo 3](#) se presenta las fichas técnicas de los controles McDonnell comúnmente usados en la empresa como se logra distinguir en la figura 13.



Figura 13. Control de nivel McDonnell 150S.

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío

#### **1.4 Parámetros que disminuyen la eficiencia de una caldera pirotubular.**

Una caldera pirotubular por ser un equipo que se encuentra en constante trabajo bajo presiones y altas temperaturas, es de vital importancia mantenerla en condiciones óptimas de funcionamiento. Los métodos usuales para determinar la eficiencia en una caldera según Wang et al. [23] son: el método directo que compara la energía ganada por el fluido de trabajo con el contenido de energía del combustible, el método indirecto que resta la suma de los porcentajes de varias pérdidas de calor del 100 %, y el método de computación suave que va de la mano con el desarrollo de computadoras e inteligencia artificial que consta de un sistema de control distribuido y sistema de monitorización continua de emisiones

##### **1.4.1 Tratamiento químico del agua de caldera.**

Para un proceso de tratamiento químico de agua se opta por ósmosis inversa o intercambio iónico, el primero consta de una membrana fina por la cual fluye el agua desde una concentración de soluto baja a una concentración de soluto alta, estas membranas por lo general son de acetato de celulosa, triacetato y polímeros de poliamida [24]. El potencial de ensuciamiento del agua se conoce como índice de densidad de sedimentos (SDI, por sus siglas en inglés), un valor SDI > 6 indica que es probable que se produzcan incrustaciones y por lo tanto es necesario una filtración previa a osmosis inversa [25].

La formación de depósitos disminuye la eficiencia de generación de vapor de la caldera, son causados por la presencia de hierro y cobre en el agua, generalmente son controlados con el uso de filtros antes de la bomba de entrada de agua, a su vez también debe controlarse la dureza del agua que también permite la presencia de depósitos, pero estos aparecen por la presencia de incrustaciones que son difíciles de remover e incluso una capa delgada sirve como aislante ya que estas costras tienen una conductividad térmica de orden menor que el valor del acero al desnudo. Por ejemplo, la conductividad térmica del acero es 15 kcal/m<sup>2</sup>h mientras que para el CaSO<sub>4</sub> es de 1 – 2 kcal/m<sup>2</sup>h, para CaCO<sub>3</sub> 0.5 – 1 kcal/m<sup>2</sup>h y para SiO<sub>2</sub> es de 0.2 – 0.5 kcal/m<sup>2</sup>h [25]. El control de pH del agua de caldera debe mantenerse en un rango de 7 a 10 para evitar problemas de corrosión y depósitos [26].

##### **1.4.2 Control del aire de alimentación y temperaturas**

Se tiene en cuenta principalmente la temperatura a la cual los gases de combustión salen de la chimenea y la temperatura del agua de alimentación, con lo cual se busca que los gases a la salida de los tubos de humo tengan un valor mínimo de temperatura, por ejemplo Oelker [27]

señala que por cada 50 ° C de reducción de la temperatura de los gases de escape, es posible aumentar la eficiencia en un 1.5 % lo que se traduce en un ahorro de combustible de un 2 %. Debido a las temperaturas del agua de alimentación, una caldera incrementa su eficiencia, mientras mayor sea la temperatura del agua de alimentación debido a que se necesitará menos energía para producir vapor, aumentar 5° C de temperatura de agua de entrada de la caldera implica un incremento del 1 % de la eficiencia [28].

El exceso de aire está relacionado con la porción de aire necesaria para lograr una combustión eficiente [29], se demostró que la cantidad de exceso de aire necesario en una caldera puede cambiar en función al tipo de combustible utilizado, en la tabla 1 se presenta los excesos de aire mínimo permitidos según el autor.

**Tabla 1.** Exceso de aire mínimo en función del tipo de quemador y combustible [29].

Combustible	Tipo de Quemador	Exceso de aire mínimo
Gas natural	Atmosférico	65 %
	Tipo Anillo	45 %
	Boquilla	10 %
	Bajo exceso de aire	1 %
Petróleo	Atomizado por presión	15 %
	Copa rotativa	22 % - 35 %
	Atomizado con vapor o aire	8 % - 15 %
Carbón	Parrilla móvil	36 %
	Parrilla fija	36 %
	Pulverizado	8 %

### 1.4.3 Aislamiento

Una caldera transfiere energía desde la fuente de calor al fluido para cambiar su estado, generalmente agua, todo esto dentro de una cámara metálica, pero, los metales en su mayor parte tienen un coeficiente de transferencia de calor alto, por ejemplo, aceros al carbono – manganeso – silicio, aceros al cromo bajo, aceros al cromo molibdeno y al cromo vanadio tienen coeficientes de conductividad térmica de 41, 37.7, 42.3 y 48.9 W/m·K respectivamente [30], y si bien esto es beneficioso para la generación del vapor, hay áreas de la caldera donde no se requiere una transferencia de calor alta, más bien esto puede afectar la eficiencia de una

caldera, es por esto que se pueden usar una variedad de materiales específicos como por ejemplo algunos tipos de fibra cerámica, fibra de vidrio, hormigón refractario y ladrillos refractarios.

Jiménez et al [31] realizaron un análisis termográfico en una caldera pirotubular modelo CMS-660 para evidenciar las pérdidas por transferencia de calor en las paredes, los autores observaron un marcado aumento de temperaturas en algunas zonas de la tapa frontal alcanzando en algunos puntos valores máximos de 210 °C que conjuntamente con sus otros valores de temperatura representa una temperatura promedio de zona de 900 °C, del mismo modo en las superficies laterales la temperatura oscilaba alrededor de 600 °C, en la zona donde se encuentran los remaches de las planchas y en la tapa trasera los máximos llegaban a 190 °C siendo el promedio 100 °C; concluyeron que es una situación totalmente desfavorable y supone grandes pérdidas de calor al medio por radiación y convección, por ende, una pérdida de eficiencia, estas situaciones pueden ser provocadas por falta de aislamiento o deterioro del mismo en la parte frontal y mal ajuste del quemador o mal alistamiento en la parte trasera.

### **1.5 Mantenimiento de calderas**

Una actividad de mantenimiento en calderas busca garantizar la producción de vapor nominal de una caldera, y a la vez reducir los costos de operación, por lo cual es de vital importancia mantenerlas operativas. Agarwal y Suhane [32] señalaron aspectos a tener en cuenta al momento de reemplazar o dar mantenimiento a una caldera como el historial de servicio de la misma, horas de operaciones, condiciones en las cuales está o estuvo funcionando, análisis de la capacidad de la caldera además de las mejoras que se hayan hecho a la misma y el agua de alimentación.

Existen diferentes tipos de mantenimientos que se pueden hacer a estas, generalmente las más conocidas son correctivo, predictivo y preventivo, sin embargo la clasificación que se toma en cuenta es la establecida por la norma europea EN – 13306 [33] que divide a los tipos de mantenimiento en programado y no programado, los primeros pueden ser mantenimientos preventivos para garantizar el buen funcionamiento del equipo y los no programados son los mantenimientos correctivos que se realizan generalmente al momento de presentarse una falla.

### **1.5.1 Mantenimiento preventivo**

Forma parte de los mantenimientos programados sean estos semanales, mensuales, semestrales, anuales. Estos se realizan con la finalidad de mantener al mínimo los tiempos de mantenimiento al prever las posibles fallas de componentes atenuando los costos de reparación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este tipo de mantenimiento no presenta una alternativa concreta a los inconvenientes de una planta térmica; es sencillamente una distribución organizada de las actividades que comúnmente se han realizado.

En la actualidad con los altos niveles de productividad requeridos en una industria se exige la instauración de un procedimiento de mantenimiento programado preventivo, aunque esto va de la mano con la cantidad y calidad de datos e información del área o máquina con la que se cuenta para ejecutarlo, es decir, mientras mejor se conozca a la máquina, mejor será el mantenimiento [34].

### **1.5.2 Mantenimiento correctivo**

Una actividad de mantenimiento correctivo abarca un conglomerado de actividades con la finalidad de reparar fallas del equipo razones por la cual se haya producido un paro de cierta maquinaria. Una actividad de mantenimiento correctivo busca subsanar la causa o motivo por el cual el equipo no funcione o lo haga de manera incorrecta, es generalmente realizada parte de un técnico de mantenimiento, las actividades de mantenimiento correctivo se caracterizan por no depender de planes de mantenimiento con antelación, exponiéndose también a la falta de disponibilidad de piezas de repuestos al ser una actividad tan repentina [35].

Sin embargo, este tipo de mantenimiento puede ser el más factible en el caso de que el equipo a reparar se encuentre fuera de funcionamiento en la planta, este mantenimiento puede representar costos elevados debido al paro temporal de los equipos que están en el proceso de producción afectando a toda la línea productiva, pues cada minuto de paralización es traducido en términos económicos como una pérdida [36].

### **1.5.3 Mantenimiento predictivo**

Este tipo de mantenimiento busca predecir fallas comunes de los equipos con la ayuda de herramientas de control, softwares con la finalidad de adelantarse a fallos. De la misma manera

que el mantenimiento preventivo su objetivo es evitar tiempos muertos y paro de producción alargando la vida útil de los equipos y disminuyendo costos a largo plazo, en términos generales se intenta establecer un tiempo de vida útil de una pieza en función a sus condiciones de trabajo dentro de una empresa y en base a esto se propone un recambio de la misma pasado cierto tiempo de trabajo.

Un cronograma de mantenimiento predictivo exige un nivel alto de conocimientos ingenieriles debido a que se debe realizar un análisis de factibilidad que permita decidir si se ejecuta o no la tarea de mantenimiento predictivo, se correlaciona con la importancia del equipo objetivo del mantenimiento y de la gravedad de los daños que pueda representar una avería en el mismo [37].

#### **1.5.4 Mantenimiento overhaul**

Existe un término en el mantenimiento el cual no es muy conocido al no formar parte de los 3 principales tipos de mantenimiento, sin embargo, el overhaul frecuentemente es considerado por un tipo de mantenimiento correctivo – preventivo donde la finalidad es que la maquinaria, o equipos estén en las condiciones idóneas y sin pérdida de eficiencia, es comúnmente llamado “cero horas” porque la intención es restaurar la máquina a su estado de fábrica o lo más cercano posible a este.

Este mantenimiento debe ir acompañado de observaciones frecuentes, que ayuden controlar las variables que puedan producir daños en el equipo. Se diferencia de un mantenimiento correctivo ya que se ejecuta antes de que una máquina empiece a fallar [38].

Medina et al [39] definen que el overhaul es un clase de mantenimiento que mezcla los tipos correctivo y preventivo en una máquina, usualmente es llamado mantenimiento general o mantenimiento cero horas pues busca dejar a la máquina en condiciones similares a sus especificaciones de fábrica o nominales mejorando el rendimiento, prolongando la vida del equipo y aumentando la confiabilidad en el mismo

#### **1.6 Acero de construcción para calderas**

Una caldera está continuamente sometida a presión por lo cual deben cumplir con especificaciones de diseño determinadas, afortunadamente se encuentran ya establecidas en el código ASME [14] para recipientes a presión en su sección II, el cual está avalado a nivel

internacional en la industria manufacturera de calderas de vapor sin mencionar que es actualizado incorporando nuevos procesos de diseño, construcción, operación, reensamblaje y montaje de las calderas de vapor.

Por otra parte, Viswanathan [40] sintetizó la información del Código ASME identificando tres grupos de aleaciones: aleaciones ferríticas al C - 0.5Mo, Cr - 0.5Mo, 1.25Cr - 0.5Mo, 2.25Cr - Mo, 5Cr - 0.5Mo, 9Cr - Mo, aleaciones de acero inoxidable austeníticos 18Cr - 8Ni, 18Cr - 10Ni - Ti, 18Cr - 10Ni - Cr, 16Cr - 12Ni - 2Mo, 25Cr - 12Ni y aceros al carbono de baja media y alta resistencia, además señala las formas comunes en las cuales se entrega las aleaciones, las especificaciones ASME o ASTM conjuntamente con las propiedades de resistencia a la fluencia.

**Tabla 2.** Máxima temperatura en tubos permitidas por ASME y otros fabricantes de calderas.

[40]

Tipo de tubo de acero	ASME No.	ASME °C	Babcock and Wilcox °C	Combustion Engineering °C	Riley Stoker °C
Acero al carbono	SA-178C	538	510	454	454
Acero al carbono	SA-192	538	510	454	454
Acero al carbono	SA-210 A1	538	510	454	454
C-Mo	SA-209 T1	538	-----	482	482
C-Mo	SA-209 T1a	538	524	-----	-----
Cr-Mo	SA-213 T11	649	566	552	552
	SA-213 T22	649	602	580	580
Inoxidable	SA-213 321H	816	760	-----	816
Inoxidable	SA-213 347H	816	-----	704	-----
Inoxidable	SA-213 304H	816	760	704	-----

Todos los fabricantes de calderas deben apegarse a las normas ASME y se puede comprobar con la tabla 2, donde se compara los estándares por los cuales se rigen 3 fabricantes que incluso son más bajos que los establecidos en normativas, esto con la finalidad de prevenir cambios de las propiedades del material por las altas temperaturas.

## 1.7 Condiciones exigibles de la caldera

Tanto las reglas para la fabricación como para el cuidado de las calderas están establecidas por el código ASME, sin embargo, una vez fabricada una caldera Sanz et al [41], establecieron una serie de condiciones que se debe exigir tanto al fabricante como a la caldera para garantizar su buen funcionamiento. Ver figura 14

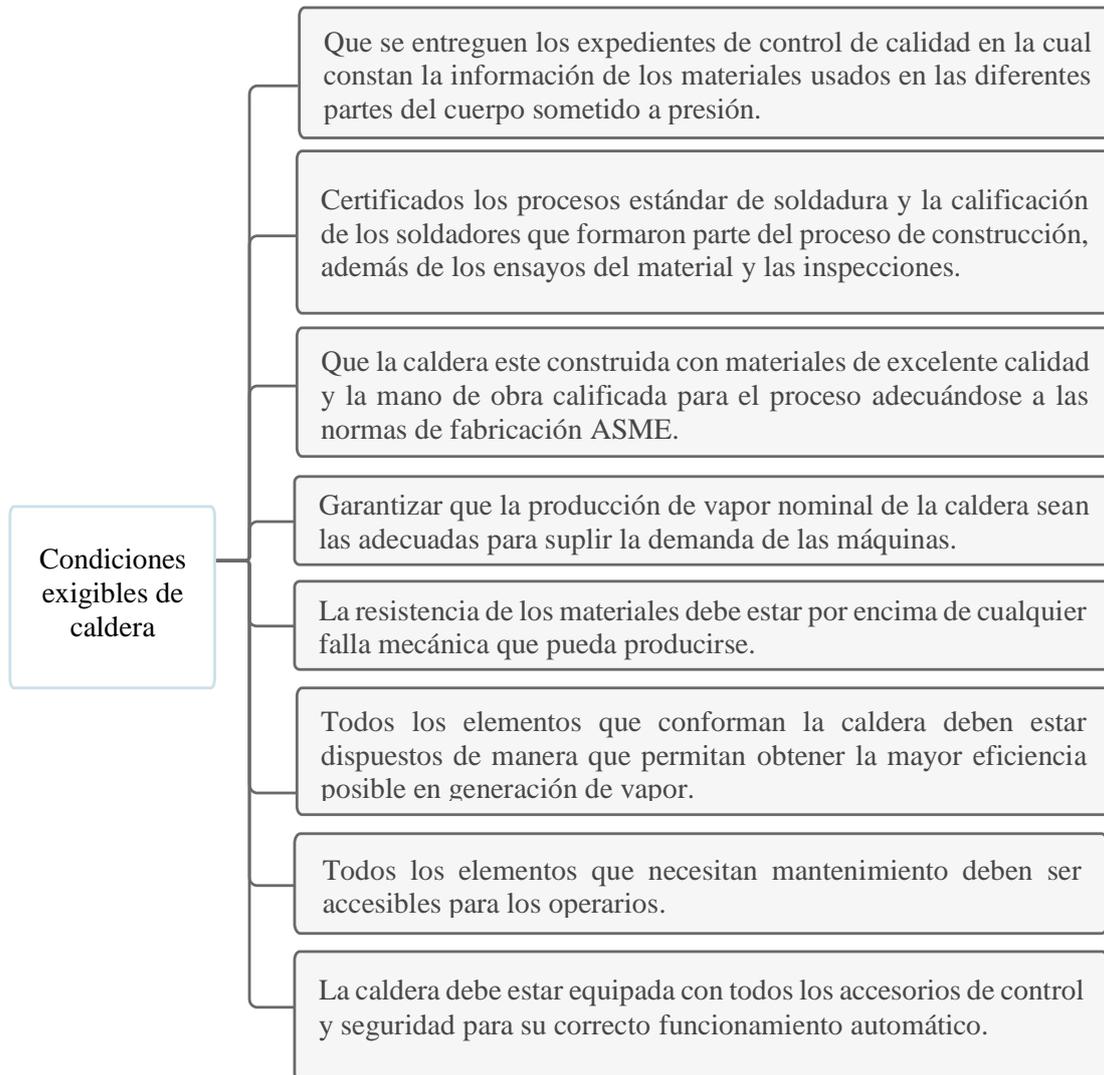


Figura 14. Condiciones exigibles para una caldera [41].

## 1.8 Procedimiento de pruebas hidrostáticas

La prueba de presión hidrostática o también llamada prueba hidroneumática, es un ensayo que se ejecuta generalmente en recipientes sometidos a presión, con agua en estado líquido para

determinar si existen fugas que afecten al funcionamiento del recipiente. Este ensayo debe realizarse para confirmar la hermeticidad del recipiente ya que esto asegura la integridad de las instalaciones y operadores.

Para este ensayo es necesario seguir un proceso establecido bajo distintas normas que garantizan la correcta ejecución del ensayo. Es importante que el encargado de ejecutar la prueba asegure que el recipiente está en condiciones óptimas de funcionamiento evitando la presencia de fugas o posibles deformaciones. [42].

La finalidad de este ensayo es poner a prueba la hermeticidad de una caldera, por ende, comprobar que se hizo un correcto trabajo de ensamblaje, en algunas ocasiones existen fugas como se puede apreciar en la figura 15.



Figura 15. Fallo de hermeticidad en prueba hidrostática.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

De manera general, este ensayo debe ejecutarse siempre después de fabricar el equipo, después de instalarlo o cada vez que el recipiente necesite alguna reparación. Esto garantiza la seguridad de todos los componentes que rodean el equipo y del personal encargado de monitorear el funcionamiento de este.

A su vez, realizando este ensayo bajo las condiciones adecuadas también permite disminuir los paros en procesos productivos donde intervenga el recipiente ya que las fugas que se puedan presentar generan paros innecesarios que deben ser corregidos.

### 1.8.1 Equipo para pruebas hidrostáticas

Para realizar el ensayo, es necesario contar con elementos que permitan analizar de manera correcta la hermeticidad del equipo y se detalla en la figura 16.

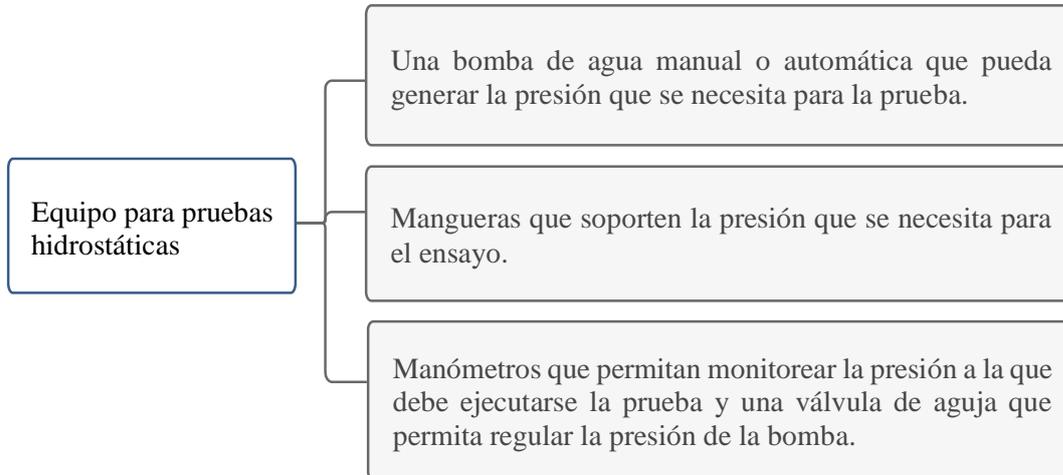


Figura 16. Implementos necesarios para una prueba hidrostáticas.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 1.8.2 Normas estándar para pruebas hidrostáticas.

Para la ejecución del ensayo de presión hidrostático, existen diferentes normas para los diferentes recipientes y cuerpos sometidos a presión, las cuales detallan procedimientos similares que garantizan la hermeticidad de estos. Estas normas están detalladas en la figura 17.

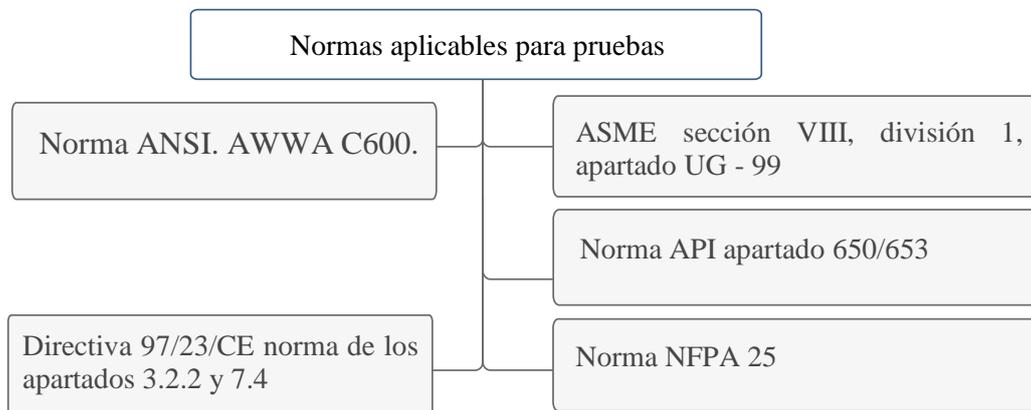


Figura 17. Normas aplicables a pruebas hidrostáticas.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### **1.8.3 Aspectos positivos y negativos del ensayo de presión hidrostática**

Las pruebas de presión hidrostáticas y neumáticas tienen características diferentes y un proceso de ejecución distinto. La presión de algunos recipientes debe ser analizados mediante un gas (prueba neumática), en cambio la prueba hidrostática ya mencionada antes trabaja con agua en estado líquido y presenta sus ventajas y desventajas.

El fluido de trabajo de pruebas hidrostáticas comúnmente usado es el agua, es un líquido de fácil acceso, económico y no genera riesgos para la integridad del personal en caso de falla y al ser un líquido tiende a filtrarse por grietas del recipiente lo que facilita la detección de fallas.

Sin embargo, la realización de estos ensayos por medio de prueba hidrostática tiene ciertos inconvenientes pequeños como la necesidad de limpieza del recipiente antes del ensayo además de una falla del recipiente a una alta presión que puede provocar la salida del fluido pudiendo generar daños al operador

En este capítulo se dio a conocer al lector toda la teoría necesaria para el entendimiento del proyecto de tesis además de los procedimientos de mantenimiento usual dados a estos recipientes a presión, de igual manera las rutinas de comprobación de estado una vez reensamblada la caldera como lo es la prueba hidrostática debido a que esto sienta un precedente para establecer el siguiente paso en el procedimiento de mantenimiento que es la metodología a seguir para identificar variables críticas.

## CAPÍTULO II

### MARCO METODOLÓGICO

Una caldera está conformada de diferentes componentes y la falla de uno de estos puede representar una disminución del rendimiento del recipiente a presión, o de plano el paro del mismo, por lo cual se necesita identificar todas las variables que puedan hacer que esta falle, las cuales se presentan en este capítulo.

#### 2.1. Metodología para determinar las variables que caracterizan el estado de una caldera

Se va a realizar una casa de calidad enumerando todos estos requerimientos del cliente y haciendo la relación de cómo el sistema de mantenimiento overhaul satisface al cliente. Ver figura 18.

- no existe relación  
+ existe relación

		¿Cómo?									EVALUACIÓN COMPARATIVA 5 = MEJOR 1 = PEOR		
		¿Qué?									NOSOTROS	COMPETENCIA 1	COMPETENCIA 2
1. REQUERIMIENTOS DE LOS CLIENTES		PRIORIDAD	Establecer una lista de clientes para servicio técnico	Pruebas de funcionamiento previo a la entrega	Fabricación y ensamble con normas ASME	Reutilización de componentes	Pintura anticorrosiva roja	Contrato de garantía del equipo	Plan de mantenimiento y diagramas de Gantt	Puesta en marcha de caldera en el sitio de entrega			
1	Servicio posventa	4	9	3	0	0	0	3	0	9	5	4	1
2	Eficiencia de la caldera cercano a 0 horas.	5	0	9	1	0	0	0	0	3	4	4	4
3	Procesos de ensamble bajo normas.	5	0	0	9	1	0	0	0	1	5	4	4
4	Precios asequible.	5	0	0	0	9	0	0	0	0	5	5	2
5	Protección contra la corrosión del cuerpo de la caldera.	5	0	0	1	9	9	3	0	0	5	5	3
6	Tiempo de garantía del	4	1	0	0	1	0	9	0	0	4	3	2
7	Mantenimiento	4	0	3	0	0	0	0	9	0	5	4	1
8	Instalación llave en mano.	3	0	1	0	0	0	0	0	9	5	4	5
IMPORTANCIA	ABSOLUTA		40	72	55	99	45	63	36	83			
	RELATIVA (%)		8	15	11	20	9	13	7	17			
EVALUACIÓN INGENIERIL			7	3	5	1	6	4	8	2			

Figura 18. Casa de la calidad del servicio de overhaul.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

Se establecieron los “cómo”, que son la forma en la que se puede materializar los requerimientos de los clientes y los “qué”, los cuales son los requerimientos de los clientes.

La reutilización de componentes fue el “cómo” que se relacionó positivamente con la mayor parte de los otros “cómo”, se llegó a esto por medio del uso de una ponderación triangular típica de una casa de calidad donde se califica con signos (+) para una relación positiva o relación mayor entre 2 variables, o con (-) para una relación nula o neutra entre 2 variables.

Seguidamente se ponderó la relación del requerimiento de los clientes con cada uno de los “cómo” con valores del 1 al 9, siendo 1 “no existe relación” y 9 “totalmente relacionado”.

Se estableció la prioridad de los requerimientos de los clientes en base a los requerimientos reales que suelen tener los clientes que llegan a Tecnicalderas, los valores fueron 1 como poca prioridad y 5 como máxima prioridad. La importancia absoluta se obtuvo multiplicando cada requerimiento del cliente con su respectiva ponderación de cada “cómo” y sumándolos.

La importancia relativa de cada “cómo” se obtuvo dividiendo el valor de su respectiva importancia absoluta para la sumatoria de todas las importancias absolutas y multiplicando este valor por 100.

Finalmente, la evaluación ingenieril se obtiene colocando un valor de 1 al valor mayor de la importancia relativa, seguidamente del 2 al valor siguiente del mayor de la importancia relativa y así sucesivamente según la cantidad de importancias relativas obtenidas, siendo el factor de mayor importancia aquel con una importancia relativa de 20 que corresponde a la reutilización de componentes, y el factor de menor importancia relativa a aquel con valor de 8 siendo este el establecimiento de una lista de clientes para probable servicio postventa de una caldera.

El requerimiento de principal importancia es la reutilización de los mismos materiales de la caldera, esto es directamente proporcional con el costo de la misma al momento de la entrega, por lo cual, cumple con uno de los requerimientos principales del cliente, los precios asequibles. Para esto es necesario que los componentes cumplan con los mínimos valores establecidos para garantizar su buen funcionamiento.

Para determinar las variables críticas de una caldera pirotubular se elabora una matriz de criticidad de los componentes del sistema, los criterios para la elaboración de la matriz se basan en la norma API – 580 [43], que establece 5 etapas de evaluación, salud, ambiente, seguridad, costo y producción, los niveles de criticidad de un componente según esta norma se establecen

como críticos de 20 a 30, medianamente críticos de 10 a 19 y no críticos de 1 a 9. Para la evaluación de estas 5 etapas dadas por la norma API – 580, se correlaciona con los valores establecidos en la tabla 3 a continuación.

**Tabla 3.** Valores de los parámetros de evaluación de API – 580 [44].

<b>Impacto</b>	<b>1 (bajo)</b>	<b>2 (menor)</b>	<b>3 (medio)</b>	<b>4 (alto)</b>	<b>5 (muy alto)</b>
Salud	Ambiente seguro para la salud	Atención médica necesaria	Incapacidad temporal	Incapacidad parcial permanente	Incapacidad total permanente o riesgo de muerte
Seguridad	Primeros auxilios	Lesión con atención médica no incapacitante	Lesión moderada y/o incapacidad temporal	Lesión con incapacidad permanente	Lesión con fatalidad
Ambiente	Impacto insignificante y reversible con ninguna remediación	Impacto menor reversible requiriendo remediación menor a corto plazo	Impacto ambiental moderado reversible con efectos a corto plazo requiriendo remediación moderada	Impacto ambiental serio con efectos medios requiriendo remediación significativa	Impacto ambiental desastroso con efectos a largo plazo que requieren remediación mayor
Costos	< 500 \$	Entre 500 \$ a 4500 \$	De 4501 \$ a 8500 \$	De 8501 \$ a 12000 \$	> 12000 \$
Producción	Parada de 100 % producción > 1 h	Parada de 100 % producción entre 1 h y 2 h	Parada de 100 % producción entre 2 h a 4 h	Parada de 100 % producción 4 h a 6 h	Parada de 100 % producción > 6 h

Con estos valores se elaboró una matriz de criticidad de componentes principales de una caldera pirotubular, además de reconocer los fallos más comunes que ocurren en estas partes. Esta matriz indica los diferentes niveles de criticidad con lo cual se establece que componentes deben ser analizados posteriormente. Ver figura 19.

Componentes	Tipos de falla o eventos.	Causa de las fallas	Salud	Seguridad	Ambiente	Costos	Producción	Severidad	Probabilidad	Nivel de criticidad
Compuertas	Desprendimiento del refractario, aislamiento de tornillos, sobrecalentamiento	Mala preparación de la mezcla. Exceso de torque. Falta de aislante	1	1	1	3	1	3	4	12
Cuerpo	Grieta	Agua mal tratada. Juntas mal soldadas	2	2	1	3	5	5	4	20
Espejos	Fugas, grietas.	Agua mal tratada. Fallas en el ajuste tubo - espejo. Junta mal soldada	1	1	1	4	4	5	4	20
Hogar	Grietas y debilitamiento	Corrosión por alta presencia de Na y Va del combustible. Agua mal tratada. Juntas de soldadura mal hechas	1	1	2	5	4	5	5	25
Haz de tubos	Grietas y debilitamiento	Agua mal tratada. Material de tubería inadecuado. Unión tubo - espejos corroída.	1	1	1	5	4	5	5	25
Base	Desnivel y desgaste	Superficie de ensamblaje desnivelada Error de medición.	1	1	1	2	1	2	2	4
Quemador	Llama fría, combustión incompleta	Exceso de aire Mezcla rica	1	2	3	5	1	5	3	15
Válvulas de salida de vapor	Endurecimiento, fugas	Corrosión	2	2	1	1	1	2	4	8
Chimenea	Fuga de gases de combustión	Mal ajustamiento de tuercas.	1	2	3	1	1	3	1	3
Válvulas de seguridad	Fallo del asiento	Desalineación del disco	1	1	1	1	4	4	3	12
Registros pasa mano y pasa hombre	Aislamiento de tuercas, falla de hermeticidad del empaque	Exceso de torque. Mala calidad de los empaques.	1	2	1	1	1	2	2	4
Válvula de descarga	Deterioro del asiento	Corrosión	1	1	1	1	1	1	3	3
McDonnell	Atasque del flotador	Incrustaciones	1	1	1	3	1	3	4	12

Figura 19. Metodología para determinar las variables que caracterizan el estado de una caldera.

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

En base a lo anterior mencionado se tiene como componentes críticos: el cuerpo de la caldera, espejos, hogar y haz de tubos, es decir todos los componentes que pueden presentar presencia de corrosión por el agua o sobrecalentamiento por el fuego. Como componentes medianamente críticos o importantes a el control de nivel McDonnell, válvulas de seguridad, quemador y compuertas. Finalmente, como componentes no críticos a la base, válvulas de salida de vapor, chimenea, compuerta pasamano, compuerta pasa hombre y válvula de descarga.

De los componentes críticos se puede observar que la causa principal de falla de los mismos es la corrosión que a la larga disminuye el espesor del material, falta de tratamiento del agua que es la principal razón de la corrosión y depósitos, juntas mal soldadas que son los principales lugares de fallas por fatiga del material, y esto influye en la de generación de vapor nominal del equipo, por lo cual se decidió analizar los valores permisibles ayudado de normas ASTM y norma europea BS - 2486 y datasheet de los equipos y accesorios

## 2.2 Metodología para establecer los valores críticos de cada variable según normativas ASME.

ASME define reglas en los requisitos de las partes para calderas pirotubulares, se aplican a dichas calderas y sus partes y deben usarse junto con normas de construcción de recipientes a presión (PG) y los requisitos específicos en las partes relevantes de dicha sección del código ASME 2010 para calderas y recipientes a presión que se relacionan con el proceso de fabricación a utilizar. Ver figura 20.

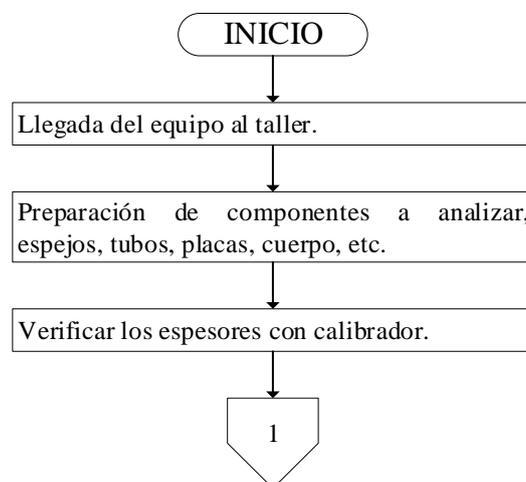


Figura 20. Flujograma para determinar las variables que caracterizan a una caldera

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

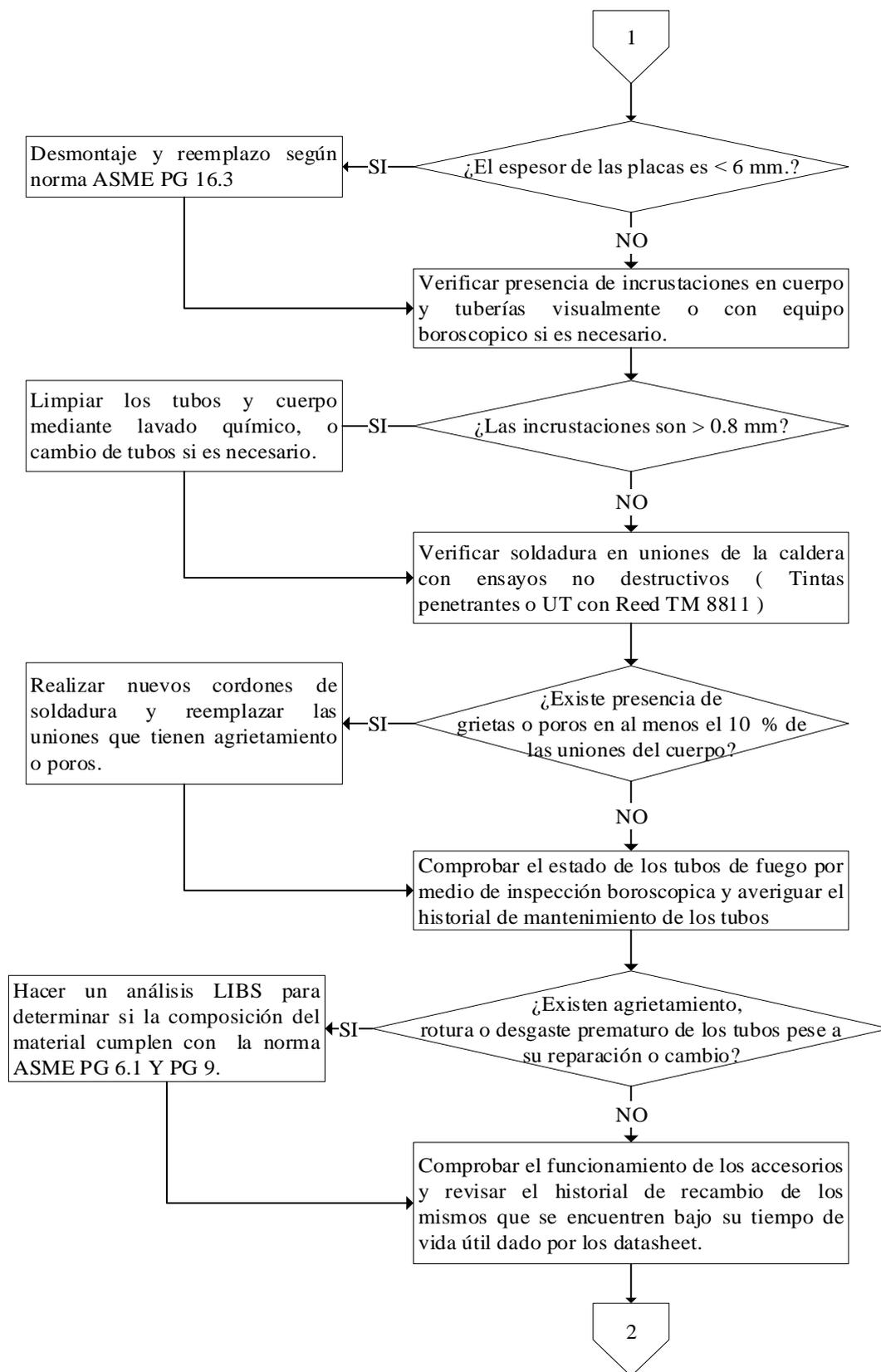


Figura 20. Flujograma para determinar las variables que caracterizan el estado de una caldera (continuación).

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

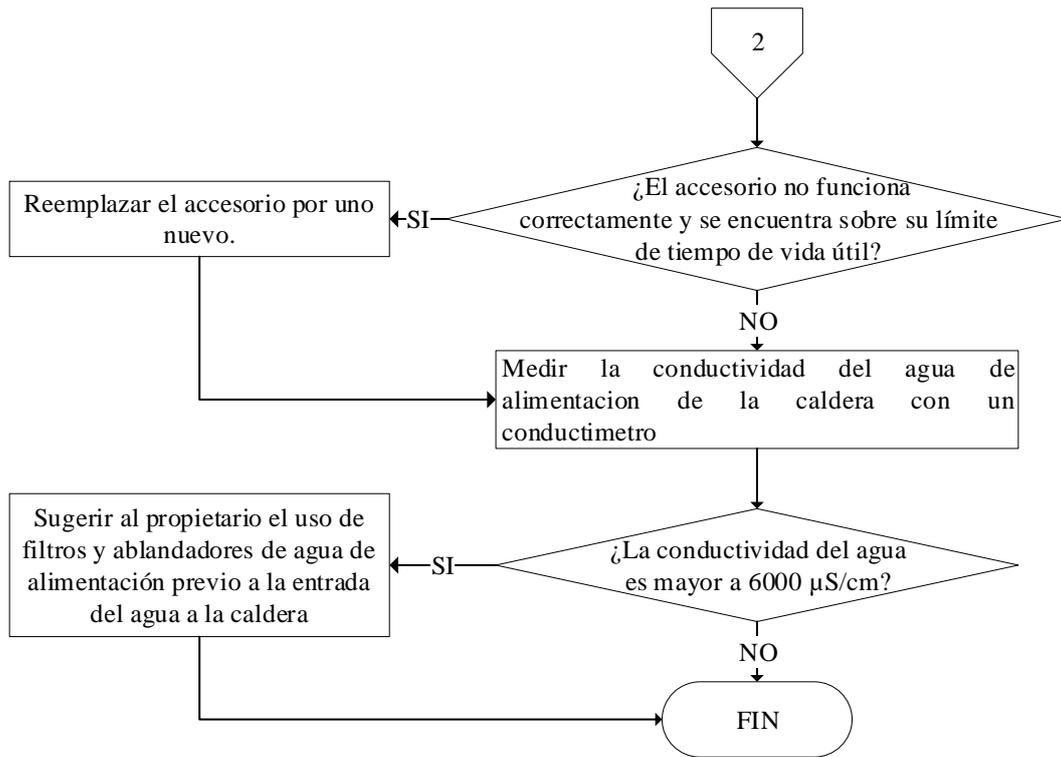


Figura 20. Flujograma para determinar las variables que caracterizan el estado de una caldera (continuación).

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

### 2.2.1 Espesores mínimos

Se debe considerar los espesores mínimos del material como una variable crítica del funcionamiento de una caldera. Para determinar los espesores mínimos sometidos a presión se debe tomar en cuenta las especificaciones dadas por ASME en su apartado PG - 16.3 [14]. En el procedimiento de mantenimiento overhaul se debe medir con la ayuda de calibradores, o principalmente con inspección visual.

Usualmente las calderas llegan por fugas en las juntas de soldadura o tubos de humo corroídos después de una mala reparación o uso inadecuado por parte del operador. En ocasiones es fácil darse cuenta cuando un material a perdido espesor pues con una inspección visual se puede observar el material descascarándose indicando pérdida del grosor.

Una caldera con pérdida de espesores puede provocar un grave accidente, por ejemplo Eui [45] realizó una investigación acerca de la explosión de una caldera generada por defecto de la división de soldadura, corrosión, sobrecalentamiento y degradación del material, encontró una disminución de espesor del 10 % en la tubería de humo donde ocurrió la falla generando una

propagación de una grieta por fatiga en el transcurso de 10 años de operación, por lo cual concluye que el análisis de espesores en un proceso de mantenimiento de caldera es recomendable. Una disminución de espesor similar se puede observar en la figura 21 cuyos espejos llegaron oxidados y presentaba desprendimientos por falta de recubrimiento de la misma.



Figura 21. Disminución de espesor por presencia de corrosión en los espejos de la caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### **2.2.2 Soldadura**

Se debe soldar las tapas con las placas tubulares bridadas hacia adentro o hacia afuera al cuerpo mediante soldadura de filete cuando la lámina tubular esté soportada por tubos o riostras, la junta que fija una lámina tubular bridada hacia afuera este completamente dentro del cuerpo y no forme parte de él, Además las juntas longitudinales circunferenciales y de otro tipo que unen partes sometidas a presión se deben realizar bajo la norma ASME PW – 9 conjuntamente con todas sus subdivisiones [14].

Esta es considerada una variable crítica pues si una junta de soldadura se encuentra porosa o agrietada es un punto de fallo para un componente que actúa bajo presión. El procedimiento para determinar el estado de una soldadura por lo general es un ensayo no destructivo, un ejemplo, son las tintas penetrantes, cuyo principio se basa en la capilaridad y un tinte revelador de diferente color que es aplicado después de la tinta penetrante que en caso de que esta última haya encontrado una grieta o poro donde colocarse se pintará y por medio de inspección visual podremos identificar los sitios donde nos encontremos con grietas.

Otro método de inspección no destructiva es el ultrasonido y funciona enviando ondas sonoras a través de materiales conductores, este procedimiento es conocido en la normativa ASME PW

– 11 [14] cómo un examen volumétrico de juntas soldadas a tope, para las juntas longitudinales sujetas a calor radiante del hogar y que contiene vapor y/o agua se debe realizar el análisis en todos los tamaños y espesores si es longitudinal, en tubos de diámetro mayor a 29 mm de espesor si es una soldadura circunferencial en tambores y cuerpos, y en tubos mayores a 13 mm de espesor si es soldadura circunferencial en tuberías, tubos y cabezales. Esta prueba es realizada con un instrumento de pruebas ultrasónicas detallado en el anexo 4.

### **2.2.3 Material de fabricación de tubos y placas**

Existen diferentes grados de tubos fabricados sin costura de acero aleado y al carbono, por ejemplo, para tuberías y partes sometidas a presión recomienda el uso de tuberías sin costura bajo la norma ASME PG – 9 y de igual manera la norma ASME PG-6.1 para planchas de acero de cualquier parte de una caldera sometida a presión [14].

Sin embargo, si una caldera presenta grietas en los tubos de humos o corrosión excesiva posterior a un reciente reemplazo de estos componentes se presenta la duda de si la caldera fue fabricada con los materiales adecuados, por lo cual se debe exigir que se entreguen los certificados de calidad de los materiales, los cuales se realizan mediante normas ASTM [16] por analistas que usan métodos como análisis de espectrometría de emisión atómica y espectroscopia de rompimiento inducido por láser (LIBS) para conocer la composición del mismo.

### **2.2.4 Incrustaciones y depósitos**

Las incrustaciones en una caldera están directamente relacionadas los niveles de dureza del agua que entra en la cámara de agua, el exceso de impurezas conjuntamente con la capacidad para soportar la corrosión de los tubos hace que esta sea una variable crítica ya que es el medio de transferencia de calor para que el agua cambie de estado a vapor. Li et al. [46] realizaron un examen microestructural de un tubo de pared de agua de caldera para determinar las razones de la corrosión teniendo como resultado la presencia de ácido sulfhídrico debido a combustión de materiales de carbono, descomposición de piritas así como también agrietamiento y descarburación del tubo. Por el lado del agua y debido a un mal tratamiento de la misma se presentaron concentraciones de hidróxido de sodio principales causantes de la corrosión en esa parte del tubo.

Por estas razones las incrustaciones si se quedan pegadas a la pared del tubo producen un espesor mayor el cual disminuye la eficiencia de transferencia de calor, del mismo modo si estas se desprenden generalmente del lado de fuego lo hacen de manera continua lo que resulta en el adelgazamiento de la pared, para evitar incrustaciones en el lado del tubo se debe tener en cuenta la norma británica BS – 2486 y la ABMA (American Boiler Manufacturing Association) quienes elaboraron la tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros admisibles para agua de caldera según norma BS – 2486 [47].

<b>Parámetro</b>	<b>Valor recomendado</b>
pH a 25 ° C	10.5 – 11.8
Alcalinidad total CaCO <sub>3</sub>	< 700 ppm
Alcalinidad cáustica	> 350 ppm
Sulfito de sodio	30 – 70 ppm
Hidracina	0.1 – 10 ppm
Taninos	120 – 180 ppm
Dietilhidroxilamina	0.1 – 1 ppm (en agua de alimentación)
Fosfato de Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30 – 60 mg/l
Hierro	< 3 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 μS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Del mismo modo se encuentra una diferencia en cuanto al nivel de conductividad en el agua para caldera pirotubular bajo la norma UNE EN-12953-10, siendo esta más conservadora en la conductividad admisible del agua de la caldera, se lo puede identificar en la tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros admisibles de agua de caldera pirotubular bajo norma UNE EN-12953-10 [48]

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Agua en caldera de vapor que utiliza agua de alimentación con conductividad:</b>	
		<b>&gt; 30 μS/cm</b>	<b>≤ 30 μS/cm</b>
Presión de servicio	bar	0.5 a 20	0.5 a 20
Conductividad a 25 ° C	μS/cm	< 6000	< 1500
pH A 25 ° C		10.5 a 12	10 a 11

Para comprobar la presencia de sólidos disueltos en el agua, se debe usar un conductímetro. Esto es parte de las tareas de los operarios de la caldera, debido a que en el mantenimiento overhaul, solo se controla las incrustaciones mas no el agua.

El correcto tratamiento de agua impide las incrustaciones y depósitos como los de la caldera de la figura 22, la cual se encontró en operación bajo condiciones de agua alcalina superior a los valores de las tablas 4 y 5, y con alta presencia de cloro.



Figura 22. Presencia de incrustaciones al interior de la caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### **2.2.5 Tiempo de duración remanente**

Es el ciclo de duración que un objeto puede tener, cuando ha trabajado de manera correcta cumpliendo el propósito por el cual fue construido. Esta duración se monitorea y se calcula por horas de trabajo. Las calderas pirotubulares recibidas en la empresa, deben traer una datasheet y, además, la data histórica que ha pasado en casa del usuario. Es decir, los mantenimientos realizados, su fecha de fabricación y la fecha en la cual comenzó a operar, esto con el fin de poder tener la información del tiempo de vida que tiene al momento de realizar el mantenimiento overhaul.

Sin embargo la vida útil remanente cambia según las condiciones bajo las cuales están operando los equipos, se puede evaluar la vida útil remanente mediante la norma API – 579 [43] o la ASME FFS1 [14] que tiene el propósito de establecer intervalos de inspección con cálculos de daños a futuro, bajo ciertas circunstancias es difícil calcular progresión del daño de un componente, por lo cual se realiza un cálculo de tiempo de vida remanente con monitoreo en servicio cuyos métodos pueden ser ensayos de corrosión, ensayos de hidrógeno para medir su

actividad, exámenes ultrasónicos para determinar la pérdida de metal y evaluar la actividad de los agrietamientos.

### 2.3. Procedimiento de diagnóstico de las variables críticas del estado del equipo

Para determinar si una variable se encuentra bajo su nivel crítico se va a necesitar de información tanto del propietario de la caldera como de los datasheet de cada componente si se encuentran disponibles además de procesos de fabricación dados por normativas ASME [14]. A continuación, se indica las variables de evaluación del que deben ser analizadas por el encargado del mantenimiento, y su procedimiento de diagnóstico. Ver tabla 6

**Tabla 6.** Variables de evaluación en calderas pirotubulares.

<b>Variables de Evaluación</b>	<b>Procedimiento de Diagnóstico</b>
Tiempo de Vida Útil	Datasheet Información Histórica
Estado de los Accesorios	Inspecciones definidas en la Tabla 7.
Tratamiento de agua que se utiliza	Validar con el usuario: Tratamiento químico utilizado Frecuencia de purgas Medición con un conductímetro.
Corrosión y depósitos	Comprobación del espesor con calibradores Inspección visual
Hermeticidad del Cuerpo y tuberías	Prueba hidrostática Inspecciones boroscópicas
Juntas de soldadura	Tintas penetrantes Ultrasonido
Composición del material	Validación con el usuario: información histórica. Metalografía. Análisis químico, metalográfico.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

### 2.4. Metodología para la realización del proceso de pruebas hidrostáticas.

Una prueba hidrostática como se ha comentado en el presente estudio es una prueba de presión que ejecuta en recipientes sometidos a presión para garantizar su hermeticidad y su integridad mecánica. Para la prueba hidrostática, la prueba de presión debe ejecutarse según ASME PG – 73.5.1 [14].

Para la prueba, la caldera está completamente llena de agua y la presión es suministrada por la bomba de agua de la caldera (BFP, por sus siglas en inglés), que es la bomba principal para alimentar el agua a la caldera. Cuando la presión aumenta, se puede ver un manómetro en la parte superior de la caldera. Algunos también requieren que la temperatura del agua superior que la temperatura ambiente. La presión a la que está expuesta la caldera es un 50 % superior a la presión de trabajo. En este caso, la caldera está funcionando a 6894.76 kPa y, por lo tanto, la presión de prueba es de 10342.14 kPa según la norma ASME PG – 99 [14].

La fase de prueba hidrostática tiene una duración de dos horas y media hasta que se determina que no hay fuga de agua en las tuberías de extinción de incendios de acuerdo con la Sección I del Código ASME, Parte PW-54 [14], de lo contrario es necesario determinar en qué parte el agua se filtra, esto también necesita ser reparado y luego se puede repetir el proceso de verificación. Ver figura 23.

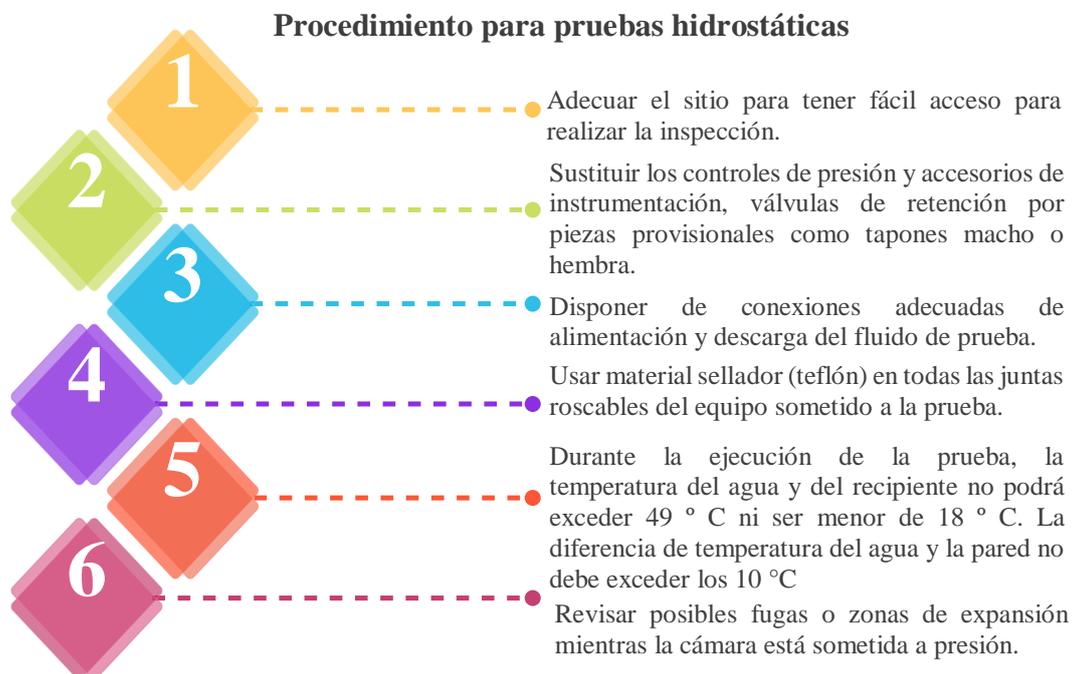


Figura 23. Procedimiento para pruebas hidrostáticas.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

Las características de la bomba usada en los ensayos de hermeticidad se describen a continuación y se puede apreciar en la figura 24, una máquina de pruebas hidrostáticas de la marca Helbert con un manómetro para medir la presión de un rango desde 0 kPa a 1103.16 kPa.

El personal responsable de esta prueba deberá estar altamente calificado y llenar el checklist de la prueba que se muestra en el anexo 8, para evidenciar al cliente lo encontrado y quede como historial del equipo en la empresa como tal, mientras que la ficha técnica de la bomba de agua usada para las pruebas hidrostáticas se encuentra en el anexo 12.



Figura 24. Bomba Helbert para pruebas hidrostáticas.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

## **2.5. Metodología de análisis de costo.**

El propósito del costo es indicar cuánto requiere en términos financieros la realización del servicio. Los objetivos del programa de costos son mantener el costo total del servicio al mínimo, las tasas de costo se desarrollan para partes de máquinas específicas, grupos de máquinas, equipos auxiliares, funciones auxiliares o equipos. Los costos de la máquina objetivo se expresan en términos del valor monetario de la mano de obra o los materiales del mantenimiento mayor que son sostenibles para la máquina, equipo auxiliar o horas hombre.

En este capítulo se desarrolló la metodología para determinar las variables que caracterizan el estado técnico de la caldera ya que existen variables que no afectan al funcionamiento del equipo por lo que el responsable en realizar el mantenimiento overhaul de la caldera debe basarse en el proceso propuesto.

**CAPÍTULO III**  
**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS VARIABLES**  
**CRÍTICAS DE UNA CALDERA**

A continuación, se describen las variables que inciden sobre el estado técnico de las calderas pirotubulares, así como su procedimiento de diagnóstico, correlación de estas variables y se presenta el procedimiento de mantenimiento por overhaul.

**3.1. Variables de evaluación del estado una caldera pirotubular**

Para poder implementar un procedimiento de mantenimiento overhaul en una caldera por lo general se debe tener en cuenta ciertos componentes que sirven de guía para iniciar un overhaul, estas suelen relacionarse directamente con la eficiencia que presenta la caldera al ponerla en funcionamiento, en la tabla 7 se tiene las partes principales que se debe inspeccionar de los accesorios principales de caldera.

**Tabla 7.** Accesorios principales de la caldera.

<b>Componente</b>	<b>Inspección</b>
Tapas	Estado del refractario y empaques Corrosión
Haz de tubos y hogar	Incrustaciones Corrosión y fisuras
McDonnell	Incrustaciones, empaque Límites electrónicos
Visor de nivel de agua	Limpieza del visor Posibles fugas de agua por el visor
Manómetro	Limpieza del visor Metrología Posibles fugas del manómetro
Válvulas de seguridad, purga, check y compuerta	Componentes Internos Posibles fugas o ruidos extraños Lubricación
Quemador	Bomba de combustible Boquillas y ventilador
Recubrimiento aislante	Estado del material
Empaques de tortugas	Estado del material
Espejos	Estado de la soldadura Corrosión y fisuras

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío

### 3.1.1. Tratamiento de agua

El problema más común que se suele presentar en las calderas que llegan a procesos de overhaul a Tecnicalderas es las incrustaciones presentes en los tubos y paredes dentro de las calderas. Bertemeu [49] recopiló información de cómo afecta la presencia de hollín e incrustaciones en la eficiencia del combustible y pérdida de calor, observó que en el peor de los casos con incrustaciones alrededor de 3.2 mm tiene una pérdida de calor de un 20 % lo que equivale a un incremento del consumo de combustible de un 4 %.

Como se puede notar en la figura 25, esta es una caldera que llegó a mantenimiento overhaul al taller de Tecnicalderas a la cual no se le dio un correcto mantenimiento preventivo, además de que el agua que llegaba a la caldera no pasó por un tratamiento adecuado y como resultado se tiene incrustaciones de 5 mm a lo largo de todos los tubos de humos lo cual representa un aumento del consumo de combustible, por lo tanto, se procedió a cambiar la tubería como parte del overhaul



Figura 25. Incrustaciones en los tubos de humo y en el cuerpo de la caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío

Un método para llevar a cabo un tratamiento del agua para una caldera se pueden seguir los siguientes pasos descritos en el diagrama de la figura 26 donde se establecen los tratamientos internos necesarios para remover depósitos e incrustaciones como los tratamientos externos que se le debe dar al agua previo a la entrada a la caldera cuando se la vaya a dejar en funcionamiento.

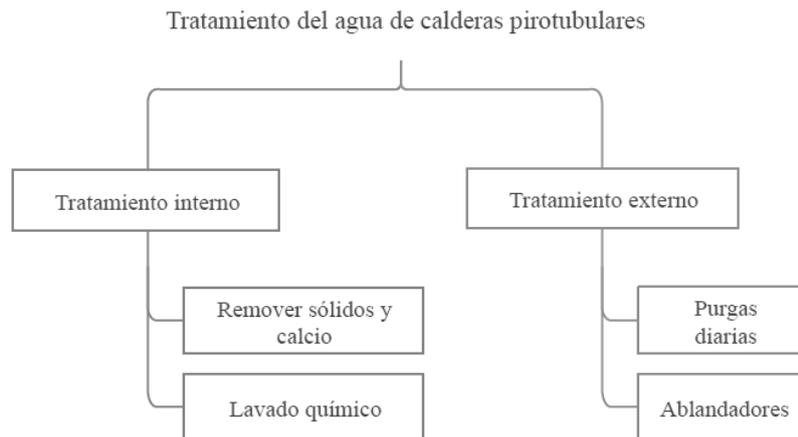


Figura 26. Alternativas de tratamiento de aguas de caldera.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

El agua cruda sin tratamiento no puede ingresar directamente a la caldera debido a que contiene impurezas que pueden provocar depósitos e incrustaciones por lo cual es necesario el uso de ablandadores, además de realizar purgas frecuentemente, sin embargo, también se debe controlar su pH que debe ser mayor a 7 hasta 10, aunque otros autores señalan que se puede tener un pH de 10 a 12.5 [26].

### 3.1.2. Incrustaciones y depósitos

Una caldera tiene un valor nominal de generación de vapor en función de su potencia que se lo coloca en su ficha técnica, generalmente medido por hora, sin embargo, también se suele medir la cantidad de combustible en esa misma hora. Si un quemador aumenta la cantidad de combustible consumido y aun así alcanza la misma cantidad de vapor generado significa que hay algo que está retrasando la transferencia de calor, lo más común son las incrustaciones, los valores a continuación nos permiten conocer como este problema afecta al consumo de combustible como se representa en la tabla 8.

**Tabla 8.** Pérdida de calor y aumento de combustible por incrustaciones. [49].

Espesor de incrustación	Pérdida de calor producida	Aumento de consumo de combustible
0.8 mm	8 %	2 %
1.6 mm	12 %	2.5 %
3.2 mm	20 %	4 %

Estos valores ya serían inaceptables para el funcionamiento del equipo, por lo que obligatoriamente debe realizarse un lavado químico del cuerpo de la caldera y los tubos de fuego, aunque es un procedimiento un tanto complicado y realizado de diferentes maneras por cada empresa. Generalmente se empieza con un lavado con agua alcalina para remover aceites, materia orgánica y grasas, seguido de un proceso de neutralización y enjuague para finalizar con un lavado ácido que remueve incrustaciones y óxidos del interior de la caldera [50].

### **3.1.3. Análisis de la hermeticidad del cuerpo y la tubería de las calderas**

En esta prueba se aplica presión a la caldera para comprobar la hermeticidad de las uniones, y la resistencia a la soldadura, utilizando como elemento principal el agua o un fluido no corrosivo. Todo equipo nuevo o luego de haber hecho un mantenimiento overhaul, debe ser sometido a una prueba hidrostática, para la prueba hidrostática se utilizará presión que no exceda las 1,5 veces el valor de presión de trabajo, según norma UG-99 STANDARD HYDROSTATIC TEST de las normativas ASME 2004 apartado VIII-DIVISION 1 [14].

La inspección visual es indispensable en todos estos procedimientos, es el principal método de identificación de fallas, la hermeticidad de una caldera no solo puede fallar por las juntas soldadas en el momento de la prueba de presión hidrostática, sino también por fisuras en los tubos y porosidades de la soldadura, y recordar que no siempre se cambia toda la tubería de caldera, por lo cual se debe tener en cuenta aspectos tales como grietas en todas las superficies, quemaduras y porosidades.

Como parte del proceso overhaul para una caldera entra a un procedimiento de prueba hidrostática mencionado anteriormente, se mantendrá a la caldera con agua durante unas horas y se comprobará en el manómetro si hubo caídas de presión en el transcurso de la prueba, de ser el caso al, ser la prueba con agua es muy fácil por medio de inspección visual identificar el sitio donde hayan ocurrido fugas, caso contrario, si no se presentan fugas se procede al siguiente paso del overhaul que es la inspección de grietas y porosidades con instrumentación ultrasónica.

### **3.2. Correlación de variables del overhaul de una caldera pirotubular.**

El tiempo de vida útil es una variable que depende de cómo se usan los componentes, y bajo condiciones de uso establecidas por los fabricantes tienen un tiempo de vida que podemos encontrar en los datasheet, generalmente los accesorios de caldera como los empaques se cambian en un plan preventivo de mantenimiento conjuntamente con una limpieza interna de

la caldera cada 6 meses [51], y en caso de elementos más complejos como un McDonnell pueden durar varios años a menos que presente incrustaciones donde radica la importancia de un correcto tratamiento de agua.

En cuanto a los depósitos e incrustaciones, en la industria Ecuatoriana se considera la apertura de las válvulas de purga cada día después del periodo de operación, en algunas ocasiones hasta 3 veces diarias, las incrustaciones en las paredes de los tubos se deben revisar cada mes como parte de un cronograma de mantenimiento programado preventivo que es el comúnmente usado en la localidad, de preferencia no debe existir incrustaciones, pero si las hubiera significa que se debe revisar las condiciones de operación, específicamente el tratamiento del agua que según la norma europea BS – 2486 [47] en la tabla 4 que establece los valores de alcalinidad del agua para calderas como de los contaminantes comunes aceptables en ppm de las mismas.

Una caldera de 100 BHP la cual es sometida a una prueba de consumo de combustible, consume aproximadamente 22 galones por hora que representa su consumo nominal, con los datos de la tabla 8 en la cual Bertemeu [49] presenta porcentajes de pérdida de combustible en función del espesor de incrustación en tubos. Si esta caldera presenta incrustaciones de 0.8 mm de espesor se perdería alrededor de 2.5 % de combustible que representa un aproximado de 0.55 galones de combustible, esto a la larga es perjudicial para el cliente.

Del mismo modo se debe dedicar una jornada al mes para una puesta en marcha de prueba y medir la cantidad de combustible utilizado conjuntamente con la generación de vapor con la caldera limpia, es decir libre de incrustaciones y herméticamente sellada. Si el consumo de combustible es superior al nominal indicado en la datasheet y si se puede observar presencia hollín en los tubos de fuego puede significar que la mezcla de combustible muy rica, lo cual supone una regulación del quemador.

La disminución de la generación de vapor también está relacionada con la cantidad de incrustaciones, pero al no estar presentes en una jornada de pruebas o al haberlo limpiado previamente, nos lleva a analizar el funcionamiento del quemador, puede significar que no esté quemando correctamente el combustible y el oxígeno dando como resultado una temperatura inferior retardando la generación de vapor.

En la figura 27, se desarrolló un método de correlación de las variables de evaluación técnica para la determinación y notificación al cliente de la realización del mantenimiento overhaul de la caldera pirotubular.

Variable	máximo permitido	mínimo permitido
Espesores	NA	6 mm
Soldadura	10 % del total de juntas	NA
Material de fabricación	NA	requerimientos PG 6.1 y PG 9 (ASME)
Incrustaciones, depósitos y corrosión	0.8 mm	0 mm
Tratamiento de agua	< 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con agua > 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . < 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con agua $\leq$ 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$	NA
Tiempo de vida útil	Establecido en datasheet o por desperfectos	NA

Figura 27. Correlación de variables de mantenimiento overhaul.

Fuente. Orta Richard, Guevara Darío.

Se colocaron todas las variables críticas en la tabla para poder establecer las relaciones que existían unas con otras, el modelo de correlación usado es similar al propuesto por una casa de calidad que pondera en un costado por medio de signos o valores, en este caso se usó signos. El signo (+) es usado para determinar que una variable si se correlaciona con otra, y el signo (-) es usado para señalar que una variable no tiene relación con la otra o su relación es mínima.

Se puede notar que las variables que más tienen correlación son el tratamiento de agua y las incrustaciones, depósitos y corrosión, pues las segundas dependen de la primera, y esta es la razón común para el deterioro de calderas que llegan a mantenimiento. Los propietarios u operarios no suelen dar el tratamiento adecuado para el funcionamiento de la caldera por lo cual en este proyecto establecemos los valores requeridos de tratamiento de la misma para evitar estos fallos.

En el anexo 13, se muestran las variables de evaluación, en conjunto con un parámetro que es el dato para evaluar y dependiendo la respuesta que se tenga, tendrá una ponderación en la columna de indicador de resultado

### **3.3 Resultados del proceso de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares**

El mantenimiento overhaul o parada total del equipo se debe realizar normalmente cada 5 años a las calderas pirotubulares, según la experiencia descrita en esta empresa. Este procedimiento de mantenimiento overhaul se realiza siguiendo los pasos establecidos a continuación.

#### **3.3.1 Planificación**

Se debe planificar con anticipación en función al tamaño de la caldera para establecer los tiempos de mantenimiento y adquirir los repuestos de recambio obligatorios. Además de realizar el overhaul de una manera ordenada y sistemática de manera que en el momento de volver armar no se presenten complicaciones.

#### **3.3.2 Limpieza Externa e Interna de la Caldera**

Para realizar la limpieza interna de la caldera, se procede a la eliminación de los residuos acumulados en el registro pasamano o handhole. Para la limpieza de la parte interior de la caldera que aloja el agua, se debe quitar las tapas de inspección de mano y del manhole, se usa agua a presión con una manguera para cerciorarse que todas las incrustaciones y depósitos salgan de las paredes interiores, luego de realizada esta actividad se debe vaciar completamente el agua existente en la caldera y retirar los sedimentos que se encuentren acumulados en la misma.

A continuación, se examina con cuidado la superficie del cuerpo, para comprobar si existe presencia de corrosión, picaduras o incrustaciones. La mínima presencia de estas condiciones es perjudicial para una caldera pues adelgaza el espesor de las paredes arriesgando a que la máquina falle por debilitamiento del material, razón por la cual el tratamiento del agua, control de pH y conductividad de la misma es indispensable.

Para la limpieza de los tubos de fuego se observa si existe presencia de hollín, en cuya situación, la eficiencia de la caldera disminuye, por lo que los tubos deben ser limpiados para que no afecten la transferencia de calor. Ver figura 28.



Figura 28. Tubos de fuego con presencia de hollín en su interior.

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

El personal que realice esta limpieza debe llenar el checklist de limpieza interna inicial que se muestra en la [Anexo 5](#), para evidenciar al cliente lo encontrado y quede como historial del equipo en la empresa como tal. En ocasiones por fallas de control de nivel automático el quemador puede quedar encendido más de lo necesario provocando el sobrecalentamiento de la caldera como se muestra en la figura 29 en donde se presentó fugas de agua por los tubos de fuego por lo que se los ajusta y expande con la ayuda de un expander



Figura 29. Ajuste de tubos de fuego con la herramienta expensor.

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

En el anexo 6 y anexo 7, se detalla la ficha técnica de la herramientas usada para el ajuste de la tubería con el equipo expensor y de acampanado.

### **3.3.3 Actividades de desmontaje en calderas piro tubulares**

De manera específica, el proceso de overhaul para calderas piro tubulares de 5 a 350 BHP se lo debe realizar de la siguiente manera:

Desmontar los elementos de protección de la caldera: válvulas de seguridad, controles de presión, control de nivel McDonnell ya que estos pueden encontrarse en buen estado y podrían sufrir daños al realizar el mantenimiento. Desmontar el quemador con todos sus elementos de control. Podemos encontrar diferentes tipos de quemadores de combustible, lo importante en este proceso es retirar el equipo de manera que la bomba de combustible o la fotocelda no sufra ningún daño.

Ya retirados los equipos, el siguiente paso es desmontar las tapas de mano y tapas de hombre, en caso de que la tuviera. Esto permitirá realizar una inspección visual al interior del equipo, así se podrá definir el estado de los tubos de fuego y del tubo central tipo Morrison.

#### **3.3.4 Actividades de reensamblaje de calderas**

Luego de realizar el respectivo mantenimiento en la caldera, se deben colocar nuevamente los elementos en su sitio para su posterior trabajo. De manera general, si hubo un cambio de tubería y elementos de protección de la caldera, estos deben ser reensamblados en la caldera; empaques de tapas de mano, controles de nivel, temperatura o presión, empaques de asbesto en las compuertas.

Una vez colocados los repuestos, se deben realizar pruebas de hermeticidad para comprobar fugas en el equipo. Generalmente, se acciona la bomba de entrada de agua de alimentación de la caldera, con esto se verifica si los empaques están cumpliendo la función. Otro método de prueba es arrancar el equipo de manera que la llama generada por el quemador no fugue por las compuertas de la caldera. Al suceder esto, el empaque de cordón de asbesto debe ser reemplazado por uno de mayor diámetro de manera que ocupe en su totalidad las compuertas y evite fuga de llama y gases de combustión.

#### **3.3.5 Mantenimiento en Componentes y Accesorios**

Los componentes e instrumentos instalados deben ser verificados y calibrados de ser necesario para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, la válvula de seguridad se debe comprobar que se accione el seguro a la presión establecida como límite y de ser necesario debe ser recalibrarla.

Se presenta al [anexo 14](#) el formato de llenado del tipo checklist para el mantenimiento para los componentes donde se describen las posibles fallas que comprende el módulo primario compuesto de los componentes que se encuentran directamente relacionado con la transferencia

de calor, es decir tubo hogar donde se aloja la llama del quemador y es considerado como el primer paso, tubos de humos del segundo paso, cámara frontal de gases de combustión y cámara posterior de gases. En el [anexo 15](#) el checklist de mantenimiento de los accesorios de control que se debe realizar como parte del inicio del proceso de mantenimiento overhaul previo a el cambio de tubos de humos.

### 3.3.6 Cambio de Empaques

Como parte de una de las tareas de mantenimiento overhaul es necesario el cambio obligatorio de empaques existentes. Es necesario limpiar los restos de basuras o desperdicios de las juntas viejas previo a la colocación de empaques nuevos, además de los asientos de las tapas y el casco de la caldera. Una vez terminada esta tarea es necesario aplicar una capa de grafito en polvo en las juntas, esto con la finalidad de hacer más fácil la tarea de recambio para la próxima ocasión en la que se realice esta tarea. Para los registros pasamano, es recomendable usar empaques TOPOG-E, verificando la medida correcta para que no existan fugas dichos empaques se los puede ver en la figura 30.



Figura 30. Empaques TOPOG-E 3" x 4" x 5/8".

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

### 3.3.7 Inspecciones Visuales

La parte externa de la caldera inspeccionarla visualmente para detección de grietas en el caso de que estas sean lo suficientemente grandes, además de porosidad en la soldadura y quemaduras que puedan comprometer la integridad del material, es necesario realizar una limpieza con materiales apropiados y posterior restitución de pintura anticorrosiva. Realizar una inspección general de la estructura principal, corrosión y deformaciones. También se debe realizar la inspección del estado del aislamiento ya que suelen presentarse filtraciones de agua lo cual debilita el material y afecta en el aislamiento térmico de la caldera

### 3.3.8 Checklist del mantenimiento overhaul

Al culminar el mantenimiento overhaul, el responsable de la empresa, en conjunto con el jefe de operaciones y mantenimiento deberá firmar el checklist de mantenimiento overhaul culminado mostrado el anexo 9, en donde se especifica si se ejecutó o no cada parte del proceso, y a su vez, se constata que se ha realizado satisfactoriamente.

### 3.3.9 Tiempo estimado de duración del mantenimiento overhaul

El tiempo estimado de duración es discutido con el cliente, luego de haber evaluado todas las variables que su caldera presenta. Un plan de mantenimiento overhaul se va a desarrollar en caso de que el cliente desee dejar su caldera con las condiciones cercanas a las nominales, sin embargo, puede seguir operándola si no se encuentra con daños críticos y bajo planes de mantenimiento preventivo, por lo cual es opcional este procedimiento. Se ha elaborado un diagrama de Gantt con los tiempos necesarios para el mantenimiento overhaul de una caldera de 100 BHP.

El procedimiento de mantenimiento es el mismo para el rango desde 0 a 350 BHP, lo que cambia es el tiempo de ejecución, razón por la cual se tomó como ejemplo una caldera de 100 BHP para el diagrama del anexo 10, estableciendo el tiempo requerido para el mantenimiento de una caldera de esas dimensiones, a continuación, se presenta el procedimiento de mantenimiento overhaul general aplicable en el rango mencionado de BHP. Ver figura 31.

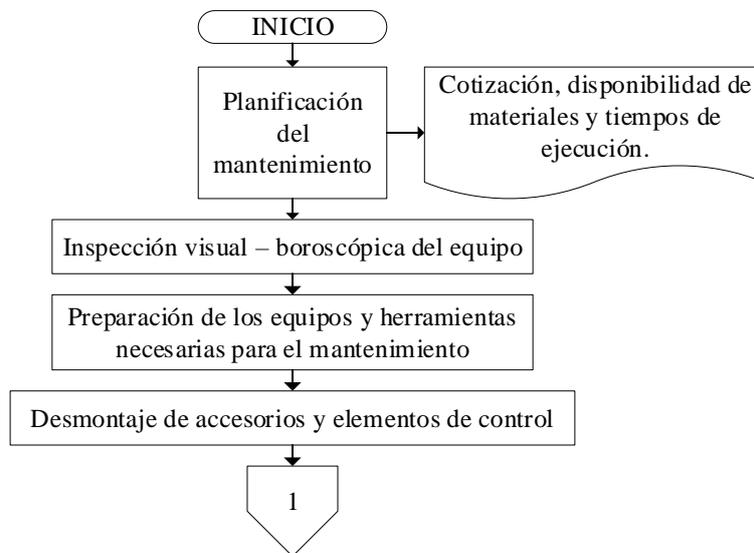


Figura 31. Procedimiento de mantenimiento overhaul

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

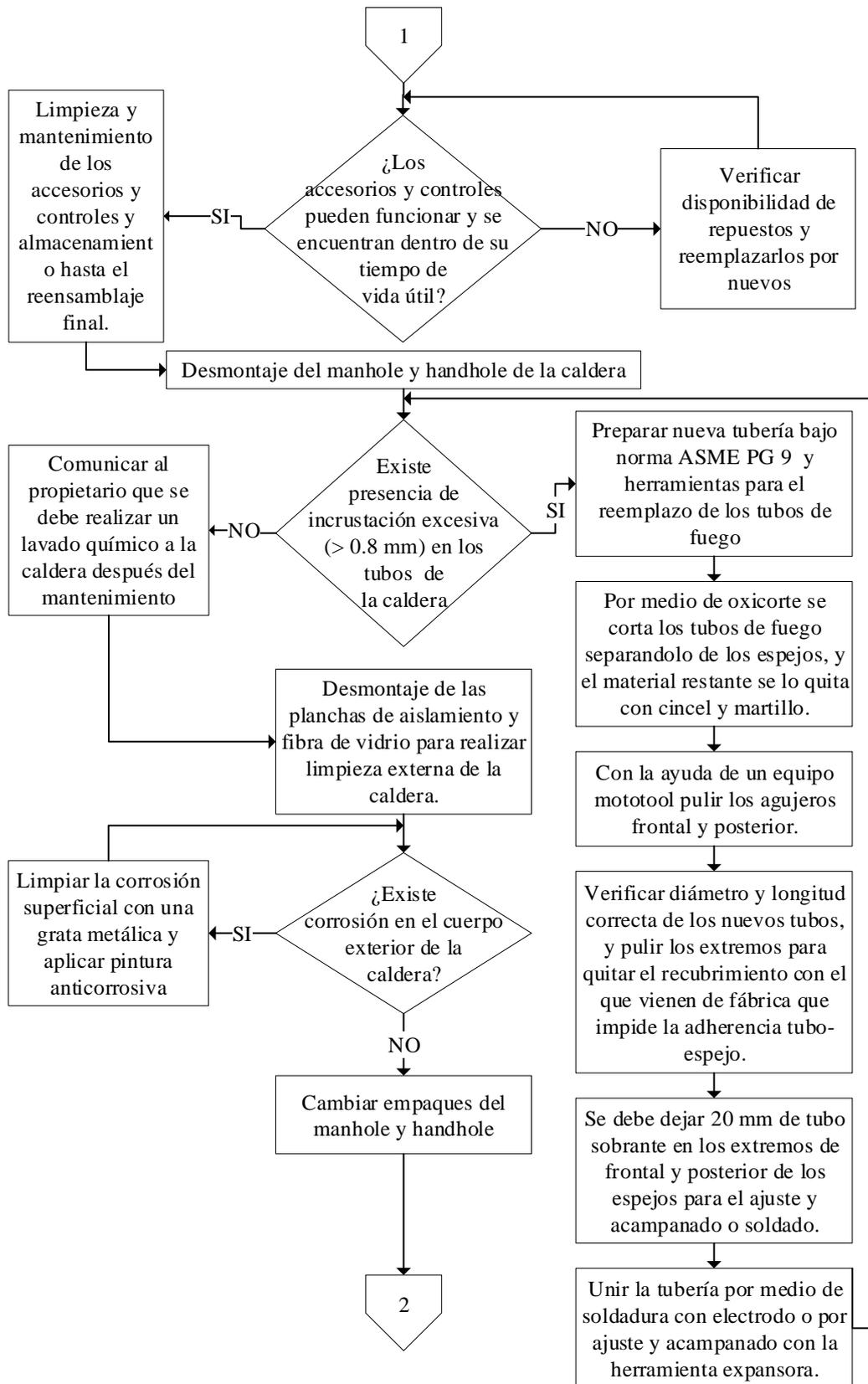


Figura 31. Procedimiento de mantenimiento overhaul (continuación).

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

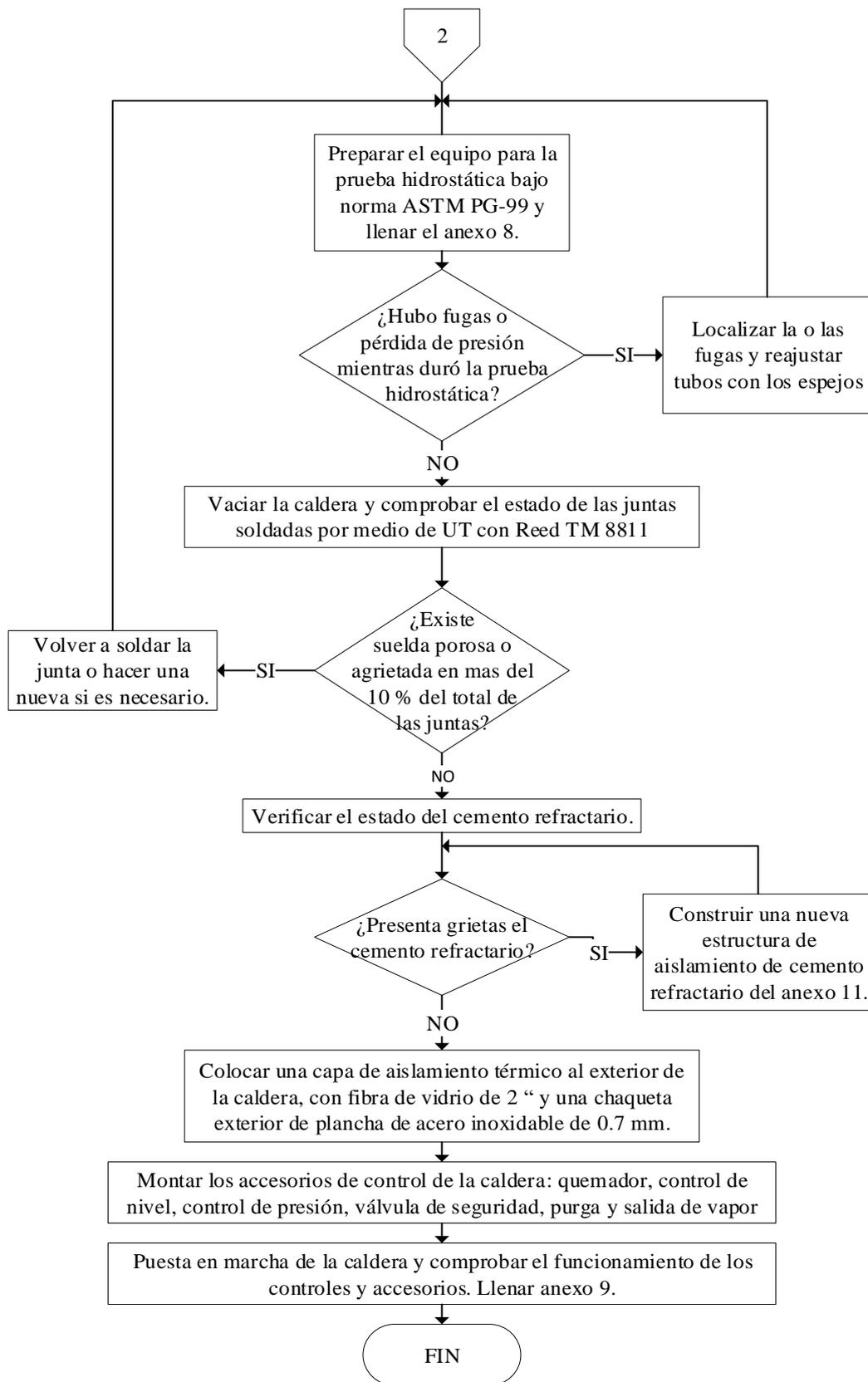


Figura 31. Procedimiento de mantenimiento overhaul (continuación).

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío

Con el conocimiento de los valores de variables críticas permisivas al momento del mantenimiento overhaul y los checklist aportados en este capítulo se puede garantizar un correcto proceso de mantenimiento, este proceso debe complementarse con un mantenimiento preventivo en el caso de los accesorios y calibración del equipo para poder obtener los valores de variables que nos conducen al overhaul.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE COSTOS DE UNA CALDERA NUEVA VS UNA SOMETIDA A OVERHAUL

En este capítulo se detalla los valores monetarios que intervienen en el proceso de mantenimiento overhaul, a manera de ejemplo se compara el valor de este servicio en una caldera de 100 BHP con la compra de una caldera importada PowerMaster, ya que es una de las marcas más comercializadas en el país y utilizadas en nuestra industria, además de ofertar calderas desde 5 hasta 1500 BHP.

#### 4.1. Cotización de una caldera PowerMaster de 100 BHP

A continuación, se presenta la diferencia de costos y la alternativa más viable para empresas que necesitan una caldera a un precio más asequible. La compañía PowerMaster ofrece servicios de fabricación y exportación de calderas alrededor del mundo desde 5 hasta 1500 BHP. Es una empresa altamente reconocida en el mercado. De acuerdo con la comparación que se requiere completar para este apartado, se presupuestó una caldera pirotubular con una potencia de 100 BHP ya que en el taller de la empresa Tecnicalderas también se dispone de una caldera de la misma capacidad, lo que permite la comparación técnica de costos.

La caldera cotizada cuenta con las siguientes especificaciones, además la compañía ofrece asistencia técnica para la instalación del equipo y comprobación de buen funcionamiento mediante una puesta en marcha en el sitio especificado por el cliente, el precio fue expresado en USD por la compañía, ver tabla 9 y tabla 10.

**Tabla 9.** Especificaciones técnicas y precio de la caldera PowerMaster de 100 BHP [52]

<b>Especificación</b>	<b>Descripción</b>
Capacidad de la Caldera	100 BHP
Modelo	WB-A2-3P
Combustible	Diésel #2
Tipo de caldera	Horizontal, tubos de humo, Wet-Back
Kilocalorías por hora	843600 Kcal/h
Producción de vapor	1564 Kg/h
Presión de diseño	10.5 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión de trabajo	9.5 Kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 9.** Especificaciones técnicas y precio de la caldera PowerMaster de 100 BHP (continuación) [52]

<b>Especificación</b>	<b>Descripción</b>
Numero de pasos	3
Superficie de calefacción total	46.45 m <sup>2</sup>
Tapas delantera y trasera	Abisagradas
Tubo central	Corrugado en caliente
Equipo de bombeo de combustible	Incluido
Luces indicadoras de falla de flama, bajo nivel de agua, segundo control de bajo nivel de agua, botón de alarma, seccionador principal y alarma multi-tonos	Incluido
Detector de flama	Incluido
Sistema de ignición automático	Incluido
Tablero eléctrico	Incluido
Aislamiento exterior	Lamina calibre .22 con primer anticorrosivo y pintura
Marca de quemador	Riello modulante
Programador marca	Siemens LMV3x (W-FM 50/54)
Válvula para salida de vapor	Incluido
Válvula de alimentación de agua tipo esfera WOG PSIG DE 1.25"	Incluido
Dos válvulas de alimentación de agua tipo check de 1.25"	Incluido
Válvula de cierre rápido tipo Everlasting de: 16 Kg/cm <sup>2</sup> 1.25"	Incluido
Bomba de alimentación	Grundfos 2 HP
Tanque de condensados	Incluido

Fuente: Cotización de una caldera de 100 BHP según Calderas y Servicios del Ecuador S.A (2021).

**Tabla 10.** Resumen de cotización [52].

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor en USD</b>
Caldera (servicios adicionales, forro acero inoxidable, estampado ASME), sistema de alimentación de agua (incluye tanque de condensado) Ablandador	1	90 155.00

#### 4.2 Cotización para un overhaul de una caldera pirotubular 100 BHP.

Por consiguiente, se evalúan los costos del mantenimiento overhaul, donde se involucran el valor en dólares de repuestos, además de los de mano de obra.

En los valores de repuestos, se establece para el overhaul una serie de repuestos que deben estar al momento de realizar este tipo de intervención al equipo. Se han listado, y se presentan a continuación en la Tabla 11, con su respectivo precio fijado, además en el [anexo 11](#) se puede encontrar la ficha técnica del cemento refractario usado en el mantenimiento de la caldera.

**Tabla 11.** Costos de Repuestos para Mantenimiento Overhaul

Descripción	Cantidad	Valor USD	Total USD
Lámina de acero ASTM A36 de 1.22 m x 2.44 m x 12 mm de espesor	10	182.00	1815.40
Lana de fibra de vidrio 1.5 m x 1.5 m x 2" de espesor.	10	24.00	244.75
Planchas de acero inoxidable espesor 0.7 mm. Medidas 1.22 m x 2.44 m	10	25.00	250.00
Cemento refractario	30	42.00	1260.00
Tubos ASTM A192 de 2", largo 5.80 m para calderas pirotubulares.	60	48.00	2880.00
Tubo central de diámetro 20"	4 m	230.00	920.00
Quemador marca Riello RL 190 hasta 22 Gal/h para fuel oil #2	1	4300.00	4300.00
Bomba de agua IHM – 5HP	1	1600.00	1600.00
Tubería de acero al carbono ¾" en hierro negro cédula 40 para vapor.	4	36.00	144.00
Válvula check de 1" en hierro negro clase 800	2	40.00	80.00
Válvula de seguridad Kunkle de 2" de bronce. Presión máxima 10 bar	2	275.00	550.00

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío 2021.

**Tabla 11.** Costos de repuestos de mantenimiento overhaul (continuación)

Descripción	Cantidad	Valor USD	Total USD
Válvula de globo de 1" en hierro negro marca Apollo	5	28.00	140.00
Control de nivel McDonnell 157S	1	1200.00	1200.00
Presostato Honeywell	2	155.00	310
Manómetro con glicerina de 0 a 10 bar en acero inox con dial de 3" con toma inferior en ½"	4	31.00	124.00
Tablero de control automatizado	3	250.00	750.00
Tornillos ½ SAE grado 1	150	0.20	30.00
Bridas de 4" de diámetro interior	5	39.00	195.00
Lamina de asbesto de 1.5 m x 1.5 m x 0.125 m	10	52.00	520.00
		Total	<b>17313.15</b>

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío 2021.

**4.3 Costos de mano de obra de overhaul de una caldera pirotubular 100 BHP**

En el proceso de fabricación y reparación de calderas se requieren procedimientos de corte, soldadura en ciertos casos también tratamientos térmicos, estos influyen dentro de un análisis económico como costos de mano de obra para el desempeño de estas actividades. En la Tabla 12, se observan la descripción de los costos que tienen que ver con mano de obra, este procedimiento de mantenimiento en la empresa se maneja bajo valor de mano de obra directa, pues en la empresa se cuenta con todas las herramientas y maquinarias para llevar a cabo el trabajo.

**Tabla 12.** Costos asociados a la mano de obra para overhaul

Descripción	Cantidad	Valor USD	Total, USD
Soldadura de los elementos que conforman el cuerpo	20 cordones	40.00	800.00
Rolado de planchas	4 planchas	100.00	400.00
Operaciones de ensamble	60 h	24.00	1440.00
Análisis de radiografía	2 h	250.00	500.00
		Total	<b>3140.00</b>

Fuente: Orta Richard, Guevara Darío, 2021.

De esta manera, los costos totales entre repuestos y manos de obra para el mantenimiento overhaul se traducen en lo siguiente. Ver tabla 13.

**Tabla 13.** Costos totales de mantenimiento overhaul.

<b>Costos de Overhaul</b>	<b>USD</b>
Repuestos	17313.15
Mano de Obra	3140.00
<b>Total</b>	<b>20453.15</b>

Fuente: Orta Richard – Guevara Dario, 2021.

A continuación, se hace una comparativa entre los costos de importación y tiempos de entrega de una nueva caldera PowerMaster de 100 BHP y los costos necesarios para el procedimiento de mantenimiento overhaul. Ver tabla 14.

**Tabla 14.** Costos y tiempo de entrega de mantenimiento overhaul

<b>Caldera</b>	<b>Costos USD</b>	<b>Tiempos de entrega DIAS</b>
Caldera PowerMaster 100 BHP	90 155.00 USD	120 días
Procedimiento de mantenimiento overhaul + mano de obra de 100 BHP	20453.15 USD	30 días

Fuente: Orta Richard – Guevara Dario, 2021.

En conclusión, este capítulo presenta una alternativa viable económicamente, como se pudo observar, el proceso de overhaul representa una diferencia de un 77.31 %, del costo de una caldera pirotubular de 100 BHP nueva, y una disminución del 75 % en tiempos de entrega, por lo que se hace altamente factible realizar el mantenimiento overhaul.

## **RESULTADOS**

Se estableció un procedimiento sistemático para determinar los componentes críticos de una caldera pirotubular por medio de la aplicación de la norma API – 580 que se basa en 5 etapas de evaluación: salud, ambiente, seguridad, costo y producción.

Una vez identificados los componentes críticos se procedió a reconocer las causas comunes de falla por medio de una matriz de criticidad y con ellos se obtuvieron las variables cuantitativas críticas para determinar el flujograma de la figura 20 en el cual se establecieron los pasos para obtener el valor de cada variable catalogada como crítico previo al proceso overhaul.

Se determinó un procedimiento de mantenimiento overhaul para calderas pirotubulares cuyo rango de potencia abarque desde 5 hasta 350 BHP establecido en el flujograma de la figura 31, el cual detalla los pasos a seguir por el encargado de mantenimiento, además de mantener un seguimiento a la tarea de mantenimiento con el uso de los checklist de los anexos: 5, 8, 9,13, 14 y 15.

Finalmente se realizó una comparativa económica entre los costos de la adquisición de una caldera nueva importada de 100 BHP contra la alternativa de mantenimiento overhaul de una caldera de la misma potencia, remarcando una diferencia del 77.31 % en cuanto a costos de componentes y mano de obra, además de una reducción del 75 % en tiempos de entrega.



**PRESUPUESTO**

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO</b>
Materiales de Oficina y normas	60.00 USD
Transporte	40.00 USD
Equipos de protección personal	40.00 USD
Alimentación	30.00 USD
Varios	40.00 USD
<b>Total Referencial</b>	<b>210.00 USD</b>

## CONCLUSIONES

Se estableció una metodología de evaluación de los componentes principales de la caldera: basados en la norma API - 580 con la cual se logró evaluar a cada componente de la caldera: cuerpo, espejos, tubo hogar, haz de tubos, compuertas, quemador, chimenea, válvulas y accesorios de control. Con ellos se pudo establecer cuales son más importantes, mediante evaluación de su criticidad. En cada uno de los componentes se identificó las causas de fallan, siendo las más comunes: falta de tratamiento de agua, agrietamiento, porosidad o debilitamiento de las juntas soldadas, falta de ajuste de tubos en el caso de haberlo hecho con un expander, debilitamiento o disminución de espesores por desprendimiento de incrustaciones o corrosión y material inadecuado de fabricación en el mantenimiento o construcción de una caldera, por la cual se determinaron estos factores como las variables críticas que caracterizan el estado de un componente, por consiguiente, de la caldera.

Para un diagnóstico de las variables críticas del equipo se realizó un flujograma en el cual se estableció las técnicas de evaluación, tales como el uso de calibradores para la medición de espesores, el uso de ultrasonido o tintas penetrantes para verificar la presencia de grietas en juntas de soldadura, entrega de certificados de calidad bajo normas ASTM para validar la composición del material usado en el mantenimiento o fabricación de una caldera, uso de un conductímetro para verificar la presencia de sólidos disueltos en el agua y el uso de normas API 579 para el tiempo de vida remanente de las máquinas y equipos, o la verificación en los datasheet de los componentes de control y accesorios de caldera.

Se definieron los valores de las variables críticas en base a normas API 580, ASME PG-16.3, PW-9, PG-9, PG-6.1, PW-11, ASTM A53 / A53 M – 20 y UNE EN-12953-10 que una caldera debe cumplir tanto para el funcionamiento de la misma, como para establecer los mínimos aceptables para la decisión de llevarla a un mantenimiento overhaul, siendo estas 0.8 mm de espesor de corrosión máxima en tubos y cuerpo, un máximo de grietas y poros del 10 % del total de las juntas soldadas, un nivel de conductividad del agua que debe ser menor a 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , un mínimo de 6 mm de espesor de las placas y materiales de construcción señalados en las normas ASME PG-9 y PG-6.1.

El plan de mantenimiento overhaul abarca la posibilidad de reusar componentes propios de la caldera que no se encuentren en mal estado y propone una necesidad de una planificación de mantenimiento preventivo para controlar las variables críticas cada cierto periodo y determinar

cuando ya es necesario un nuevo overhaul, se tomó como referencia el flujograma de la figura 31 donde se establecieron las etapas a seguir para la realización del mantenimiento overhaul y seguidamente se elaboró un diagrama de Gantt de una caldera de 100 BHP cuyo tiempo de mantenimiento es alrededor de 30 días aproximadamente.

Se realizó el análisis técnico económico entre el mantenimiento overhaul en comparación con la adquisición de una caldera nueva de la marca PowerMaster de 100 BHP, en el cual se tuvo una diferencia del 77.31 % que representa 69701.85 USD, y la diferencia de tiempo es aún mayor, 120 días para una importación en comparación de 30 días overhaul, como lo indicaron las tablas de análisis de costos.

## RECOMENDACIONES

La presencia de incrustaciones afecta al rendimiento del equipo, las normativas de fabricación de calderas nos dan la opción de usar tubos con recubrimientos anticorrosivos, pero también se puede usar recubrimientos por pulverización térmica si es la necesidad del cliente. Del mismo modo es recomendable el uso de combustibles con baja presencia de vanadio y sodio.

Para que el plan de mantenimiento overhaul tenga el resultado requerido es indispensable la aplicación de todos los aspectos mencionados en este trabajo de tesis, se recomienda además de medir las variables críticas, la comunicación con el cliente, debido a que la caldera puede llegar con valores de variables cercanos a los críticos y es decisión del dueño si aplicar planes de mantenimiento preventivo o realizar de una vez un overhaul al equipo.

En la ejecución del mantenimiento, al ser una caldera un componente importante en una industria no se puede permitir un paro de la misma, por un mal proceso de fabricación de calderas, por lo cual es recomendable el uso de equipos y materiales adecuados como lo señalan es las normativas ASTM según las condiciones de trabajo de la caldera.

Se recomienda utilizar siempre EPP's durante la ejecución del plan de mantenimiento ya que se manejan herramientas que pueden causar lesiones graves al operador además de verificar la disponibilidad de los materiales y accesorios para la ejecución del mantenimiento antes de presentar la propuesta a los clientes.

## LISTA DE REFERENCIAS

- [1] ASME, «asme.org,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.asme.org/getmedia/443f6b0a-4e45-4a12-8f83-3230fa92306a/35832.pdf>. [Último acceso: 05 05 2021].
- [2] M. Behzad, H. Kim, M. Behzad y H. Behambari, «Improving sustainability performance of heating facilities in a central boiler room by condition-based maintenance,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 206, pp. 713-723, 2019.
- [3] K. Pourabdollah, «Fouling formation and under deposit corrosion of boiler firetubes,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, 2021.
- [4] k. Liu, X. Feng, k. Ma, L. Wang, X. Xie y Z. Lu, «Investigation on the welding-induced multiple failures in boiler water wall tube,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 121, 2021.
- [5] S. Mostafa, B. Mohammad Hossein, H. Y. Sayyed Ehsan, S. Ali y A. Amir Hossein, «Root cause failure investigation of a boiler waterwall tube employed in a 325 MW thermal power plant: Caustic corrosion phenomenon and its effects,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 133, 2022.
- [6] S. Xue, R. Guo, F. Hu, K. Ding, L. Liu, L. Zheng y T. Yang, «Analysis of the causes of leakages and preventive strategies of boiler water-wall,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 110, 2020.
- [7] S. Kumar, M. Kumar y A. Handa, «Combating hot corrosion of boiler tubes – A study,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 94, pp. 379-395, 2018.
- [8] R. Sui, Y. Zhao, B. Ge y W. Wang, «Failure analysis of leakage at tube-to-tubesheet joints of a waste heat boiler,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 129, 2021.
- [9] R. F. Guevara Chinchayan, Trabajo de titulación, *Manual de Auditorías Energéticas*. Universidad Nacional del Santa, 2019.

- [10] J. Gómez Lagunés, Trabajo de titulación, *Programa de mantenimiento a equipo e inspección a calderas*. Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, 2018.
- [11] F. Latre, Curso de diseño de calderas pirotubulares, Depósito Legal n° Z-2355-2005, 2018.
- [12] P. Abarca Bahamontes, *Descripción de Calderas y Generadores de Vapor*, 2006.
- [13] R. B. Córdova Ordoñez y J. I. Larreátegui Pullaguari, Trabajo de titulación, *Diseño y construcción de un caldero de 7.5 BHP para generación de vapor*. Universidad Nacional de Loja, 2011.
- [14] ASME, *Código ASME 2010 para calderas y recipientes a presión*, New York, 2010.
- [15] R. Andaur Cruces, Trabajo de titulación, *Proyecto de instalación de un sistema de retorno de diesel para combustión de la caldera del hospital Penco Lirquèn*. Trabajo de titulación. Universidad Tècnica Federico Santa Maria, 2018.
- [16] ASTM International, «Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless,» de *Book of Standards*, 2021, p. 23.
- [17] J. L. Lizana Acevedo, Trabajo de titulación, *Propuesta de mejora para el uso de caldera basado en parametros de operacion y mantenimiento*. Universidad Tècnica Federico Santa Maria, 2016.
- [18] Sysclima, «Bases de caldera,» [En línea]. Available: <https://www.sysclima.com/productos/sysclima/soluciones-calefaccion/c/bases-de-caldera>. [Último acceso: 01 09 2021].
- [19] J. M. Lizana Fernández y E. O. Velasco Rivera, Trabajo de titulación, *Diseño de un quemador de combustibles*. Facultad de ingeniería y arquitectura, 2020.
- [20] SPIRAX SARCO S.A., *Distribución del vapor*, Madrid: s.n, 2016.
- [21] C. Barrera Puigdollers, N. Betoret Valls, M. Castelló Gómez y E. Pérez Esteve, Trabajo de titulación, *Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera*. Universitat Politècnica de Valencia.

- [22] S. Dipak K., «Floating of Steam Generator Safety Valves,» *Elsevier*, pp. 245-261, 2017.
- [23] Y. Wang, M. Wang, Y. Liu, L. Yin, X. Zhou, J. Xu y X. Zhang, «Fuzzy modeling of boiler efficiency in power plants,» *Information Sciences*, pp. 391-405, 2021.
- [24] Encyclopedia of Water Science, vol. 2, p. 969.
- [25] B. Shankar Panigrahi y K. Ganapathysubramanian, «Mineral Scales and Deposits,» *Elsevier*, pp. 639-655, 2015.
- [26] W. Wei, L. Wang y S. Cao, «Cause analysis and corresponding measures of common production problems of waste heat boiler in nonferrous metallurgy,» *Energy Saving Nonferrou Met.*, pp. 44-46, 2 06 2019.
- [27] A. Oelker Behn, Trabajo de titulación, *Economizadores*. Thermal Engineering LTDA., 2017.
- [28] Corporación Interamericana de Inversiones, «Pesic,» 02 05 2018. [En línea]. Available: <http://www.pesic.org/wp-content/uploads/2018/05/2-Eficiencia-en-Calderas.pdf>. [Último acceso: 26 08 2021].
- [29] A. Oelker Behn, Trabajo de titulación, *Eficiencia en calderas*. Thermal Engineering, 2017.
- [30] Y. Cengel y A. Ghajar, Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones, 4 ed., McGraw Hill, 2011.
- [31] R. Jiménez Borgues, J. A. Madrigal Monzón, M. J. Lapidó Rodríguez y D. A. Vidal Moya, «Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un generador de vapor,» *Ingeniería Energética*, vol. 37, pp. 135-143, 2016.
- [32] S. Agarwal y A. Suhane, «Study of Boiler Maintenance for Enhanced Reliability of System A Review,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 1542-1549, 2017.
- [33] UNE Normalización española, Mantenimiento, terminología del mantenimiento, Madrid, 2018.

- [34] C. Botero, Manual de mantenimiento, Santa Fe de Bogotá, 1991.
- [35] Aner, «Qué es el mantenimiento correctivo?,» 28 09 2020. [En línea]. Available: <https://www.aner.com/blog/mantenimiento-correctivo.html>. [Último acceso: 25 08 2021].
- [36] D. Casaro, P. Alfonzo, S. Mariño y M. Godoy, «Mantenimiento Correctivo Aplicado a un Sitio Basado en Joomla. Una Propuesta Centrada en la Accesibilidad,» *Revista Latinoamericana de Ingeniería de software*, vol. 3, n° 2, pp. 101-107, 2015.
- [37] C. Sierra Fernández y E. Andrea Calvo, Trabajo de titulación, *Capítulo 8: Técnicas de Mantenimiento Predictivo*. Universidad de Cantabria.
- [38] E. Sanabria, «ComparaSoftware,» 08 08 2020. [En línea]. Available: <https://blog.comparasoftware.com/mantenimiento-cero-horas/>. [Último acceso: 29 08 2021].
- [39] C. Barrera Medina, Trabajo de titulación, *Propuesta de un modelo de confiabilidad QA para el Mantenimiento Overhaul en la empresa PCB Ingeniería SAS*. Universidad ECCI, 2020.
- [40] R. Viswanathan, *Samage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*, Ohio: Carnes Publication Services, Inc., 1993.
- [41] M. Sanz del Amo y R. Patiño Molina, Manual práctico del Operador de Calderas Industriales, Madrid: Paraninfo, 2018.
- [42] ISPCH, «ispch.cl,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/NotaTecnicaEnsayosPresionHidrostatica.pdf>. [Último acceso: 07 07 2021].
- [43] American Petroleum Institute, *Codigo de inspeccion de recipientes a presion*, 2018.
- [44] J. A. Herrera Ortega y J. A. Betancourt Alvarez, Trabajo de titulación, *Plan de mantenimiento basado en el RBI para la caldera de vapor Power Master del area de*

*apoyo critico de una empresa del sector nutraceutico (omega 3)*. Universidad Industrial de Santander, 2018.

- [45] E. Soo Kim, «Fracture analysis of tube boiler for physical explosion accident,» *Forensic Science International*, vol. 278, pp. e1-e7, 2017.
- [46] J. Li, P. Zhou, G. Yu, H. Yan, Z. Chen, G. Song y Z. Liao, «Failure analysis of the water-wall tube in KIVCET waste heat boiler,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 121, 2021.
- [47] British Standards Institution, «Recommendations for treatment of water for steam boilers and water heaters,» Londres, 2017.
- [48] UNE, Parte 10. Requisitos para la calidad del agua de alimentacion y del agua de la caldera, 2017.
- [49] R. Bertemeu, «Incrustaciones en calderas a vapor a fueloil,» de *Incrustaciones en calderas a vapor a fueloil*, Huesca, 2015, pp. 1-9.
- [50] IQUIMSA, «IQUIMSA Lavado y limpieza de calderas,» IQUIMSA, 07 10 2020. [En línea]. Available: <https://www.iquimsa.com/blog/32/lavado-limpieza-quimica-calderas#:~:text=Se%20puede%20decir%20que%20la,en%20el%20interior%20del%20generador..> [Último acceso: 10 01 2022].
- [51] B. A. Díaz Marín , Trabajo de titulación, *Propuesta de plan de mantenimiento de una caldera pirotubular*. Universidad Tècnica Federico Santa Marìa, 2020.
- [52] Calderas y Servicios del Ecuador, «Calser30,» [En línea]. [Último acceso: 25 12 2021].
- [53] Emerson, «Venamet,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.venamet.com/wp-content/uploads/2019/05/6010EDM01-AM00150.pdf>. [Último acceso: 11 11 2021].
- [54] McDonnell & Miller, «Venamet,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.venamet.com/wp-content/uploads/2019/07/150S.pdf>. [Último acceso: 05 01 2022].

- [55] McDonnell & Miller, «Venamet,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.venamet.com/wp-content/uploads/2019/07/157s.pdf>. [Último acceso: 05 01 2022].
- [56] Reed Instruments, «Reed Instruments,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.reedinstruments.com/pdfs/cache/www.reedinstruments.com/tm-8811/datasheet/tm-8811-datasheet.pdf>. [Último acceso: 01 01 2022].
- [57] Elliot, «Elliot tool technologies,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.elliott-tool.com/media/catalog/esp/Elliott%20Tool%20Spanish%20Catalog.pdf>. [Último acceso: 02 01 2022].
- [58] Erecos, «Gamma Erecos,» [En línea]. Available: <https://www.gamma.com.co/aisladores/>. [Último acceso: 15 12 2021].
- [59] HELMAN, «Helman,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.helman.co/index.php/productos-helman-sas/ferreteria-e-industria/bomba-pruebas-hidrostaticas-detail.html>. [Último acceso: 05 09 2021].

**Anexo 1. Ficha técnica de la válvula de seguridad [53].**



**KUNKLE SERIES 6000 SAFETY VALVES**  
SAFETY AND RELIEF PRODUCTS

Bronze safety valves to ASME section I and VIII, steam, 'V' and 'UV'; section VIII, air/gas, 'UV' National Board certified including models to ASME section IV, steam 'HV'. PED certified for non-hazardous gas



MODEL 6010

**FEATURES**

- O-ring seats available for exceptional leak-free performance, reduced maintenance cost, multiple cycles with tight shutoff and improved seating integrity.
- Heavy duty casting.
- Wide hex on valve nozzle provides clearance for easy installation.
- Seats lapped to optical flatness.
- Dual control rings offer easy adjustability for precise opening with minimum pre-open or simmer and exact blowdown control.
- Pivot between disc and spring corrects misalignment and compensates for spring side thrust.
- Grooved piston type disc reduces sliding area and friction.
- Heavy duty lift lever assembly.
- Each valve tested and inspected for pressure setting and leakage.

**GENERAL APPLICATION**

These valves are suitable for use on steam boilers and generators, reciprocating or rotary, portable or stationary air/gas compressors, intercoolers and aftercoolers. Also for pressure vessels containing steam, air or non-hazardous gas and on pressure reducing stations.

**TECHNICAL DATA**

Connections: Threaded NPT  
 Temperature range<sup>1</sup>: -60° to 425°F (-51° to 219°C)  
 Pressure range<sup>1</sup>: 3 to 300 psig (0.2 to 20.7 barg)  
 Code: ASME I, IV, VIII and PED



**NOTE**

1. See page 2 for more temperature and pressure range information.

# Boiler Controls



## Low Water Cut-Offs – Mechanical For Steam Boilers

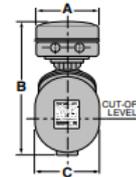
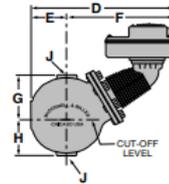
### Series 150S Low Water Cut-Off/Pump Controllers



- For commercial and industrial low or high pressure boiler applications
- For boilers of any steaming capacity
- Monel bellows provides corrosion resistance
- Snap action switches for high temperature service
  - 1 Single pole, single throw switch for pump control
  - 1 Single pole, double throw switch for low water cut-off and alarm actuation
- Optional features
  - Manual reset
  - 2 Single pole, single throw switches
  - 2 Single pole, double throw switches
  - Float block
  - BSPT threads
- Maximum pressure 150 psi (10.5 kg/cm<sup>2</sup>)



Series 150S



Boiler Controls

### Model 150S-MD

- Maximum differential operation**
- Prevents nuisance burner shutdowns in **low pressure** applications operating less than 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>)
- For additional information see page 46

### Electrical Ratings

Voltage	Pump Circuit Rating (Amperes)		Pilot Duty
	Full Load	Locked Rotor	
120 VAC	7.4	44.4	345 VA at
240 VAC	3.7	22.2	120 or 240 VAC

Alarm Circuit Rating (Amperes)	
Voltage	Amps
120 VAC	1
240 VAC	1/2

### Ordering Information

Model Number	Part Number	Description	Weight lbs. (kg)
150S	171702	Combination low water cut-off/pump controller	24.7 (11.2)
150S-B	171903	150S w/float block	24.7 (11.2)
150S-B-M	172104	150S-B w/manual reset	24.7 (11.2)
150S-BMD	172002	150S w/float block and max. dif.	24.7 (11.2)
150S-BM-MD	172201	150S-BMD w/manual reset	24.7 (11.2)
<b>150S-MD</b>	<b>171802</b>	<b>150S w/maximum differential</b>	<b>24.7 (11.2)</b>
150S-M	172702	150S w/manual reset	24.7 (11.2)
<b>150S-M-MD</b>	<b>172802</b>	<b>150S-M w/maximum differential</b>	<b>24.7 (11.2)</b>
158S	178402	150S w/2 SPDT switches	26.3 (11.9)
158S-M	178502	158S w/manual reset	27.3 (12.4)
159S	178802	150S w/2 SPST switches	26.0 (11.8)

### Dimensions, in. (mm)

A	B	C	D	
5 7/8 (149)	12 7/16 (316)	6 (152)	13 1/4 (337)	
E	F	G	H	J
3 5/16 (84)	9 15/16 (252)	4 1/4 (105)	3 7/16 (87)	1 NPT

# Boiler Controls



## Low Water Cut-Offs – Mechanical For Steam Boilers

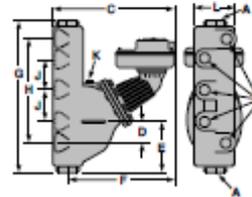
### Series 157S

#### Low Water Cut-Off/Pump Controllers

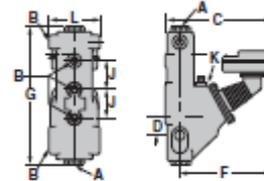
- For residential, commercial and industrial low or high pressure boiler applications
- For boilers of any steaming capacity
- Monel bellows provides corrosion resistance
- Float chamber with integral water column provided
- Snap action for high temperature service
  - 1 Single pole, single throw switch for pump control
  - 1 Single pole, double throw switch for low water cut-off and alarm actuation
- Optional features
  - Manual reset
  - Integral conductance probes for additional levels and greater operating differential-Model 157S-RBP-MD
  - 1" or 1 1/4" NPT equalizing tappings
  - 1/2" or 3/4" NPT tappings for gauge glass/tri-cock installations
  - BSPT threads
- Maximum pressure 150 psi (10.5 kg/cm<sup>2</sup>)



Series 157S



Model 157S-R



Boiler Controls

### Model 157S-MD

#### Maximum differential operation

- Prevents nuisance burner shutdowns in low pressure applications operating less than 50 psi (3.5 kg/cm<sup>2</sup>)
- For additional information see page 46

### Electrical Ratings

Voltage	Cut-off and Pump Circuits Rating (Amperes)		Pilot Duty
	Full Load	Locked Rotor	
120 VAC	7.4	44.4	345 VA at 120 or 240 VAC
240 VAC	3.7	22.2	

Alarm Circuit Rating (Amperes)	
Voltage	Amps
120 VAC	1
240 VAC	1/2

### Ordering Information

Model Number	Part Number	Description	Weight lbs. (kg)
157S	173502	150S low water cut-off w/water column	39.7 (18.0)
157S-MD	173603	157S w/maximum differential	39.7 (18.0)
157S-A	173702	157S w/alternate tappings	39.5 (17.9)
157S-A-M	172811	157S-A w/manual reset	39.5 (17.9)
157S-M	172812	157S w/manual reset	39.7 (18.0)
157S-M-MD	172813	157S-M w/maximum differential	39.7 (18.0)
157S-R	176220	157S w/alternate tappings	42.0 (19.0)
157S-R-M	172817	157S-R w/manual reset	42.0 (19.0)
157S-RBP-MD	176503	157S w/2 integral conductance probes	51.0 (23.1)
157S-RL	176902	157S w/alternate tappings	42.0 (19.0)
157S-RL-M	172815	157S-RL w/manual reset	42.0 (19.0)

### Dimensions, in. (mm)

Model	A NPT	B NPT	C	D	E	F	G	H	J	K NPT	L
157S	1	1/2	13 3/8 (339)	2 5/8 (59)	4 1 5/8 (125)	11 3/4 (298)	16 (406)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	5 1/4 (149)
157S-A	1 1/4	3/4	13 3/8 (339)	2 5/8 (59)	4 1 5/8 (125)	11 3/4 (298)	16 (406)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	5 1/4 (149)
157S-R	1	1/2	13 3/8 (339)	2 1/4 (57)	5 1/8 (149)	11 3/4 (298)	17 (432)	11 1/2 (292)	3 1/2 (89)	3/4	6 1/4 (159)
157S-RL	1 1/4	1/2	13 3/8 (345)	3 1/2 (89)	5 1/8 (149)	11 3/4 (298)	17 (432)	12 1/4 (324)	3 1/2 (89)	3/4	6 1/4 (159)

Anexo 4. Ficha técnica del medidor de espesores para los ensayos [56].



**Ultrasonic Thickness Gauge**

Model TM-8811




TECHNICAL DATA

**Features**

- Measures the thickness of steel, cast iron, aluminum, red copper, zinc, quartz glass, polyethylene, PVC, grey cast iron and nodular cast iron
- Large, easy-to-read LCD display
- Displays sound velocity at the touch of a button
- Automatic material calibration
- User selectable unit of measure (in./mm)
- Low battery indicator
- Includes ultrasonic couplant gel, probe, hard carrying case and batteries

**Specifications**

Measuring Range:	0.05 to 7.9" (1.5 to 200mm)
Accuracy:	±(0.5% + 0.1mm)
Resolution:	0.001"/0.1mm
Velocity Range:	500 to 9000 m/s
Compatible Materials:	Steel, cast iron, aluminum, red copper, zinc, quartz glass, polyethylene, PVC, grey cast iron and nodular cast iron
Sampling Time:	Less than 1 sec.
Display:	4-Digit, LCD
Probe Length:	3" (36")
Low Battery Indicator:	Yes
Power Supply:	4 x AA Batteries
Product Certifications:	CE
Operating Temperature:	32 to 122°F (0 to 50°C)
Storage Temperature:	-4 to 140°F (-20 to 60°C)
Operating Humidity:	20 to 80%
Dimensions:	6.3 x 2.7 x 1.25" (161 x 69 x 32mm)
Weight:	9oz (258g)

**TM-8811-KIT**  
Ultrasonic Thickness Gauge with 5-Step Calibration Block

Includes:  
TM-8811 Ultrasonic Thickness Gauge and R9060 5-Step Calibration Block



Model	Description
TM-8811	Ultrasonic Thickness Gauge
TM-8811PROBE	Replacement Probe
R7950	Ultrasonic Couplant Gel
R7950/5L	Ultrasonic Couplant Gel, 5L
R7950/12	Ultrasonic Couplant Gel, Pack of 12
R9060	5-Step Calibration Block
CA-52A	Soft Carrying Case
R8888	Hard Carrying Case
TM-8811-KIT	Ultrasonic Thickness Gauge with 5-Step Calibration Block
TM-8811-NIST	Ultrasonic Thickness Gauge & NIST

REED Instruments

1-877-849-2127 | info@reedinstruments.com | www.reedinstruments.com

**Anexo 5. Checklist para la limpieza interna del cuerpo de caldera pirotubular**

<b>Datos de la Caldera</b>		
<b>Cliente:</b> _____	<b>Modelo:</b> _____	DataSheet Anexo: _____
<b>Checklist de Limpieza Interna Caldera Pirotubular</b>		
Retiro de tapas de inspección	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
Retiro de tapón de purga de agua	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
Limpieza por el manhole	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
Limpieza por el handhole	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
Limpieza de los tubos de fuego	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
Inspección de corrosión en superficie interna del cuerpo	SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> ) Alta ( <input type="checkbox"/> ) (>1.6 mm) Media ( <input type="checkbox"/> ) (entre 0.8 a 1.6 mm) Baja ( <input type="checkbox"/> ) (< 0.8 mm)	
Inspección de incrustaciones	SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> ) Alta ( <input type="checkbox"/> ) (>1.6 mm) Media ( <input type="checkbox"/> ) (entre 0.8 a 1.6 mm) Baja ( <input type="checkbox"/> ) (< 0.8 mm)	
Retiro de sedimentos por drenaje	Ejecutado: SI ( <input type="checkbox"/> ) NO ( <input type="checkbox"/> )	
<b>Observaciones Generales Limpieza</b>		
<b>Interna:</b> _____		
_____.		

Fuente: Orta Richard – Guevara Darío, 2021

## Anexo 6. Herramienta expansora para tubos de fuego [57].

### Serie 40 Expansores Rectos Para Calderas

#### Medida Del Tubo

- 2.000" a 3.000" DE
- (50.8 a 76.2 mm) DE

#### Tipo

- Expansores Rectos Para Calderas

#### Aplicación

- Rerolado de Tubos con Fugas en Calderas Piro tubulares



Los Expansores Rectos Para Calderas Serie 40 son recomendadas para el re-rolado de juntas mecánicas con fugas en calderas piro tubulares. De avance automático, estos expansores pueden ser usados manualmente o propulsados por un motor de rolado para mayor rapidez.

El pitón de resguardo es de 1/2" (12.7mm) de largo se dirige contra la placa y sobre la punta del tubo proyectada.

El cojinete de bronce entre el marco del expansor y el protector reduce la fricción y permite un control de torque en el Rolado de Tubos.

#### Características & Beneficios:

- Solo para re-rolado de juntas mecánicas con fuga en tubos de calderas piro tubulares.
- La expansión cónica sella agresivamente las juntas mecánicas con fuga permitiéndole pasar de un tubo a otro rápidamente.
- Una herramienta económica y duradera.

Los mandriles se venden por separado.

#### Repuestos & Accesorios:

- Tambor del mandril.
- Juego de Rodillos.
- Lubricante Para Rolado de Tubos. *Vea la página 19*

D.E. del Tubo Pulgadas y BWG	Número de parte	Rango de la Expansión				Juego de Rodillos	Tambor Del Mandril	Mandril Cuadrado
		Pulgadas		Métrico				
		Min.	Max.	Min.	Max.			
2" X 12-18	40-20000	1.718	2.000	43.64	50.80	4005-20	40C3P20000	3/4"
2-1/2" X 10-18	40-20102	2.156	2.500	54.76	63.50	4005-25	40C3P20102	3/4"
3" X 10-18	40-30000	2.625	3.000	66.68	76.20	4005-30	40M3P30000	1"



**Anexo 7.** Herramienta expansora para tubos de fuego [57].

**Motores Accionadores Para Careadores**



**Motores Eléctricos**

Motor	RPM	Voltios	Hz	Amps
447000	Low Gear: 60-140 High Gear: 200-470	110	50/60	16
447000-220		220		8

Los Motores vienen suministrados con una mordaza tipo "Jacobs" de 5/8" y un Receptáculo Adaptador Hembra Cuadrado de 3/4".

**Motores Neumáticos**

Motor	RPM	Uso de Neumáticoe	Manguera Abastecedora de Neumáticoe
P5154	325	23 cfm @ 90PSI (6.2 bar)	1/4" NPTF - 5/16" (8mm) ID
P5476C	100		

Mordaza Tipo "Jacobs" de 1/2"



Herramientas de calidad para tubos en el mundo de "Lo necesito para ayer". **Instalación 17**

**Anexo 8. Checklist de la Prueba Hidrostática**

<b>Datos de la Caldera</b>		
<b>Cliente:</b> _____	<b>Modelo:</b> _____	<b>Fecha:</b> _____
<b>Checklist de Prueba Hidrostática</b>		
Orden y Limpieza (5S) en el sitio de trabajo	Ejecutado: SI (___) NO (___)	
Retiro de dispositivos de alivio y válvulas de retención	Ejecutado: SI (___) NO (___)	
Retiro de accesorios de Instrumentación	Ejecutado: SI (___) NO (___)	
Aplicación de teflón en juntas roscables	Ejecutado: SI (___) NO (___)	
<b>Data de Prueba Hidrostática</b>		
Duración de la Prueba	Especifique: _____	
pH del Agua de la prueba	pH: _____	
Temperatura del agua	° C: _____	
Presión de la Prueba	(psi/bar): _____	
Presión Nominal	(psi/bar): _____	
<b>Observaciones Generales Prueba Hidrostática:</b> _____		
_____		
_____.		

Fuente: Orta Richard, Guevara Dario, 2021.

### Anexo 9. Checklist General del Mantenimiento Overhaul

<b>Datos de la Caldera</b>	
<b>Cliente:</b> _____	<b>Modelo:</b> _____
<b>Fecha:</b> _____	
<b>Checklist Culminación Overhaul</b>	
Planificación del Mantenimiento	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Limpieza Interna del Equipo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Limpieza Externa del Equipo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Desmontaje de Partes del Equipo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Desmontaje de Componentes y Accesorios	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Mantenimiento a Componentes y Accesorios	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Cambio de los Empaques del Equipo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Pruebas de Hermeticidad del Cuerpo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Pruebas de Hermeticidad de la Tubería	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Ensamblaje de Componentes	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Ensamblaje de Partes del Equipo	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Comprobación de Ensamblaje	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Prueba Hidrostática	Ejecutado: SI (___) NO (___)
Entrega del Equipo al Cliente	Ejecutado: SI (___) NO (___)
<b>Observaciones</b>	
<b>Generales:</b> _____	
_____	
_____.	
<b>Firma Responsable:</b> _____.	

Fuente: Orta Richard, Guevara Dario, 2021.

### Anexo 10. Diagrama de Gantt de mantenimiento overhaul de una caldera 100 BHP

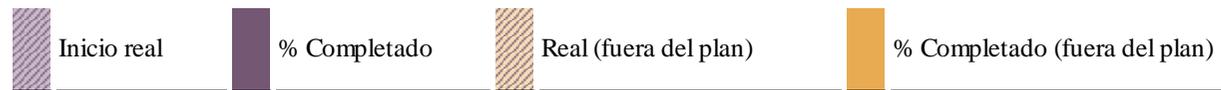
#### Programación Mantenimiento Overhaul

De acuerdo con el Procedimiento de la Empresa, se hace planificación del Mantenimiento de su Caldera PiroTubular POTENCIA DE CALDERA \_\_\_100\_\_\_ BHP CLIENTE\_\_\_\_\_

ACTIVIDAD	INICIO DEL PLAN	DURACIÓN DEL PLAN	INICIO REAL	DURACIÓN REAL	PORCENTAJE COMPLETADO	PERIODOS EN SEMANAS												
						1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Planificación del Mantenimiento	1	1	0	0	0%	█												
Limpieza Interna del Equipo	1	1	0	0	0%	█												
Limpieza Externa del Equipo	1	1	0	0	0%	█												
Desmontaje de Partes del Equipo	2	1	0	0	0%	█	█											
Desmontaje de Componentes y Accesorios	2	1	0	0	0%	█	█											
Mantenimiento a Componentes y Accesorios	3	1	0	0	0%		█											
Cambio de los Empaques del Equipo	3	1	0	0	0%		█											
Pruebas de Hermeticidad del Cuerpo	4	1	0	0	0%			█										
Pruebas de Hermeticidad de la Tubería	4	1	0	0	0%			█										
Ensamblaje de Componentes	4	1	0	0	0%			█										
Ensamblaje de Partes del Equipo	4	1	0	0	0%			█										
Comprobación de Ensamblaje	4	1	0	0	0%			█										
Prueba Hidrostática	4	1	0	0	0%			█										
Entrega del Equipo al Cliente	4	1	0	0	0%			█										

Periodo resaltado: 1 Duración del plan

ETIQUETAS:



Fuente: Orta Richard – Guevara Dario, 2021.

Anexo 11. Ficha técnica cemento refractario Concrax 1500 [58]



**ERECOS**  
empresa de refractarios colombianos s.a.

**CONCRETOS REFRACTARIOS  
SILICO - ALUMINOSOS**

**CONCRAX 1500-3**

Clasificación NTC - 814 , ASTM C - 401	Clase D	
Análisis Químico %		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49.5	
SiO <sub>2</sub>	39.0	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	
TiO <sub>2</sub>	2.0	
CaO	7.5	
MgO	0.3	
Álcalis	0.4	
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32	
Temperatura equivalente °C NTC - 706 , ASTM C-24	1717	
Máxima temperatura de servicio recomendada °C	1540	
Máximo tamaño de grano mm	25	
Material seco requerido por metro cúbico kg	2000 - 2100	
Agua de preparación cm <sup>3</sup> de agua/kg de material seco NTC - 988 , ASTM C - 860	115 - 130	
Densidad volumétrica °C - g/cm <sup>3</sup> ASTM C - 134	110	2.00 - 2.10
	1000	1.80 - 1.85
	1260	1.85 - 1.90
	1370	1.85 - 1.90
	1480	1.95 - 2.00
Módulo de ruptura en frío °C - Mpa ( kg/cm <sup>2</sup> ) NTC - 988 , ASTM C-133	110	5.0 - 8.0 ( 50 - 80 )
	1000	1.5 - 2.5 ( 15 - 25 )
	1260	4.0 - 6.0 ( 40 - 60 )
	1370	12.0 - 14.0 ( 120 - 140 )
	1480	14.0 - 15.0 ( 140 - 150 )

Todos los derechos reservados © EREPOS

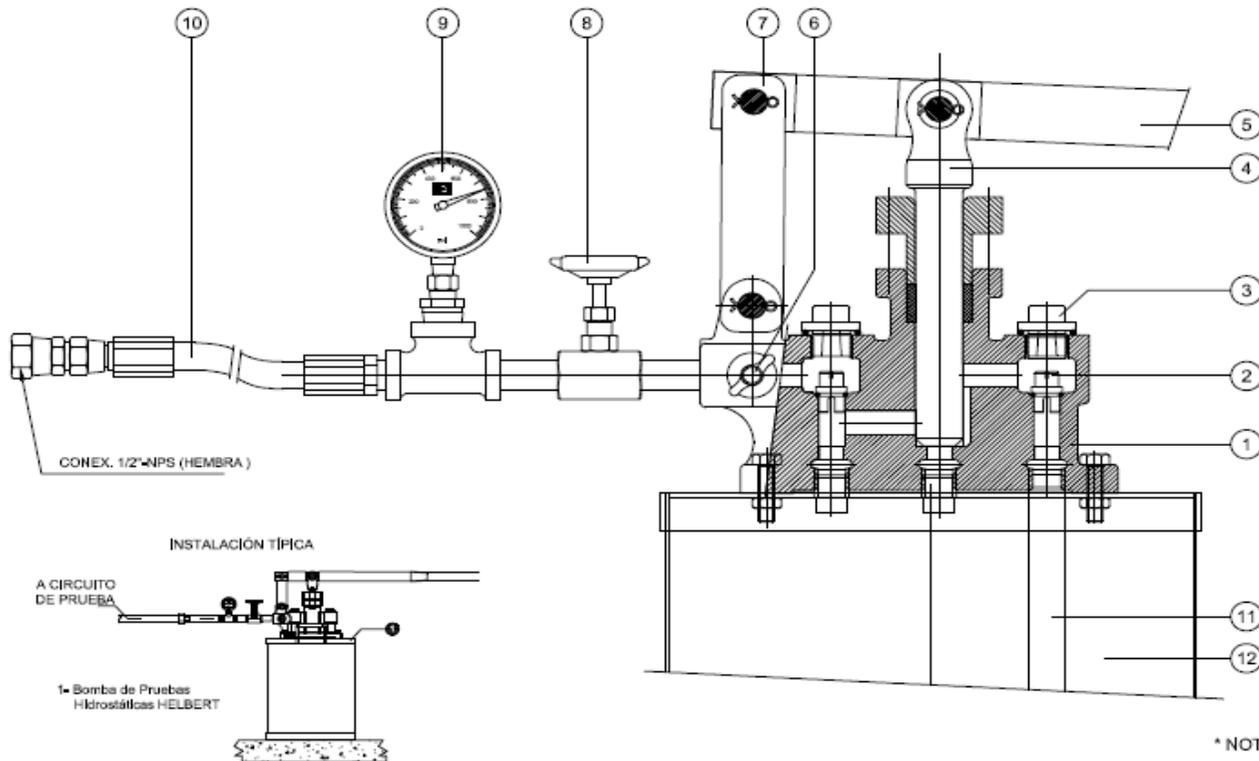
Anexo 12. Bomba de pruebas de presión hidrostática HRHG de 500 psi [59].



ODDE-FT  
EDICIÓN: 09-14

FICHA TÉCNICA

BOMBA MANUAL DE PRUEBAS HIDROSTÁTICA EN ALUMINIO HRHG DE 500 psi - SERIE 700  
BOMBA MANUAL DE PRUEBAS HIDROSTÁTICA EN HIERRO HRHG DE 1500 PSI - SERIE 700



Item	REFERENCIA	HRHG 101 - 500 PSI	HRHG 102 - 1500 PSI
D1	Conexión	1/2" NPS	1/2" NPS
	Presión de Prueba	0 - 600 PSI.	0 - 1600 PSI
	Presión de Trabajo	0 - 500 PSI.	0 - 1500 PSI
	Peso de Bomba con Tanque	W: 19,5 Kg.	W: 26,5 Kg.
	Capacidad de Succión.	27, 62 ml. / Bombazo	21,78 ml. / Bombazo
Identificación HELBERT, PRESIÓN DE TRABAJO, REFERENCIA, INSTRUCCIONES			

No.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CT.
12	TANQUE	ACERO	1
11	TUBO DE SUCCIÓN	ACERO GALVANIZADO	1
10	MANGUERA DE CONEXIÓN	CAUCHO	1
9	MANOMETRO SECO	VARIOS	1
8	VÁLVULA REGISTRO	ACERO	1
7	APOYO PALANCA	PLATINA	2
6	VÁLVULA DE CIERRE	LATÓN	1
5	PALANCA	PLATINA	1
4	VÁSTAGO	PVC/Fe, GRIS	1
3	TAPÓN CAPERUZA	BRONCE	2
2	SELLO TAPÓN	LATÓN	2
1	CUERPO	ALUMINIO/Fe GRIS	1

\* NOTA: LOS MATERIALES VARIAN SEGUN LA REFERENCIA DE LA BOMBA

**Anexo 13.** Checklist de correlación de variables para definir mantenimiento overhaul.

<b>VARIABLES PARA DECISIÓN DEL OVERHAUL</b> Si al menos hay 1 SI, se procede al overhaul		
<b>VARIABLES de Evaluación</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Respuesta</b>
<b>Tiempo de vida útil</b>	Tiempo de Vida Útil Excedido (para cada accesorio ver la datasheet de cada uno)	SI: (___) NO: (___)
	Horas de Operación luego del Último Overhaul	H: _____
<b>Estado de los accesorios</b>	Presencia de corrosión > 0.8 mm o mal funcionamiento	SI: (___) NO: (___)
<b>Consumo de Combustible por hora</b>	30% de consumo mayor al nominal	SI: (___) NO: (___)
<b>Tratamiento de agua que se utiliza</b>	Alto contenido de sólidos disueltos > 6000 µS/cm	SI: (___) NO: (___)
	Frecuencia de Purgas no está establecida o no es cumplida por el cliente	SI: (___) NO: (___)
<b>Incrustaciones y espesores en el cuerpo, placas y tubos</b>	Alta Presencia de Incrustaciones > 0.8 mm	SI: (___) NO: (___)
	Espesor < 7 mm	SI: (___) NO: (___)
<b>Soldadura de cuerpo placas y tubos</b>	Presencia de porosidad y grietas de suelda en más del 50 % del total.	SI: (___) NO: (___)

Fuente: Orta Richard, Guevara Dario, 2021

**Anexo 14.** Checklist de módulo principal de transferencia de calor de caldera.

<b>Parte del Equipo</b>	<b>Falla</b>	<b>Inspección</b>	<b>Ejecución</b>
<b>TUBO HOGAR DEL PRIMER PASO</b>	Pérdida de eficiencia en la transferencia de calor	Inspección visual de la capa del hollín	SI (___) NO (___)
	Deformaciones	Inspección de la capa de incrustaciones	SI (___) NO (___)
	Fracturas	Inspección visual del nivel de corrosión	SI (___) NO (___)
	Obstrucción del flujo de humos		
<b>TUBOS DEL SEGUNDO PASO</b>	Pérdida de Eficiencia en la transferencia de calor	Inspección visual de la capa del hollín	SI (___) NO (___)
	Deformaciones	Inspección de la capa de incrustaciones	SI (___) NO (___)
	Fracturas	Inspección visual del nivel de corrosión	SI (___) NO (___)
	Obstrucción del flujo de humos		
<b>CÁMARA POSTERIOR DE GASES</b>	Pérdida de Eficiencia en la transferencia de calor	Inspección visual de la capa del hollín	SI (___) NO (___)
	Deformaciones	Inspección de la capa de incrustaciones	SI (___) NO (___)
	Fracturas	Inspección visual del nivel de corrosión	SI (___) NO (___)
	Obstrucción del flujo de humos		
<b>CÁMARA FRONTAL DE GASES</b>	Pérdida de Eficiencia en la transferencia de calor	Inspección visual de la capa del hollín	SI (___) NO (___)
	Deformaciones	Inspección de la capa de incrustaciones	SI (___) NO (___)
	Fracturas	Inspección visual del nivel de corrosión	SI (___) NO (___)
	Obstrucción del flujo de humos		

Fuente: Orta Richard, Guevara Dario, 2021

**Anexo 15.** Checklist módulo secundario de accesorios de control de la caldera

<b>Parte del Equipo</b>	<b>Falla</b>	<b>Inspección</b>	<b>Ejecución</b>
<b>CONTROL DE NIVEL</b>	Falla Nivel de Agua	Lavado mecánico del control de nivel. Prueba eléctrica de contactos	SI (___) NO (___)
	Fugas de vapor	Revisión visual de los componentes	SI (___) NO (___)
<b>CONTROL DE PRESIÓN</b>	Fugas de vapor	Inspección visual del diafragma	SI (___) NO (___)
	No se apaga la caldera por presión	Prueba eléctrica de contactos	SI (___) NO (___)
<b>MANÓMETRO</b>	Lectura Incorrecta	Calibración	SI (___) NO (___)
<b>MIRILLA DE NIVEL</b>	Lectura Incorrecta	Lavado mecánico	SI (___) NO (___)
<b>VÁLVULA DE SEGURIDAD</b>	No se dispara en la presión de ajuste.	Pruebas de disparo de la válvula de seguridad	SI (___) NO (___)
	Se dispara por debajo de la presión de trabajo		

Fuente: Orta Richard – Guevara Dario,2021