



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO

MECÁNICO

**TEMA: "ANÁLISIS, EVALUACIÓN TERMODINÁMICA Y PUESTA A
PUNTO DEL SISTEMA TÉRMICO DEL CALDERO YORK SHIPLEY"**

AUTORES:

JURADO GOLLES, JAMES EDUARDO

TAPIA ALBÁN, IVÁN MARCELO

DIRECTOR: ING. VILLAVICENCIO POVEDA, ÁNGELO HOMERO

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICADO DEL DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARRERA: *INGENIERÍA MECÁNICA*

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "*ANÁLISIS, EVALUACIÓN TERMODINÁMICA Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA TÉRMICO DEL CALDERO YORK SHIPLEY*", fue realizado por los señores *Jurado Golles, James Eduardo, y Tapia Albán, Iván Marcelo*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 09 de Julio de 2019.

Director del trabajo de titulación

Ing. Angelo Homero Villavicencio Poveda MSc.
C.C. 1709338931

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Jurado Golles, James Eduardo**, y **Tapia Albán, Iván Marcelo**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*Análisis, evaluación termodinámica y puesta a punto del sistema térmico del caldero York Shipley*”, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 09 de Julio de 2019.

Autores

Jurado Golles James Eduardo
C.C. 1717644221

Tapia Albán Iván Marcelo
C.C. 1721437307

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Jurado Golles, James Eduardo**, y **Tapia Albán, Iván Marcelo**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *“Análisis, evaluación termodinámica y puesta a punto del sistema térmico del caldero York Shipley”*, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 09 de Julio de 2019.

Autores

Jurado Golles James Eduardo
C.C. 1717644221

Tapia Albán Iván Marcelo
C.C. 1721437307

DEDICATORIA

A mi hermano Arturo por su constante apoyo incondicional y a mi novia Alejandra por estar presente durante todo este proceso.

James E. Jurado G.

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres, Willian e Isabel por todo su apoyo incondicional durante mi vida universitaria, por su sacrificio, trabajo y dedicación para mi formación, sin ustedes y su ejemplo, llegar aquí no hubiera sido posible, este logro y los que vendrán se los debo a ustedes.

A mi hermana Andrea, por su compañía y complicidad en cada paso de nuestro camino juntos, por mantenerte a mi lado con dulce lealtad.

Iván M. Tapia A.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Miguel y Blanca un agradecimiento por su amor, apoyo y consejos que han sido las bases de mi formación académica y personal.

A mis hermanos, Arturo, Benjamín y Cindy por acompañarme en los momentos difíciles.

Al Ingeniero Ángel Villavicencio por ser parte de mi formación académica y por ser más que un maestro un amigo.

A los ingenieros David Platzter, Javier Viteri y Boris Pumisacho por compartir sus conocimientos y brindarme su apoyo y amistad. A RETENA S.A. por su colaboración en este proyecto.

A mis amigos por haber compartido grandes momentos en todos estos años.

James E. Jurado G.

A Dios y la Virgen Dolorosa, por haberme guiado a lo largo del camino, y permitirme concluir esta etapa de mi vida acompañado de mis padres y mi hermana.

A mis padres Willian e Isabel por apoyarme desde siempre, en especial en mis años universitarios; por su confianza, apoyo, consejos y un gracias inmenso por haber creído en mí en los momentos en que ni siquiera yo lo hacía, este logro es más suyo que mío.

A mi hermana Andrea, por mantenerse a mi lado con su paciencia y ternura poniéndole color a mis días grises y ser mi alegría en los momentos duros.

A mis compañeros y amigos, por brindarme su amistad.

A los ingenieros Ángel Villavicencio y Roberto Gutiérrez por su ayuda y confianza para la realización de este trabajo.

A la empresa Retena S.A., por su colaboración y asesoría.

Iván M. Tapia A.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
INDICE DE FIGURAS.....	xvi
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general:.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Justificación e importancia.....	3

CAPITULO II.....	5
2.1 MARCO TEÓRICO	5
2.1.1 Caldero	5
2.1.2 Clasificación de los calderos:	5
2.1.2.1 de acuerdo a su posición:	5
2.1.2.2 De acuerdo a su instalación:	9
2.1.3 De acuerdo a la salida de los gases: Tiro natural y tiro forzado	9
2.1.4 De acuerdo al material de construcción.....	10
2.1.5 De acuerdo a su uso	10
2.1.6 De acuerdo a su tecnología.....	10
2.1.7 Partes de un caldero	11
2.1.7.1 Cuerpo:	11
2.1.7.2 Quemador:	12
2.1.7.3 Tanque de almacenamiento de agua:	13
2.1.7.4 Válvulas:	13
2.1.7.5 Manómetros:	17
2.1.7.6 Indicador de nivel de agua:	17
2.1.7.7 Eliminadores de aire:	18
2.1.8 Sistemas periféricos	18

2.1.8.1 Sistema de alimentación de agua.....	19
2.1.8.2 Bomba de agua	19
2.1.8.3 Ablandador de agua	19
2.1.8.4 Bomba de dosificación de químicos	21
2.1.9 Sistema de alimentación de combustible.....	24
2.1.10 Tanque diario de combustible.....	25
2.1.11 Bomba de alimentación de combustible	26
2.1.12 Sistema de control y seguridad	27
2.1.12.1 Control de agua en el caldero:	27
2.1.12.2 Control de presión en el caldero:	28
2.1.12.3 Control de llama en el quemador:.....	28
2.1.13 Control de presión	29
2.1.13.1 Presostato:.....	29
2.1.13.2 Transductor de presión:	30
2.1.13.3 Válvula de seguridad:	30
2.1.14 Control de nivel de agua.....	30
2.1.15 Sistema de evacuación de gases	31
2.1.15.1 Chimenea del caldero:	31
2.1.15.2 Termómetro de la chimenea:	31

2.1.16 Mantenimiento preventivo.....	31
2.1.17 Mantenimiento correctivo.....	32
2.1.18 Eficiencia del caldero	32
2.1.19 Funcionamiento del caldero.....	33
CAPÍTULO III	35
3. ANÁLISIS PRIMARIO Y DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CALDERO	35
3.1 Evaluación actual del caldero	35
3.1.1 Inspección visual	35
3.1.1.1 Quemador	35
3.1.1.2 Detalle del estado del quemador.....	37
3.1.1.3 Tobera.....	38
3.1.1.4 Electroodos	39
3.1.1.5 Solenoide de tres vías	39
3.1.1.6 Pistón	40
3.1.1.7 Lado de Agua	40
3.1.1.8 Lado de fuego	42
3.1.1.9 Ducto de salida de gases de combustión	43
3.1.1.10 Control de nivel de agua del caldero	44

3.1.1.11 Tanque de condensado	46
3.1.2 Cálculo de la eficiencia en el estado actual del caldero	47
3.1.2.1 Agua procedente de la combustión del hidrógeno.....	48
3.1.2.2 Humedad en el aire	49
3.1.2.3 Gases secos de la chimenea:	51
3.1.2.4 Combustión incompleta:.....	52
3.1.2.5 Pérdidas por radiación:	52
CAPÍTULO IV	61
PLAN DE MANTENIMIENTO	61
4.1 Detección de defectos.....	61
4.1.1 Lado de fuego:	61
4.1.2 Lado de agua.....	62
4.1.3 Quemador	64
4.2 Mantenimiento de sistemas periféricos	67
4.2.1 Sistema de evacuación de gases	67
4.2.2 Sistema de control y seguridad.....	67
4.2.2.1 Control de nivel de agua del caldero	68
4.2.2.2 Control de nivel de presión.....	69
4.2.2.3 Control de llama	70

4.3 Prueba hidrostática	72
4.4 Plan de mantenimiento preventivo (PMP).....	73
4.4.1 Acciones de mantenimiento mensual:	74
4.4.2 Acciones de mantenimiento semestral:	74
4.4.3 Anual:	75
CAPÍTULO V	76
PUESTA A PUNTO.....	76
5.1 Pruebas de operación y seguridad	76
5.1.1 Nivel de agua.....	76
5.1.1.1 Rangos de operación:	77
5.1.1.2 Switch de operación.....	79
5.2 Calibración de la presión y control de seguridad	80
5.2.1 Control de presión del caldero.....	80
5.2.2 Control de presión de baja y alta llama	81
5.2.3 Control de nivel de operación.....	81
5.2.4 Control de nivel de seguridad.....	81
5.2.5 Válvula de seguridad	82
5.3 Calibración del quemador y seguridad	82
5.3.1 Calibración y control de combustión del quemador	82

5.3.2 Sistema de control de la combustión	82
5.3.3 Productos de la combustión.....	84
5.3.3.1 Nitrógeno (Ni)	84
5.3.3.2 Dióxido de Carbono (CO ₂)	84
5.3.3.3 Vapor de agua (H ₂ O)	84
5.3.3.4 Oxígeno (O ₂).....	85
5.3.3.5 Monóxido de Carbono (CO).....	85
5.3.4 Quemador y sus partes.....	85
5.3.4.1 Selección de tobera.....	87
5.3.5 Quemador de doble etapa	88
5.4 Control de seguridad.....	90
5.4.1 Detección de flama	90
5.4.2 Modo de controlar la seguridad.	90
CAPÍTULO VI.....	91
Cálculos energéticos del caldero	91
6.1 Balance energético del caldero	91
6.1.1 Cálculo de consumo de combustible	91
6.1.2 Cálculo de la nueva eficiencia del caldero	93
6.1.3 Cálculo de pérdidas	100

6.2 Evaporación real:	105
6.3 Calidad de vapor	108
6.4 Selección de válvula de alivio de presión.....	110
CAPÍTULO VII.....	115
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	115
7.1 Comparación del estado actual vs el estado inicial	115
CAPÍTULO VIII	121
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	121
CAPÍTULO IX	125
CONCLUSIONES.....	125
RECOMENDACIONES	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Condiciones recomendadas para el agua de alimentación.....</i>	22
Tabla 2 <i>Análisis de gases de combustión en las condiciones iniciales del caldero</i>	47
Tabla 3 <i>Acciones de mantenimiento correctivo en el lado de fuego.</i>	62
Tabla 4 <i>Acciones de mantenimiento correctivo en el lado de agua</i>	63
Tabla 5 <i>Características técnicas de la bomba Baldor Reliance.</i>	64
Tabla 6 <i>Acciones de mantenimiento correctivo en el quemador</i>	65
Tabla 7 <i>Características técnicas de la bomba de combustible.....</i>	66
Tabla 8 <i>Características técnicas de las empaquetaduras</i>	67
Tabla 9 <i>Detalle de mantenimiento al sistema de evacuación de gases</i>	67
Tabla 10 <i>Características técnicas del control de nivel de agua.....</i>	69
Tabla 11 <i>Características técnicas del control de presión</i>	70
Tabla 12 <i>Características técnicas del control de llama</i>	71
Tabla 13 <i>Características técnicas de la válvula de alivio.....</i>	72
Tabla 14 <i>Cantidad de gases permitidas en combustión</i>	85
Tabla 15 <i>Análisis de gases de combustión posterior al mantenimiento al caldero.</i>	93
Tabla 16 <i>Tabla comparativa de condiciones iniciales y finales del caldero.....</i>	116
Tabla 17 <i>Comparación de pérdidas en combustión inicial en las condiciones iniciales y finales</i>	119
Tabla 18 <i>Tabla comparativa de eficiencias inicial y final</i>	120
Tabla 19 <i>Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas.....</i>	121
Tabla 20 <i>Remuneración a profesionales de RETENA S.A.</i>	121
Tabla 21 <i>Remuneración a estudiantes.....</i>	122

Tabla 22 <i>Materiales utilizados</i>	122
Tabla 23 <i>Costos indirectos</i>	123
Tabla 24 <i>Detalle de costos y financiamiento</i>	124

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Caldero pirotubular Bosch de alta presión.....	6
Figura 2. Caldero de dos pasos de gases	7
Figura 3. Caldero de tres pasos de gases	8
Figura 4. Caldero Acuotubular	9
Figura 5. Carcaza de caldero pirotubular	11
Figura 6. Válvula de purga automatizada.....	14
Figura 7. Válvula de globo	15
Figura 8. Válvula anti retorno	15
Figura 9. Válvula de compuerta	16
Figura 10. Válvula de bola	16
Figura 11. Manómetro para caldero tipo R	17
Figura 12. Visor de nivel de agua.....	17
Figura 13. Eliminadores de aire.....	18
Figura 14. Esquema de ablandador de agua	20
Figura 15. Incrustaciones en tubos de intercambio de calor	22
Figura 16. Corrosión por oxígeno en calderos.	23
Figura 17. Corrosión cáustica.....	24
Figura 18. Tanque de almacenamiento de combustible	25
Figura 19. Bomba de alimentación de combustible	26
Figura 20. Controles de nivel por flotador	27
Figura 21. Switch de control de presión.....	28
Figura 22. Controlador de fuego HONEYWELL	29

<i>Figura 23.</i> Presostato de operación.....	29
<i>Figura 24.</i> Control McDonell and Miller	30
<i>Figura 25.</i> Chimenea del caldero York Shipley	31
<i>Figura 26.</i> Quemador Power Flame	36
<i>Figura 27.</i> Filtro bomba combustible	37
<i>Figura 28.</i> Tobera	38
<i>Figura 29.</i> Electrodo	39
<i>Figura 30.</i> Solenoide de tres vías.....	40
<i>Figura 31.</i> Pistón.....	40
<i>Figura 32.</i> Hand hole	41
<i>Figura 33.</i> Parte interna del caldero del lado de agua.....	41
<i>Figura 34.</i> Salida de gases de combustión.....	42
<i>Figura 35.</i> Reemplazo de los pernos de sujeción de las tapas móviles del lado de fuego.....	43
<i>Figura 36.</i> Ducto de salida de gases de combustión, acoplado con ventilador	44
<i>Figura 37.</i> Válvula de flotador.....	45
<i>Figura 38.</i> Controlador del Mc Donnell and Miller	45
<i>Figura 39.</i> Tanque de condensado	46
<i>Figura 40.</i> Tapa del tanque de condensado	47
<i>Figura 41.</i> Análisis de laboratorio de Diésel de la Ep. Petroecuador	50
<i>Figura 42.</i> Diagrama de conductividad térmica por resistencias.....	53
<i>Figura 43.</i> Empaquetaduras	66
<i>Figura 44.</i> Control de nivel de agua Serie 157S-RB-P.....	68
<i>Figura 45.</i> Honeywell L404A, Pressuretrol Controller	69

Figura 46. Control de llama Honeywell RM7890.....	71
Figura 47. Válvula de alivio de presión.....	72
Figura 48. Válvula modelo 157S-RB-P.....	77
Figura 49. Válvula modelo 157S-RB-P.....	78
Figura 50. Válvula modelo 157S-RB-P.....	78
Figura 51. Opciones del switch de operación.....	79
Figura 52. Partes internas del control de presión	80
Figura 53. Válvula de alivio de presión.....	82
Figura 54. Partes principales del quemador Power Flame C3-O	86
Figura 55. Partes principales del quemador Power Flame C3-O	87
Figura 56. Tobera 6.00 gal/hr y ángulo 60 grados	88
Figura 57. Diagrama flujo de combustible del quemador	89
Figura 58. Características técnicas de la bomba de alimentación	101
Figura 59. Coeficientes de pérdida de accesorios de tubería.....	103
Figura 60. Presión atmosférica en Sangolquí.....	107
Figura 61. Campana de saturación del sistema	110
Figura 62. Velocidades sugeridas para tuberías	112
Figura 63. Factores de corrección para vapor y gases.....	113
Figura 64. Tipos de válvula de presión	114

RESUMEN

EL presente trabajo de titulación consiste en la evaluación del estado del Caldero YORK SHIPLEY VTB SERIE 300 de 30 HP del laboratorio de conservación de la energía, inspección de sus diferentes sistemas y partes principales para establecer una metodología que permita realizar una puesta a punto en su funcionamiento, mediante la aplicación de mantenimiento correctivo. Con la colaboración de docentes de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y de la empresa Retena S.A., se determinó la condición inicial del caldero, y en base a dicha condición se diseñó un plan de mantenimiento correctivo que permita incrementar su eficiencia. Finalmente, se realizaron diferentes pruebas y ensayos para comprobar su correcto funcionamiento y calibración. Mediante principios y leyes termodinámicos se establecieron las nuevas condiciones del caldero, comprobando el incremento en su eficiencia.

PALABRAS CLAVE:

- **CALDERO**
- **EFICIENCIA**
- **CALIBRACIÓN**

ABSTRACT

The present degree work consists of the evaluation of the YORK SHIPLEY VTB SERIE 300 of 30 HP Boiler situated in the energy conservation laboratory, inspection of its systems and main parts to establish a methodology that allows performing a task at the point of operation, through the application of corrective maintenance. With the collaboration of teachers from ESPE University, and Retena Company S.A., the initial condition of the boiler was determined, and based on this condition; a correct maintenance plan was designed so that it could increase its efficiency. Finally, different tests and essays were practiced to check its correct operation and calibration. Through thermodynamic laws, the new conditions of the boiler were established, verifying the growth in its efficiency.

KEY WORDS:

- **BOILER**
- **EFFICIENCY**
- **CALIBRATION**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

En el año 1982 la universidad de las fuerzas Armadas - ESPE adquirió el caldero Fulton, con la finalidad de ser utilizado como recurso práctico para realizar diferentes tipos de prácticas de laboratorio para la carrera de ingeniería mecánica. Con el transcurso de los años el caldero ha sido modificado para cumplir las necesidades académicas

Posteriormente, el año 2007 se pudo adquirir el caldero York Shipley de 30 BHP instalado por la empresa "LA LLAVE", al igual que el caldero Fulton, el objetivo fue tener una herramienta práctica para realizar las prácticas de: calorímetros, ciclo Rankine, barras de longitud infinita y balances exergéticos, prácticas correspondientes a las asignaturas de termodinámica, termodinámica aplicada y transferencia de calor de la carrera de ingeniería mecánica.

En el año 2009 fue presentado por el departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica la tesis “puesta en marcha, automatización y curvas de calibración para el caldero YORK SHIPLEY para el laboratorio de termodinámica del DECEM”, donde se implementó un sistema de adquisición de datos y cambios de instrumentos de medición manuales por automáticos.

El desarrollo de esta tesis generó las curvas de funcionamiento mediante la implementación de un sistema computarizado cuyo objetivo es obtener datos digitales, mediante la ayuda de Interfaz Hombre-Máquina (HMI), PLC, detectores de temperatura (TRD'S), transductores de presión, entre otros, obteniendo datos en tiempos real, dejando a un lado los sistemas periféricos de inspección manual.

En el año 2014 se realizó mantenimiento preventivo a cargo del Ing. Boris Pumisacho en colaboración con la empresa RETENA S.A. y el laboratorio de Energía. Se realizó mantenimiento al caldero, principalmente el lado de agua y el lado de fuego, de manera complementaria se realizó limpieza y calibración del quemador e inspección visual de los sistemas periféricos.

Con el paso de los años el deterioro ha incrementado y las condiciones de operación no garantizan la seguridad de las instalaciones, docentes y estudiantes, esto se debe a que el caldero funciona a temperatura y presiones de operación elevadas. Al haber realizado una inspección visual se logró determinar que:

- Corrosión en el lado de agua
- Empaquetaduras deterioradas
- Válvula del tanque de condensado dañada
- Incrustaciones en el lado de agua
- Bomba de los químicos inoperativa
- Hollín en el lado de fuego
- Sistema de ablandadores inoperativo
- Electrodo con fisura
- Tubos de nivel no visibles
- Oxidación en las tuberías
- Falta de mantenimiento en el filtro de combustible
- Los sistemas de medición de temperatura y presión se encuentran inoperativos
- La acometida de agua y vapor requiere una inspección visual de sus componentes, y en caso de detectar alguna anomalía se procederá a ser reemplazado.

- El tablero de control se encuentra en perfecto estado
- El cemento refractario no presenta agrietamientos

1.2 Definición del problema

El presupuesto otorgado a los laboratorios ha sido tan escaso que el caldero YORK SHIPLEY ha sido relegado de toda intervención desde el año 2014. Por lo anteriormente expuesto al caldero no se le ha realizado desde su instalación un análisis, y evaluación termodinámica que nos permita conocer sus reales condiciones

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

- Realizar el análisis, evaluación termodinámica y puesta a punto de sistema térmico del caldero York Shipley

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el estudio de los elementos del caldero York Shipley.
- Realizar la implementación de sistema de medición de variables termodinámicas para combustión e intercambio de calor en el caldero York Shipley.
- Realizar el análisis para mejorar la eficiencia del caldero.

1.4 Justificación e importancia

El Departamento de Ciencias de la Energía y la Mecánica siendo parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE posee laboratorios de suma importancia como el de Energías, sin embargo, no se encuentra en óptimas condiciones debido a los años de uso y la falta de mantenimiento, lo que ha provocado que el caldero acumule deterioros en el lado de agua y en el lado de fuego, además de la presencia de incrustaciones y oxidación en las tuberías, un

recubrimiento de hollín en las paredes del lado de fuego aumentando el espesor y obteniendo una mala transferencia de calor que provoca un consumo de combustible excesivo.

Si el caldero continúa operando en las mismas condiciones actuales, tanto las personas como las instalaciones corren un serio riesgo de explosión, los sensores de presión y temperatura están calibrados para funcionar a condiciones iniciales, siendo la cadena de seguridad el principal sistema que impide una catástrofe. Por lo tanto, el presente proyecto es de vital importancia que se lo desarrolle.

Actualmente el caldero no se encuentra operando de forma apropiada por falta de presupuesto para sus respectivas reparaciones, mantenimiento, calibración y análisis incluido el riesgo profesores y estudiantes, por lo tanto, se propone realizar un análisis de eficiencia y consumo de combustible, pérdidas de calor, gases de combustión, mantenimiento y reparación, ya que esto no garantizara que el equipo no cause accidentes graves. Por lo cual se propone esta tesis como un medio alternativo en beneficio del laboratorio de energía y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE trabajando directamente relacionados con los estudiantes de la carrera de Ing. Mecánica

CAPITULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Caldero: Un caldero es un sistema cerrado, cuya finalidad es la producción de energía térmica. La generación de esta energía se produce mediante la combustión de un fluido de trabajo, pudiéndose obtener vapor o agua caliente dependiendo del diseño del caldero

2.1.2 Clasificación de los calderos: El estudio de calderos es amplio, y los criterios para clasificarlos es amplio también, varía según el autor, a continuación, presentamos los criterios de clasificación más relevantes:

- De acuerdo a su posición
- De acuerdo a la salida de los gases
- De acuerdo a su instalación
- De acuerdo al material de construcción
- De acuerdo al combustible utilizado
- De acuerdo a su utilización
- De acuerdo a su tecnología

Cabe mencionar que un tipo específico de caldero puede estar presente en dos o más criterios de clasificación diferentes.

2.1.2.1 de acuerdo a su posición: Dependiendo de la posición entre el fluido de trabajo y los gases de combustión se tiene dos tipos de calderos: Con tubos de humo (Calderos pirotubulares) y Con tubos de agua (Calderos acuotubulares)

- **Calderos pirotubulares**

Llamados también calderos de tubos de fuego, son calderos en los que los gases producidos en la combustión circulan internamente por los tubos de los pasos, los cuales están rodeados de agua. Los gases a altas temperaturas producidos recorren la cámara de combustión hasta ser evacuados en la chimenea. Este tipo de caldero no suele ser de gran tamaño y generalmente su uso está restringido a presiones no mayores a 22 bar.



Figura 1. Caldero pirotubular Bosch de alta presión.

Fuente: (BOSCH, Eberhard, & Tuffner, 2016)

Como se mencionó el diseño de este tipo de calderos no suele ser de gran tamaño, lo que implica un menor costo de fabricación y mantenimiento, pueden trabajar con agua salina, los residuos de sal no afectan de manera considerable el área de calefacción del caldero, de manera general son calderos pequeños pero eficientes.

Dependiendo de la disposición interna de los tubos de clasifican en:

Calderos pirotubulares horizontales: Los tubos se encuentran colocados en posición horizontal, colocados desde la parte delantera hasta la parte trasera del caldero, su uso es común en industrias donde la necesidad de vapor generado no sea baja

Calderos pirotubulares verticales: Los tubos se encuentran colocados en forma vertical, están colocados desde la parte inferior hasta la parte superior del caldero, se usan generalmente en pequeñas industrias donde los requerimientos de vapor no sean elevados.

Otra clasificación de los calderos pirotubulares depende del número de haces tubulares:

Calderos de dos pasos de gases: En este tipo de calderos existen dos vías de circulación para los gases de combustión. Poseen una cámara de combustión cilíndrica (conocida también como hogar) ubicada en la parte inferior de la caldera cubierta por una pared refrigerada conocida como cámara húmeda. Los calderos de este tipo presentan bajo rendimiento, además presentan un elevado contenido de sustancias contaminantes en los gases de combustión.

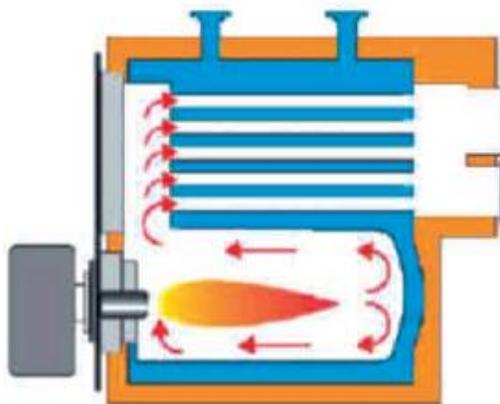


Figura 2. Caldero de dos pasos de gases

Fuente: (Uceda, 2012)

Calderos de tres pasos de gases: En este caldero existen tres vías de pasos para la circulación de gases de combustión. Se componen por una cámara de combustión cilíndrica (hogar), rodeada por la cámara húmeda. Los gases de combustión que se producen en el quemador del hogar circulan por los tubos en el segundo paso. Finalmente, los gases de combustión circulan a través del tercer paso de humos para ser evacuados al exterior. Este tipo de caldera posee elevado rendimiento, además a diferencia del caldero de dos pasos de gases, el contenido de sustancias contaminantes en los gases de combustión es mínimo

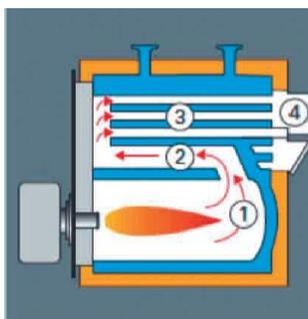


Figura 3. Caldero de tres pasos de gases

Fuente: (Uceda, 2012)

- **Calderos acuotubulares**

Son calderos en los cuales el fluido de trabajo circula internamente en los tubos, y los gases producidos circulan externamente a ellos, al contrario de los calderos pirotubulares. Este tipo de caldero es especialmente utilizado cuando se trabaja con altas presiones y cuando se requiere altas eficiencia, además de lo mencionado la tasa de generación es elevada en la mayoría de casos.

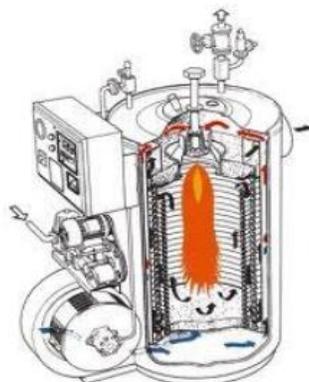


Figura 4. Caldero Acuotubular

Fuente: (Miranda, 2018)

Al trabajar con altas presiones, y tener elevadas tasas de generación, su diseño es más complejo en relación a los calderos pirotubulares. La calidad y pureza del agua empleada para la combustión es alta con bajos niveles de salinidad, su mantenimiento es más costoso, al igual que los costos de fabricación y diseño.

2.1.2.2 De acuerdo a su instalación: Estacionarios y móviles

- Estacionarios: Son calderos que se encuentran instalados de manera fija, son utilizados en sistemas de calefacción y calentamiento de espacios cerrados como edificios, conjuntos o apartamentos, se utilizan también como plantas de vapor en la industria.
- Móviles: Generalmente se usan en embarcaciones y locomotoras, además se usan también en campamentos petroleros, mineros y en la construcción.

2.1.3 De acuerdo a la salida de los gases: Tiro natural y tiro forzado

- Tiro Natural: Son calderos en los que no es necesario acoplar sistemas de ventilación adicional para la salida de los gases producidos en la combustión
- Tiro Forzado: Son calderos que cuentan con un ventilador acoplado que facilita la salida de los gases de combustión.

2.1.4 De acuerdo al material de construcción

- De hierro fundido:
- De acero

2.1.5 De acuerdo a su uso

- Calderos de uso industrial
- Generación en plantas terrestres y en navíos
- Calderos para plantas termoeléctricas
- Calderos de uso doméstico

2.1.6 De acuerdo a su tecnología

- **Calderos de agua caliente:** En este tipo de calderos el fluido de trabajo es agua, la temperatura de trabajo no suele sobrepasar los 100 °C. Los calderos pirotubulares y acuotubulares están en esta categoría
- **Calderos de agua sobrecalentada:** El fluido de trabajo es el agua, y en este caso la temperatura de trabajo puede exceder los 100 °C. Los calderos pirotubulares y acuotubulares están en esta categoría
- **Caldero de fluido térmico:** En este tipo de caldero el fluido de trabajo no es agua, solo los calderos acuotubulares pertenecen a esta categoría
- **Calderos de vapor:** El fluido de trabajo es vapor de agua. Los calderos pirotubulares y acuotubulares están en esta categoría

Los combustibles más empleados en los calderos son: carbón, gas, bunker, diésel, entre otros. En los últimos años se han ido desarrollando biocombustibles para calderos, su uso aún está en estudio.

2.1.7 Partes de un caldero

Como se mencionó previamente, existen diferentes criterios para clasificar a los calderos, también se mencionó que un caldero puede estar en más de una categoría de clasificación, sin embargo, sus componentes o partes principales son las mismas para la mayoría de casos, variando generalmente en función de su diseño, capacidad y tamaño. A continuación, se detalla las partes principales de un caldero:

2.1.7.1 Cuerpo: El cuerpo está conformado por una plancha del material seleccionado para la construcción del caldero sometida a un proceso de rolado, internamente el cuerpo del caldero está formado por:

- **Carcaza:** Es una envoltura que da la forma al caldero, generalmente de material resistente a altas temperaturas. En la carcaza se colocan la Manhole y la Handhole, ambas con fines de inspección, limpieza y mantenimiento del caldero

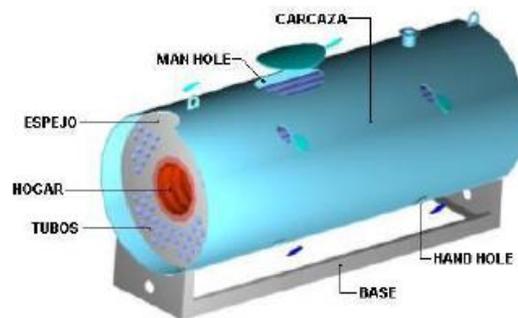


Figura 5. Carcaza de caldero pirotubular

Fuente (García, 2013)

- **Hogar:** Es el lugar donde se realiza la combustión y posterior generación de vapor.

- **Tubos:** Los tubos constituyen el camino para evacuación de los gases producidos en la combustión
- **Espejos:** Son planchas circulares con perforaciones para ubicar a los tubos y al hogar.
- **Compuertas:** La función de las compuertas es cerrar el lado de fuego del caldero, también conducen a los gases de combustión por los pasos del caldero.
- **Refractario:** El refractario se coloca generalmente en la compuerta posterior del caldero, donde recibe los gases o llamas de combustión, al recibirlos los desvía y disipa evitando así el contacto con el material metálico que protege.
- **Aislamiento térmico:** Su función es minimizar el desperdicio energético producido por la transferencia de calor en el caldero. Los materiales más empleados suelen ser lana de vidrio o lana de cerámica. El material escogido se coloca en el caldero en forma de envoltura.

2.1.7.2 Quemador: El quemador es una herramienta que participa en la generación de la combustión en el hogar, está formado por:

- Suministro de aire: Compuesto a su vez por un ventilador y un difusor
 - Ventilador: Produce aire para la generación de la combustión, este aire es obtenido del ambiente y se presuriza internamente en la cámara de combustión. Posterior a esto el aire entra al hogar, el dámper de entrada es la herramienta encargada de regular la cantidad de aire que ingresa al hogar.
 - Difusor: Combina el aire que ingresa al hogar con partículas de combustible para producir la combustión deseada.
- Suministro de combustible: Consta de las siguientes partes
 - Bombas de combustible: Mediante presión entrega combustible a la boquilla

- Válvulas solenoides: Válvulas programables para regular la entrada de combustible al caldero
- Boquilla: Lugar donde se pulveriza el combustible en partículas pequeñas para combinarlas con el aire y producir la combustión.
- Encendido del quemador: Formado por el transformador de ignición, electrodos y detector de llama
 - Transformador de ignición: Fuente de alto voltaje que genera el arco eléctrico entre las puntas de los electrodos
 - Electrodos: Elementos que conducen la electricidad encargados de dar inicio a la combustión mediante la formación de un arco eléctrico.
 - Detector de llama: Sistema de seguridad formado por sensores para evitar explosiones que se puedan presentar en el proceso de generación de combustión

2.1.7.3 Tanque de almacenamiento de agua: Es el elemento principal en el sistema de alimentación de agua en el caldero, su dimensión y volumen varían dependiente del diseño y tipo de caldero. Es común que se desee tener temperaturas altas en el sistema de alimentación de agua del caldero, esto para evitar problemas como dilatación, contracción o choques térmicos, problemas que podrían ocasionar corrosión. En el tanque de almacenamiento se suele ubicar un motor para bombear el agua del reservorio.

2.1.7.4 Válvulas: Una válvula es una herramienta mecánica empleada para regular el caudal de líquidos de trabajo empleados en maquinaria, mediante su uso se puede arrancar, pausar o regular el flujo de líquidos o gases mediante el accionamiento de piezas móviles localizadas en los conductos de paso de fluidos.

- **Válvula de purga de fondo:** Se recomienda la instalación de mínimo una válvula de purga de fondo en los calderos, en una ubicación cercana al punto de acumulación de sedimentos o lodos. Dependiendo del diseño del caldero hay válvulas de purga que trabajan de manera automática controladas por temporizadores que se accionan una vez que la acumulación de sedimentos ha sobrepasado el límite de seguridad. Las más comunes son las válvulas de accionamiento manual, con una llave el operador abre el paso para la purga de sedimentos cuando sea necesario.

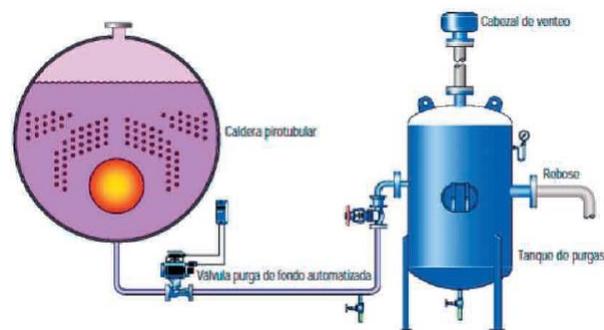


Figura 6. Válvula de purga automatizada

Fuente: (Uceda, 2012)

- **Válvula de globo:** Válvula de vueltas múltiples, su cierre se consigue mediante un disco que interrumpe el paso del fluido de trabajo, controla eficientemente la circulación del mismo.



Figura 7. Válvula de globo

Fuente: (Valmec, 2015)

- **Válvula anti retorno:** También llamadas válvulas check, o válvulas de retención, trabajan bloqueando la circulación del fluido de trabajo en un sentido, pero dejando libre el sentido contrario.



Figura 8. Válvula anti retorno

Fuente: (Valmec, 2015)

- **Válvula de compuerta:** Este tipo de válvula posee una compuerta, la cual cuando se acciona por medio de un vástago regula la circulación del fluido.



Figura 9. Válvula de compuerta

Fuente: (McWANE International , 2018)

- **Válvulas de bola:** Son válvulas dotadas internamente de una bola, el giro de la misma permite el paso del fluido, y lo impide cuando se gira 90 grados cerrando el conducto.



Figura 10. Válvula de bola

Fuente: (Swagelok, 2018)

2.1.7.5 Manómetros: Son indicadores de presión necesarios para el sistema de seguridad del caldero, donde se debe señalar la presión de trabajo y la presión máxima de diseño del caldero.

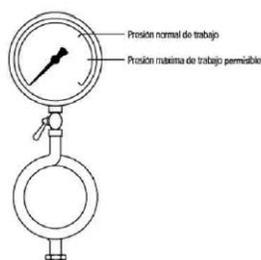


Figura 11. Manómetro para caldero tipo R

Fuente: (Uceda, 2012)

2.1.7.6 Indicador de nivel de agua: Instrumento utilizado para el control de nivel de agua del caldero, compuesto por un tubo de cristal donde se observa el nivel de agua. Los indicadores de nivel suelen sufrir daños por corrosión ocasionados por la presencia de químicos o salinidad en el agua, por ello es recomendable la instalación de protectores para el cristal de medición, siempre y cuando no dificulten la visibilidad del nivel de agua o alteren la medición real.

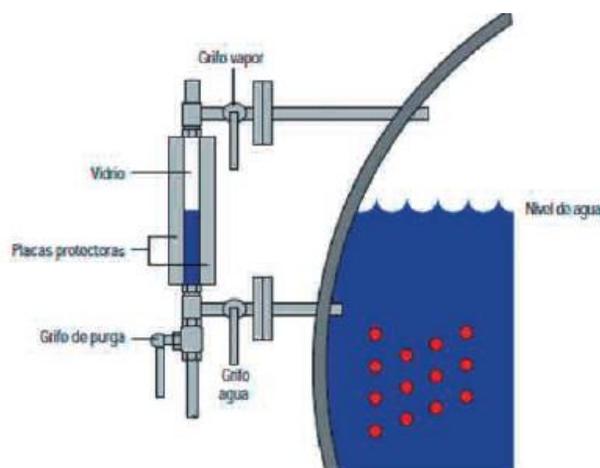


Figura 12. Visor de nivel de agua

Fuente (Uceda, 2012)

2.1.7.7 Eliminadores de aire: Cuando un caldero comienza a funcionar existe la presencia de aire en el espacio destinado al vapor, el aire mencionado tiene cierta presión la cual afectará al funcionamiento del caldero, además de que el aire puede ocasionar corrosión, por las situaciones mencionados es recomendable la eliminación del aire.

El aire puede evacuarse con una válvula manual, lo recomendable es evacuar el aire hasta tener una presión de 0.5 bar marcada en el manómetro. Como alternativa a la evacuación mediante una válvula manual existen los eliminadores de aire, los cuales funcionan sin necesidad de un operador y presentan mayor precisión para eliminar gases acumulados.

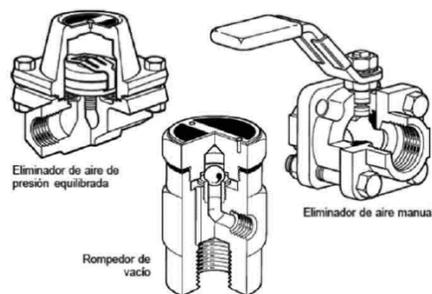


Figura 13. Eliminadores de aire

Fuente: (Uceda, 2012)

Al momento de detener el accionamiento de un caldero el aire en el espacio de vapor se condensa y posteriormente se genera un vacío. El vacío mencionado ejerce presión sobre el caldero que podría ocasionar daños estructurales en él, o peligro de sobrellenado en el caldero parado, para evitar los problemas mencionados se necesita la instalación de un rompedor de vacío.

2.1.8 Sistemas periféricos

2.1.8.1 Sistema de alimentación de agua

Este sistema periférico entrega agua, que será convertida en vapor, el mismo que finalmente será el fluido de trabajo. El sistema debe estar completamente funcional cuando el caldero requiera agua, para funcionar eficientemente.

2.1.8.2 Bomba de agua

La bomba de agua es un elemento importante en el sistema de alimentación de agua en el caldero, la bomba entrega agua al caldero, es la encargada de garantizar que se está trabajando en carga, es decir, que la altura de columna de líquido siempre será proporcional a la temperatura del fluido de trabajo, esto con el objetivo de evitar cavitación.

Generalmente los controladores de nivel del caldero activan el accionar de las bombas cuando se lo requiera.

Bomba centrífuga: La bomba centrífuga es una máquina rotativa que transforma energía impulsora a energía cinética de un fluido, este tipo de bombas incrementan la velocidad del fluido de trabajo para facilitar su transporte. El elemento principal de este tipo de bombas es su rotor también llamado rodete, este elemento se encarga de recibir energía del motor, y transferirla al fluido. Esto se logra mediante los álabes del rotor, dichos elementos empujan al fluido aumentando su velocidad y al mismo tiempo aumentando también su energía cinética, además de lo mencionado el fluido recibe fuerza centrífuga generada por las paletas, lo que incrementa su presión y la energía interna.

2.1.8.3 Ablandador de agua

El agua que se utiliza en los calderos, la mayoría de las veces proviene de una red municipal de agua potable, dependiendo del diseño y tipo del caldero de trabajo varía la calidad de agua requerida

para su funcionamiento siendo la salinidad e impurezas uno de los principales aspectos a tomar en cuenta, el ablandador de agua trabaja en mejorar la calidad de agua presente en el caldero

El ablandador de agua elimina impurezas contenidas en el agua que ingresa al caldero, el proceso mencionado se realiza mediante reacciones químicas, utilizando un equipo llamado intercambiador iónico sódico.

En el caso particular del caldero objeto del presente estudio, el agua del caldero se encuentra almacenada en un pozo, el laboratorio de conversión de energía dispone de un suavizador de agua localizado en la planta de vapor, su objetivo es suavizar el agua por medio de resina catiónica de alta capacidad, dicho elemento intercambia iones de calcio y magnesio por iones de sodio (los iones de sodio presentan mayor solubilidad en el agua), este proceso evita que los iones de calcio y magnesio se precipiten en el caldero lo que provocaría incrustaciones.

Conjuntamente con el ablandador de agua, es necesario purgar el caldero para el tratamiento de mejora de la calidad del agua. Las purgas evitan la acumulación de impurezas en el interior del caldero y los problemas que las mismas podrían ocasionar.

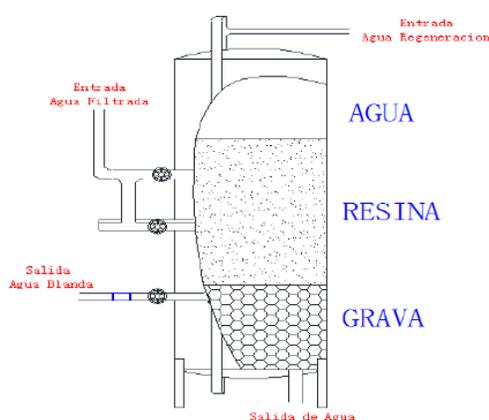


Figura 14. Esquema de ablandador de agua

Fuente (Huamancayo, 2017)

2.1.8.4 Bomba de dosificación de químicos

Los sistemas de bombas de dosificación se encargan de que los calderos funcionen bajo los parámetros, una vez que el ablandador de agua ha eliminado sales de calcio y magnesio, la inyección de químicos mediante una bomba busca eliminar gases disueltos en el agua, principalmente el oxígeno para evitar problemas de corrosión o incrustación.

La corrosión o las incrustaciones afectan al sistema de tuberías del caldero, cuando se presentan afectan a la eficiencia y su vida útil. Los sistemas de dosificación inyectan productos como fosfatos, amoníaco, y desoxigenante, estos productos buscan ajustar el ph (se busca mantener el ph del agua en un intervalo de 10.5-12), conductividad y oxígeno del sistema.

El principal elemento del sistema de dosificación es una bomba dosificadora, dicha bomba trabaja inyectando químicos en cualquier tipo de fluido. La bomba seleccionada debe estar completamente sellada por el peligro que significa trabajar con químicos

En el año 2018 los ingenieros Boris Pumisacho y Javier Ávalos realizaron el trabajo de titulación denominado "Diseño y construcción de sistemas periféricos: agua, combustible, control y gases de combustión del caldero Fulton, para suministrar vapor a equipos dependientes", para el mencionado trabajo TESQUIMSA C.A., empresa especializada en dosificación de químico para agua de alimentación de calderos asesoró a los ingenieros Pumisacho y Ávalos sobre los parámetros recomendados para el agua de alimentación del caldero Fulton del laboratorio de conversión de la energía, el presente trabajo de investigación adoptará los parámetros recomendados por TESQUIMSA C.A., en este caso para el caldero York Shipley, dado que ambos trabajan con la misma reserva de agua. Los parámetros mencionados se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1*Condiciones recomendadas para el agua de alimentación.*

Parámetro	Valor Recomendado
Dureza	0 ppm
Alcalinidad M (Hidróxidos)	500-700 ppm
Cloruros	Máximo 5 ppm
Fosfatos	30-100 ppm
Sólidos totales disueltos (TDS)	Máximo 3500 ppm
Sulfitos	25-100 ppm
Sílice	Menos de 125 ppm
Ph	10.5-12
Hierro	Menos de 5 ppm

Fuente: (Tesquimsa S.A., 2018)

2.1.8.4.1 Incrustaciones: Las incrustaciones son depósitos adheridos en el área del caldero donde se produce la transferencia de calor, especialmente en el lado del agua, se presentan por la operación del equipo con químicos fuera de las recomendaciones de funcionamiento recomendadas.

Las sales que producen las incrustaciones provienen principalmente de calcio y magnesio, es por esto que el agua empleada en los calderos debe ser tratada químicamente para eliminar su presencia antes de operar el equipo.

**Figura 15.** Incrustaciones en tubos de intercambio de calor

Fuente: (Bertomeu, 2015)

2.1.8.4.2 Corrosión: La corrosión es una reacción química que afecta a la superficie del metal del caldero. En un caldero se presenta principalmente corrosión por oxígeno (Pitting) y la corrosión cáustica.

- **Corrosión por oxígeno (Pitting):** Se produce por la reacción del oxígeno presente en el agua, al entrar en contacto con el metal de la caldera, esto ocasiona disolución de dicho metal. Su presencia se identifica por la aparición de erupciones oscuras en el metal.



Figura 16. Corrosión por oxígeno en calderos.

Fuente: (Oelker, 2018)

Este tipo de corrosión es causada por el oxígeno presente en el agua, sin embargo, si el caldero está fuera de operación el ingreso de aire a sus componentes también la podría ocasionar.

- **Corrosión cáustica:** Se presenta en zonas del caldero con elevada carga térmica, donde se concentran de manera excesiva sales alcalinas principalmente la sosa cáustica. Se forman en zonas donde se manejen altas temperaturas como el quemador o la cámara de combustión, y se presentan en forma de cavidades internas en el material



Figura 17. Corrosión cáustica

Fuente: (Oelker, 2018)

2.1.9 Sistema de alimentación de combustible

El sistema de alimentación de combustible al igual que el sistema de alimentación de agua mencionado previamente son importantes en el funcionamiento del caldero, ambos sistemas tratan mediante diferentes procesos al combustible y al agua antes de ingresar al caldero para mantener la eficiencia y prolongar la vida útil del mismo.

El sistema se encarga de entregar combustible al caldero, de manera general almacena, distribuye y dosifica el combustible en el caldero. El combustible se almacena en depósitos diarios, siendo los tanques los más empleados.

El sistema de alimentación trabaja con tres tipos de combustibles: sólidos, líquidos y gaseosos.

En los combustibles sólidos como la madera o el carbón la alimentación se puede realizar manualmente. Los combustibles sólidos como la nafta o el diésel combustionan con mayor facilidad y rapidez que los combustibles sólidos. Los combustibles gaseosos como el gas natural tienen las mejores condiciones para combustionar de los tres tipos de combustibles mencionados.

2.1.10 Tanque diario de combustible

El tanque diario de combustible, como se mencionó previamente forma parte del sistema de alimentación de combustible, en él se almacena el combustible de trabajo del caldero. Es común su construcción en acero, en el caso de ser construido con plástico se recomienda usar refuerzo de fibra de vidrio.

Los tanques de almacenamiento deben contar con las siguientes conexiones:

- Conexión de carga: Conexión abierta macho-hembra, esta conexión es el nexo con la fuente de alimentación externa de combustible y el tanque de almacenamiento
- Ventilación: Permite la salida de los gases impidiendo aumento o acumulación de presión
- Extracción: Está diseñada en función del caudal de combustible que transporta desde el tanque hacia los quemadores.



Figura 18. Tanque de almacenamiento de combustible

Fuente: Propia Autoría

La dotación de combustible desde el tanque de almacenamiento hasta los quemadores, se realiza con conexiones de tubos de acero, cobre, etc. La dotación se puede realizar por medio de diferentes sistemas:

- Aspiración directa: Se realiza con una bomba de combustible desde el tanque hacia los quemadores.
- Depósito nodriza: Se utiliza cuando se trabaja con combustibles de alta viscosidad, en este caso se suministra combustible al quemador por gravedad utilizando un segundo depósito.
- Grupo de presión: Utilizado principalmente cuando se trabaja con gasóleo. Es un sistema complejo formado por una bomba de combustible, manómetros, filtros, entre otros.

2.1.11 Bomba de alimentación de combustible

La bomba de alimentación, forma parte del sistema de alimentación de combustible, dicho sistema se encarga de entregar el combustible necesario al quemador para su posterior combustión. La bomba se encarga de transportar el combustible de trabajo por medio del sistema de tuberías del caldero, hasta llegar a los quemadores, es ahí donde el combustible transportado combustiona.



Figura 19. Bomba de alimentación de combustible

Fuente: Propia Autoría

2.1.12 Sistema de control y seguridad

El sistema de control controla y regula el funcionamiento integral del caldero y de sus sistemas, de manera general controla los parámetros siguientes:

- Encendido del quemador: Donde se verifica el nivel del agua, y la presión de trabajo en el caldero.
- Bomba de alimentación: Verificación del nivel de agua
- Válvula de seguridad: Control de la presión de trabajo del caldero

2.1.12.1 Control de agua en el caldero: El control de nivel de agua se efectúa con controles de nivel, empleando flotadores que determinan el nivel del fluido.



Figura 20. Controles de nivel por flotador

Fuente: (Venamet, 2018)

El diseño de cada caldero establece un nivel de agua para trabajar en óptimas condiciones sin la presencia de riesgo alguno. El sistema de control se encarga de activar o desactivar la bomba de alimentación en los casos que se requiera. El control por flotador consiste de una boya la cual registra el aumento o disminución de nivel del agua, esta boya actúa sobre la bomba de agua utilizando dos contactos, uno encargado de abrir y el otro se encarga de cerrar el circuito eléctrico

que está conectado a la bomba, de tal forma, si se tiene un nivel excesivo de agua se suspende su funcionamiento, y si el nivel de agua es bajo se acciona nuevamente la bomba.

2.1.12.2 Control de presión en el caldero: Cuando se genera combustión en el quemador, el caldero funciona bajo determinada presión. El sistema de control emplea un switch de control de presión, para encender o apagar el quemador en función de la presión a la que se encuentra el caldero. El rango de presión para funcionamiento seguro depende del diseño de cada caldero.



Figura 21. Switch de control de presión

Fuente: (Pumisacho & Avalos, 2018)

2.1.12.3 Control de llama en el quemador: Como se mencionó previamente el sistema de control acciona o detiene el funcionamiento del quemador dependiendo de la presión de trabajo en caso que sea necesario. Además del control mencionado, en el quemador existe otro sistema de control, este último se encarga de controlar la presencia de llama en la cámara de combustión



Figura 22. Controlador de fuego HONEYWELL

Fuente: Propia Autoría

2.1.13 Control de presión

Para el control de presión de un caldero se consideran los siguientes elementos:

2.1.13.1 Presostato: Llamado también presostato de operación, son elementos cuya función es detener el funcionamiento del caldero cuando la presión a la que se está trabajando sobrepasa el límite de presión de seguridad recomendada.

Cuando la presión excede la presión máxima de seguridad el presostato empieza a funcionar, primero el quemador se detiene hasta que la presión baje y se estabilice en el valor del diferencial del caldero, posteriormente el caldero entra en funcionamiento nuevamente.



Figura 23. Presostato de operación

Fuente: Propia Autoría

En caso de que falle el presostato de operación, entra en funcionamiento el presostato de alta presión, este elemento igualmente detiene el funcionamiento del quemador cuando se ha sobrepasado el valor de presión recomendada.

2.1.13.2 Transductor de presión: Básicamente son sensores de presión, cuya función es recibir el valor de presión de un sistema de aire y convertir dicho valor en señal eléctrica para transmitirlo a otro elemento del sistema de control de presión y realizar acciones correctivas o emergentes en caso de que el caldero sobrepase los valores de presión de seguridad recomendados.

2.1.13.3 Válvula de seguridad: Conocida también como válvula de alivio de presión su función es evacuar el fluido de trabajo para evitar que no sobrepase la presión de seguridad recomendada.

2.1.14 Control de nivel de agua

El control de nivel de agua funciona con el visor de nivel McDonell and Miller, dicho visor controla los niveles máximo y mínimo de agua, para evitar problemas del funcionamiento que pudieran presentarse en las condiciones mencionadas. En caso que el nivel de agua se encuentre por debajo del mínimo del recomendado el quemador se apaga, y en el caso de que el nivel de agua sobrepasa el nivel máximo de agua el controlador envía una señal para detener el accionamiento de la bomba de agua e impedir el ingreso de agua al caldero.



Figura 24. Control McDonell and Miller

Fuente: Propia Autoría

2.1.15 Sistema de evacuación de gases

La evacuación de los gases de combustión es un aspecto importante en el funcionamiento del caldero. El principal elemento para el sistema de evacuación de los gases es la chimenea, esta será la vía de salida de los gases hacia el exterior.

2.1.15.1 Chimenea del caldero:



Figura 25. Chimenea del caldero York Shipley

Fuente: Propia Autoría

La chimenea está constituida por un ducto de sección cuadrada, que recibe los gases producidos en la combustión, y los evacúa por un segundo ducto con salida hacia el exterior

2.1.15.2 Termómetro de la chimenea: El termómetro de la chimenea indica la temperatura de salida de los gases de combustión, además es un indicador de cuan eficiente está siendo el caldero por la transferencia de calor hacia el lado de agua, en caso de presentarse baja eficiencia, esta es señal de la necesidad de mantenimiento al caldero

2.1.16 Mantenimiento preventivo

De manera general, el mantenimiento preventivo busca mantener funcional el equipo de trabajo evitando paros o averías, además busca conservar y prolongar la vida útil del equipo funcionando con mínima tasa de contaminación. El plan de mantenimiento preventivo (PMP) contempla la aplicación de acciones diarias, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales o anuales, dependiendo de la frecuencia de uso de la maquinaria y del tipo de trabajo que se realice en ella.

2.1.17 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se realiza de manera eventual y a diferencia del mantenimiento preventivo no tiene un plan de ejecución, se suele realizar cuando se presenten daños o averías que ocasionen cese de operaciones en el equipo.

En el caso de los calderos, el diseño de un correcto y eficiente plan de mantenimiento preventivo minimizará la necesidad de mantenimiento correctivo.

2.1.18 Eficiencia del caldero

La eficiencia de un caldero se puede expresar como la razón entre el calor absorbido y el calor liberado en el equipo. Las pérdidas se pueden cuantificar con la diferencia entre el calor liberado y el calor absorbido.

En las diferentes industrias donde son empleados los calderos, su uso prolongado significa elevada cantidad de combustible, energía y mano de obra en su funcionamiento, por tal motivo a mayor eficiencia mayor aprovechamiento de recursos económicos, energéticos y mano de obra.

Las pérdidas que pueden presentarse en el caldero afectan a su eficiencia, y en la mayoría de veces pueden producirse en la transferencia de calor, en purga del equipo, trabajo insuficiente de las bombas etc. Generalmente se presentan pérdidas entre el 4%-5%

Para el cálculo matemático de la eficiencia se puede aplicar el método directo y el método indirecto.

- Método directo: Para el cálculo por este método se expresa la eficiencia como una relación entre la energía que ingresa al sistema, la energía que se utiliza para generar vapor y la energía suministrada por el combustible, la expresión matemática es la siguiente:

$$n = \frac{\text{Calor que sale con el vapor producido}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \quad (1)$$

- Método indirecto: Para el cálculo de este método se utilizan las pérdidas producidas en el sistema.

$$n = (100 - \text{pérdidas})\% \quad (2)$$

2.1.19 Funcionamiento del caldero

El caldero York Shipley serie 300 con capacidad de 30 BHP funciona a una presión máxima de 150 psig, de sección vertical es considerado caldero pirotubular a pesar de no tener tubos internos para la circulación de los gases de combustión.

Su estructura interna es un encamisado recuperador de calor.

- La primera etapa los gases de combustión se encuentran en el hogar, es aquí donde se produce la mayor transferencia de calor al impedir el flujo acelerado por 4 orificios de 2 pulgadas, ubicados en la parte inferior.
- La segunda etapa los gases de combustión rodean al recipiente a presión por el exterior aportando una cantidad de energía al pasar por las aletas y paralelamente aporta energía al tanque de condensado que se ubica internamente

El tanque de condensado es alimentado desde un pozo a una temperatura ambiente de 25 grados centígrados, la diferencia de temperatura entre ellos es tal que resulta muy peligroso la alimentación

directa. Por sugerencia del fabricante la temperatura recomendada varía entre 90 y 95 grados centígrados.

Los gases antes de ser evacuados al ambiente pasan por las paredes del tanque de condensado, calentándolo para que su alimentación al caldero no requiera un ΔT muy amplio. En general los tanques de condensado se ubican en la parte exterior del caldero, y para ser calentados se necesita una adaptación de la línea de vapor de recirculación. El vapor de retorno al tanque debe circular por un filtro de limpieza de impurezas.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS PRIMARIO Y DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CALDERO

3.1 Evaluación actual del caldero

Para establecer la valoración del caldero YORK SHIPLEY VTB SERIE 300 de 30 HP en su estado inicial se realizó un levantamiento de información para su análisis y evaluación, basándonos en manuales y guías del fabricante se logró establecer los parámetros en los cuales el caldero garantiza una confiabilidad de operación.

Tanto la eficiencia del caldero, prueba hidrostática antes, como después de su mantenimiento correctivo, la inspección visual del estado físico y sus sistemas periféricos son características principales que evalúa su condición.

3.1.1 Inspección visual

En la inspección visual se hace referencia a todos los componentes que tiene el caldero y sus dispositivos periféricos, tales como:

- Quemador
- Lado de agua
- Lado de fuego
- Control de nivel de agua del caldero
- Tanque de condensado

3.1.1.1 Quemador

Para la inspección visual del quemador se desmontaron, y desarmaron todos los componentes para su verificación. El quemador posee un su cámara de ignición, 1 tobera que se utiliza para atomizar el combustible y 2 electrodos que crean la chispa de ignición. Se verifica que la bomba

de alimentación de combustible tenga la presión adecuada y que el filtro se encuentre limpio, las electroválvulas utilizadas para detener o dar paso al combustible.



Figura 26. Quemador Power Flame

Fuente: Propia Autoría

En el quemador mediante inspección visual se verificó el estado en el que se encontraban los elementos que conforman el quemador, tales como:

- Bomba de combustible NO-OK
- Tobera NO-OK
- Electroodos NO-OK
- Transformador OK
- Pistón NO-OK
- Solenoides NO-OK
- Motor OK
- Panel de control OK

Realizando una ponderación cualitativa de los elementos 3 OK para los dispositivos que estén operando y 5 NOK para los que no o estén en malas condiciones. El 62.5% estaba en mal estado o inoperativo.

3.1.1.2 Detalle del estado del quemador.

La bomba de combustible se encarga de alimentar y transportar el combustible hasta la tobera para que se produzca la atomización. Tiene una presión de operación de 80 psi, internamente la bomba tiene un filtro que absorbe todas las impurezas que son transportadas a través de la línea desde el reservorio de combustible hasta el quemador, siendo así el filtro debe ser cambiado cada 3000 horas de uso según la recomendación de mantenimiento anual de un caldero.

El filtro se encontraba deteriorado con una capa gruesa de impurezas impidiendo en gran parte el paso del combustible. En la sección del eje, existe un Oring que impide la fuga de combustible al eje, dicho elemento se encontró desgastado.

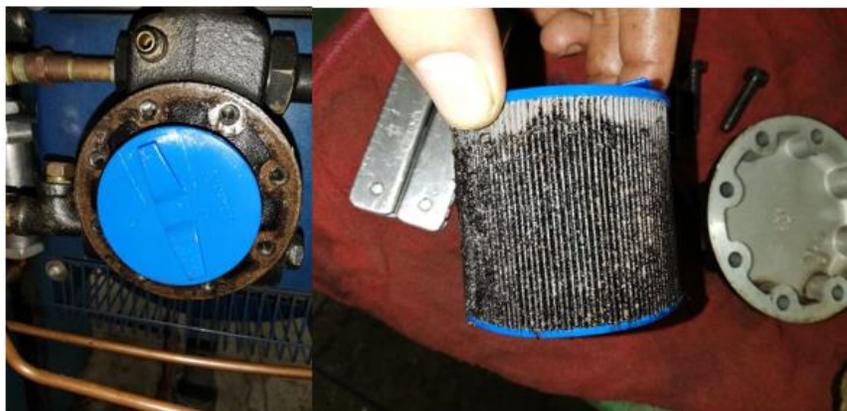


Figura 27. Filtro bomba combustible

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.3 Tobera

La tobera también llamada boquilla de atomización, es un elemento del quemador que sirve para atomizar el combustible, teniendo dos características fundamentales.

- El galonaje por hora de combustible
- El grado con el que la flama se expande

Estas dos características se seleccionan dependiendo de la capacidad del caldero (BHP) y el tamaño del hogar (detallado a continuación). Con una vida útil determinada dependiendo del número de horas trabajadas se procede a su reemplazo.

Las impurezas transportadas por el combustible llegan hacia la tobera que posee un filtro que con el paso del tiempo llega a obstaculizar el orificio de la tobera que varía entre 0.5mm y 4mm llegando a presurizar la línea.

El orificio de la tobera se encontraba obstaculizado en su totalidad impidiendo la quema del combustible.



Figura 28. Tobera

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.4 Electrodo

Los electrodos están a una distancia determinada de la tobera en forma triangular, el transformador envía aproximadamente 10000 voltios a los electrodos formando un arco voltaico.

Los electrodos presentaban acumulación de hollín en toda su extensión y agrietamiento en la cerámica que sirve como aislante.



Figura 29. Electrodo

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.5 Solenoide de tres vías

La válvula solenoide de tres vías en el quemador distribuye el combustible tanto a la tobera como al pistón. Cuando se tiene llama baja el solenoide envía combustible solo por una vía directo a la tobera, cuando cambia de llama baja a llama alta se activa la segunda vía que envía combustible al pistón, al desplazarse hacia arriba eleva la plaqueta permitiendo el ingreso de más aire a la cámara de combustión. El solenoide se encontraba inoperativo, por tal razón fue reemplazado por una unidad nueva.



Figura 30. Solenoide de tres vías

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.6 Pistón

El pistón hidráulico tiene como medio de fluido el combustible, cumple la función de levantar y bajar la plaqueta que permite el ingreso de aire a la cámara de combustión. El pistón se encontraba inoperativo.



Figura 31. Pistón

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.7 Lado de Agua

Para proceder a realizar la inspección visual del lado de agua del caldero los únicos accesos permitidos son cuatro hand-hole.

- Dos en la parte frontal

- Dos en la parte posterior

Como primera instancia las empaquetaduras se encontraban cristalizadas producto de las altas temperaturas a las que son expuestas.



Figura 32. Hand hole

Fuente: Propia Autoría

Para el desmontaje de las 4 hand hole se utiliza una llave hexagonal de 1 ¼, teniendo precaución que no se caiga la tapa a la parte interna del caldero, se retira la empaquetadura de caucho de dimensiones 3 ½ x 4 ½ x ½. Una vez desarmado, en las partes internas de la pared se pudo encontrar óxido y sedimentación a causa del agua que proviene de un pozo, no se encontró incrustaciones de mayor preocupación o que pueda afectar seriamente al caldero.



Figura 33. Parte interna del caldero del lado de agua

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.8 Lado de fuego

La inspección visual se realiza retirando el quemador y las tapas empernadas que se encuentran en las partes laterales teniendo acceso a los ductos de evacuación de gases.



Figura 34. Salida de gases de combustión

Fuente: Propia Autoría

Siendo la combustión una oxidación rápida del combustible, formado de carbono (C), hidrogeno (H) y azufre (S), en algunos casos, dependiendo de la composición del combustible. En teoría al combustionar una mezcla de aire y combustible se debería quemar al 100%, pero cuando existe una mala calibración, las partículas no quemadas se adhieren a las paredes del hogar y a las vías de salida de los gases de combustión formando una capa gruesa de hollín.

Tanto en la cámara de combustión como en los ductos de salida de gases se pudo detectar una capa de hollín y suciedad a causa de la mala combustión. Esto impide una buena eficiencia en el caldero por pérdidas de calor.

Las tapas laterales que permiten el acceso al mantenimiento están sujetadas por pernos y para un aislamiento con el exterior son sellados con fibra de vidrio. En la inspección visual se observó que los pernos estaban en su totalidad oxidados y el aislamiento deteriorado por lo que se procedió a reemplazarlos utilizando soldadura.



Figura 35. Reemplazo de los pernos de sujeción de las tapas móviles del lado de fuego

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.9 Ducto de salida de gases de combustión

El ducto de evacuación de gases de sección cuadrada, se encontraba acoplado al caldero y al súper calentador que funcionaba como parte de un ciclo Rankine, en el exterior del ducto se encontraba acoplado un ventilador que forzaba la salida de los gases de combustión hacia el exterior.

Por falta de mantenimiento al ventilador y la exposición constante a vientos, lluvias y sol su función dejó de ser necesaria. Al no existir el tiro forzado los gases tenían ahora dos vías de escape por lo que se procedió a retirar el ventilador obsoleto y corregir el ducto para tener una sola vía de escape.



Figura 36. Ducto de salida de gases de combustión, acoplado con ventilador

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.10 Control de nivel de agua del caldero

Se realizó la inspección visual del control de nivel de agua marca Mc Donnell and Miller, sus funciones son: el control del nivel del agua, accionamiento y apagado de la bomba de alimentación y el quemador. Se procedió a retirar los pernos que dan acceso a la parte interna del control de nivel de agua, dentro de este se encuentra la válvula de flotador.

Los elementos del control de nivel de agua son:

- Válvulas de purga utilizadas para la toma de muestras de agua
- Visor de nivel de agua
- Válvula de flotador



Figura 37. Válvula de flotador

Fuente: Propia Autoría

Al haber realizado la inspección visual se detectó acumulación de sedimentación y oxido en la válvula de flotador y en todo el interior del control de nivel de agua, las válvulas de purga no funcionaban correctamente y el visor de agua tenia filtración producto del desgaste de los Oring por lo que se realizó una limpieza y reemplazos de dichos elementos.

Se verifico que los switch estén operando correctamente y enviando la señal necesaria para que cumpla con el control de seguridad ya que este es el responsable de encendido y apagado de la bomba y quemador.



Figura 38. Controlador del Mc Donnell and Miller

Fuente: Propia Autoría

3.1.1.11 Tanque de condensado

En este modelo específico el tanque de condensado se ubica internamente como parte del cuerpo del caldero con el fin de mejorar la eficiencia y ahorro de combustible, diseñado para espacios reducidos. Los gases de combustión al pasar por el hogar se dirigen hacia la parte inferior del mismo, saliendo por los ductos que comparten espacio con el tanque de condensado aprovechando la temperatura de los gases y calentando el agua para que, al ser transportados por la bomba, el quemador no requiera estar prendido mucho tiempo para que el caldero llegue a la presión de operación deseada de manera rápida.



Figura 39. Tanque de condensado

Fuente: Propia Autoría

En la inspección visual del tanque de condensado se procedió a retirar la tapa sujeta por pernos que presentaba oxidación tanto en la tapa como en los pernos. En la parte interna del recipiente presentaba oxidación y sedimentación. En las paredes no se encontraron anomalías. La válvula de flotador presentaba oxidación en todo su sistema mecánico por lo que procedió a reemplazarla por una de acero inoxidable.



Figura 40. Tapa del tanque de condensado

Fuente: Propia Autoría

3.1.2 Cálculo de la eficiencia en el estado actual del caldero

Antes de iniciar las tareas de mantenimiento correctivo en el caldero, se realizó un análisis de gases de combustión con equipos facilitados por la empresa Retena, los resultados del análisis se muestran en la tabla 2

Tabla 2

Análisis de gases de combustión en las condiciones iniciales del caldero

ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN	
O_2	8.4%
CO	64 ppm
Eff	85.1 %
CO_2	9.3 %
T-STK	196 °C
T-AIR	34.5 °C
EA	62.4 %
CO(15)	30 ppm

Para determinar la eficiencia del caldero es necesario conocer previamente las pérdidas generadas en el proceso de combustión, las pérdidas mencionadas son ocasionadas por:

3.1.2.1 Agua procedente de la combustión del hidrógeno

El combustible de trabajo tiene hidrógeno, que al momento de la combustión se transforma en agua, posteriormente sale del caldero como vapor. Para el cálculo del calor perdido 1 (Q_{p1}) y los siguientes, se utilizarán las ecuaciones del manual de consulta de sistemas integrales de vapor de Clayton:

$$Q_{p1} = 9H_2(h_g - h_f) \quad (3)$$

Dónde:

Q_{p1} : Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

H_2 : Peso de hidrógeno por kilogramo de combustible quemado (Kg)

h_g : Entalpía de vapor a la temperatura de los gases de combustión en la chimenea del caldero a una presión de 0.07 Kg/cm² (KJ/Kg)

h_f : Entalpía del agua a la temperatura de entrada del combustible (KJ/Kg). (El combustible ingresa al caldero a 35 °C.)

$H_2 =$ Por cada kilogramo de diésel combustionado existe 15% de hidrógeno

Como se puede ver en la tabla 2 antes de las labores de mantenimiento la temperatura de los gases de combustión en la chimenea (T-STK), era 196 °C

$h_g = 2871.97$ KJ/Kg, a 196 °C y 0.07 Kg/cm² de presión

$h_f = 146.645$ KJ/Kg a 35 °C

$$Q_{p1} = 9 * \frac{15}{100} * (686.088 - 35.032)$$

$$Q_{p1} = 3679.19 \frac{KJ}{Kg}$$

3.1.2.2 Humedad en el aire

Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{p2} = 0.46 * m_{as} * m_v * (T_g - T_a) \quad (4)$$

Dónde:

Q_{p2} : Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

m_{as} : Peso de aire seco empleado por cada kilogramo de combustible

m_v : Porcentaje de saturación multiplicado por el peso de vapor de agua requerido para saturar 1 Kg de aire.

T_g : Temperatura de los gases de combustión a la salida del caldero. Como se mencionó previamente T_g corresponde a T-STK (196 °C)

T_a : Temperatura del aire a la entrada del hogar del caldero. Mediante medición en las pruebas de operación se estableció que el aire entra al caldero a 24°C

0.46: Calor específico medio del calor de agua desde T_g hasta T_a

El peso de aire seco por kilogramo de combustible se calcula con la siguiente ecuación (Tomada del Manual de consulta de sistemas integrales de vapor de Clayton)

$$m_{as} = (1 + X) \left[11.5C + 34.5 \left(H - \frac{1}{8}O \right) + 4.32S \right] \quad (5)$$

X representa el exceso de aire, dicho valor se encuentra en el análisis de gases de combustión mostrado previamente, para este caso es 62.4% = 0.624 (Ver tabla2)

El manual de consulta de sistemas integrales de vapor de Clayton, sugiere para este cálculo el uso de 85% para carbono y 15% para hidrógeno.

EP - PETROECUADOR INFORME DE RESULTADOS							
Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con ACREDITACION No. QAE LE C14-012 2014-11-28							
GERENCIA:	GERENCIA DE TRANSPORTE	REFERENCIA:	PARTIDAM229.POLE-0				
ORGANIZACION:	T06_TERMINAL BEATERO	PRODUCTO ANALIZADO:	DIESEL PREMIUM				
INFORME NO.:	T06-102-OP-2019	COGNO MUESTRA:	678-2019				
DATOS CLIENTE							
NOMBRE:	JEFE TERMINAL BEATERO						
DIRECCION:	AV. El Beatero, S/N y Pedro Vicente Maldonado.						
TELEFONO:	1940300 Extension 20700						
SOLICITADO POR:	ING. EDWIN AGUIRRE						
DATOS DE LA MUESTRA							
ORDEN DE LA MUESTRA:	T06_TQ_1022	HORA TOMA DE MUESTRA:	08:18:55				
FECHA DE TOMA DE MUESTRA:	20190620						
CANTIDAD DE MUESTRA:	1 L						
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA:	20190620	HORA DE RECEPCION DE MUESTRA:	06:29:33				
LUGAR TOMA DE MUESTRA:	TB1022	PUNTO DE MUESTREO:	BOCA DE AFORO				
DATOS DE ANALISIS							
TEMPERATURA AMBIENTE:	19.1 °C						
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE:	46.3 %RH	PRESION BAROMETRICA:	72.0 kPa				
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS:	20190620 06:29:35	FECHA FINALIZACION DE LOS ENSAYOS:	20190620 18:18:55				
FECHA DE EMISION DEL INFORME:	20190620						
RESULTADOS							
PARAMETRO	METODO		ESPECIFICACION		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	LÍMITE
	ASTM (INEN)	INTERNO	MIN.	MAX.			
PUNTO DE INFLAMACION	ASTM D93 NTE INEN 1493	V05.02.04.FE.01	51.0	N/A	72.5	°C	≥4.12%
CONTENIDO DE AGUA Y SEDIMENTO	ASTM D1709			0.05	0.01	%M	
RESIDUO CARBONOSO SOBRE EL 10% DEL RESIDUO DE DESTILACION	ASTM D189 NTE INEN 1491		N/A	0.15	0.010	%P	
CONTENIDO DE CENIZAS	ASTM D482 NTE INEN 1490		N/A	0.010	0.001	%P	
IGNIT. 100°	ASTM D96 NTE INEN 806		REPORTE	REPORTE	229	°C	
IGNIT. 300°	ASTM D96 NTE INEN 806		REPORTE	REPORTE	263	°C	
IGNIT. 500°	ASTM D96 NTE INEN 806		REPORTE	REPORTE	343	°C	
INCOMPATIBILIDAD ORGANICA A 60 °C	ASTM D2445 NTE INEN 840	V05.02.04.FE.03	2.0	0.0	3.86	ppm	≤6.0
CONTENIDO DE AZUFRE	ASTM D4294			500	81	ppm	
CONFORMIDAD A LA LAMINA DE COBRE - 30.300°	ASTM D152 NTE INEN 967		N/A	3	1.8		
INDICE DE CETANO CALCULADO	ASTM D295 NTE INEN 1495		45	N/A	51.0		
BRANDAJE RELATIVO 8000 °F (15.8 °C)	ASTM D1298 NTE INEN 2003		REPORTE	REPORTE	0.8463		
BRANDAJE API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D283	V05.02.04.FE.04	REPORTE	REPORTE	35.3	°API	≥2.98%
BRANDAJE API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298 NTE INEN 2003		REPORTE	REPORTE	35.3	°API	
API OBSERVADO: 36.1							
TEMPERATURA OBSERVADA: 10F							
OBSERVACIONES:							

Figura 41. Análisis de laboratorio de Diésel de la Ep. Petroecuador

Fuente: Agencia de Regulación y control Hidrocarburífero ARCH

Mediante un informe de análisis de laboratorio de la Ep Petroecuador con fecha 20 de junio de 2019 (Ver Figura 41), proporcionado por la agencia de regulación y control Hidrocarburífero ARCH, se pudo conocer que el azufre está presente en el Diésel en una cantidad de 81 partes por millón.

Sustituyendo los valores mencionados en la ecuación 5, se tiene:

$$m_{as} = (1 + 0.624)[11.5(0.85) + 34.5(0.15) + 4.32(0.000081)]$$

$$m_{as} = 24.28 \frac{Kcal}{Kg}$$

Reemplazando valores en la ecuación 4:

$$Qp2 = 0.46 * 24.28 * (0.7 * 0.01847) * (196 - 24)$$

$$Qp2 = 24.83 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$Qp2 = 103.94 \frac{KJ}{Kg}$$

3.1.2.3 Gases secos de la chimenea:

Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Qp3 = m_{gs} * Cp_{gs} * (T_g - T_a) \quad (6)$$

Dónde:

$Qp3$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

m_{gs} : Peso de los gases secos a la salida del caldero en Kg por Kg de combustible quemado

Cp_{gs} : Calor específico medio de los gases secos (valor aproximado=0.24)

El peso de los gases secos se puede determinar:

$$m_{gs} = \%Cf \left(\frac{4CO_2 + O_2 + 700}{3(CO_2 + CO)} \right) \quad (7)$$

Mediante el análisis de gases de combustión (tabla 2) se tienen los siguientes valores:

$$CO = 64 \text{ ppm}$$

$$O_2 = 8.4 \%$$

$$CO_2 = 9.3\%$$

$$m_{gs} = 0.85 \left(\frac{4(9.3) + 8.4 + 700}{3(9.3 + 0.064)} \right)$$

$$m_{gs} = 22.56 \frac{kg}{kg \text{ de comb}}$$

$$Qp3 = 22.56 * 0.24 * (196 - 24)$$

$$Qp3 = 931.28 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Qp3 = 3898.34 \frac{KJ}{Kg}$$

3.1.2.4 Combustión incompleta:

Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Qp4 = \left(\frac{CO}{CO_2 + CO} \right) * 5689.6 * C1 \quad (8)$$

Donde:

$Qp4$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

CO : Porcentaje de monóxido de carbono obtenido en el análisis de gases de combustión.

CO_2 : Porcentaje de dióxido de carbono obtenido en el análisis de gases de combustión

$C1$: Peso de carbono combustionado por kilogramo de combustible

$$Qp4 = \left(\frac{0.064}{9.3 + 0.064} \right) * 5689.6 * 0.85$$

$$Qp4 = 33.06 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Qp4 = 138.42 \frac{KJ}{Kg}$$

3.1.2.5 Pérdidas por radiación:

La cámara de combustión posee una capa de cemento refractario a su alrededor, el cual impide una transferencia de calor acelerada. Al ser cilindros concéntricos de diferentes materiales se

establece un análisis de conductividad térmica de conducción, convección y radiación por Resistencia térmica, el esquema de la cámara de combustión se observa en la figura 42.

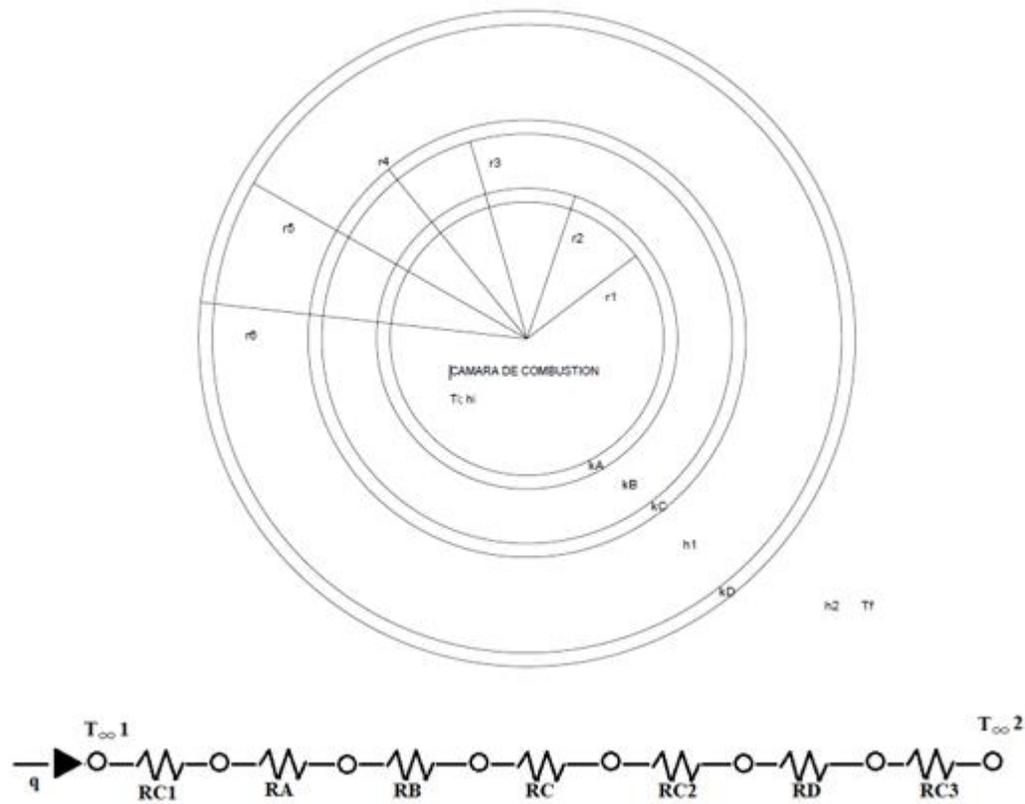


Figura 42. Diagrama de conductividad térmica por resistencias

Fuente: Propia autoría

Siendo:

- $RC1$ = Resistencia por convección de los gases de combustión
- RA = Resistencia por conducción de la lámina de acero
- RB = Resistencia por conducción del cemento refractario
- RC = Resistencia por conducción de la lámina de acero
- $RC2$ = Resistencia por convección del agua

- RD= Resistencia por conducción de la chapa de acero
- RC3= Resistencia por convección del ambiente
- **Cálculo de convección por gases de combustión**

$$h_{DIESEL} = 25 \frac{w}{m^2 K}$$

$$L = 1.80 \text{ m.}$$

$$r = 0.5 \text{ m.}$$

$$RC = \frac{1}{2\pi r L h} \quad (9)$$

$$RC1 = \frac{1}{2\pi r L h1}$$

$$RC1 = \frac{1}{2 * \pi * 0.5m * 1.80m * 25 \frac{w}{m^2 K}}$$

$$RC1 = 7.07 * 10^{-3} \frac{^{\circ}C}{w}$$

- **Cálculo de conducción de la lámina de acero**

$$K_{Acero} = 50.2 \frac{w}{m K}$$

$$L = 1.80 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.5127 \text{ m}$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K L} \quad (10)$$

$$RA = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_{Acero} L}$$

$$RA = \frac{\ln\left(\frac{0.5127}{0.5}\right)}{2 * \pi * 50.2 \frac{W}{m K} * 1.80m}$$

$$RA = 4.41 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Cálculo de conducción del cemento refractario**

$$K_{Cemento r.} = 0.76 \frac{W}{m K}$$

$$Espesor = 3in = 0.0762 m$$

$$r_3 = 0.5889 m$$

$$L = 1.80 m$$

$$RB = \frac{\ln\left(\frac{0.5589}{0.5127}\right)}{2 * \pi * 0.0762 \frac{W}{m K} * 1.80 m}$$

$$RB = 0.016 \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Cálculo de conducción de la lámina de acero**

$$K_{Acero} = 50.2 \frac{W}{m K}$$

$$r = 0.6016 m$$

$$L = 1.80 m$$

$$RC = \frac{\ln\left(\frac{0.6016}{0.5889}\right)}{2 * \pi * 50.2 \frac{W}{m K} * 1.80 m}$$

$$RC = 3.758 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Cálculo de convección del agua**

$$h_{AGUA} = 31500 \frac{W}{m^2 K}$$

$$L = 2.24 \text{ m}$$

$$r = 1.3 \text{ m}$$

$$RC2 = \frac{1}{2 * \pi * 1.3 \text{ m} * 2.24 \text{ m} * 31500 \frac{W}{m^2 K}}$$

$$RC2 = 1.74 * 10^{-6} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Cálculo de conducción de la chapa de acero**

$$L = 2.24 \text{ m}$$

$$r = 1.3 \text{ m}$$

$$K = 50.2 \frac{W}{m K}$$

$$RD = \frac{\ln\left(\frac{1.3127}{1.3}\right)}{2 * \pi * 50.2 \frac{W}{m K} * 2.24 \text{ m}}$$

$$RD = 1.375 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Sumatoria de las resistencias calculadas:**

$$R_T = 7.07 * 10^{-3} \frac{^{\circ}C}{W} + 4.41 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W} + 0.016 \frac{^{\circ}C}{W} + 3.758 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W} + 1.74 * 10^{-6} \frac{^{\circ}C}{W} + 1.375 * 10^{-5} \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_T = 0.023 \frac{^{\circ}C}{W}$$

- **Cantidad de calor transmitido entre T₂(gases de combustión) y T₁(gases en la chimenea)**

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_T}$$

$$q = \frac{650^\circ\text{C} - 196^\circ\text{C}}{0.023 \frac{^\circ\text{C}}{\text{w}}}$$

$$q = 19739,15 \text{ w}$$

- **Pérdidas por convección y por radiación:**

Convección:

Fluido: gases de combustión

$$h_{\text{gases de combustión}} = 25 \frac{\text{w}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$D = 2.6254 \text{ m}$$

$$L = 2.24 \text{ m}$$

Temperatura de superficie de las paredes: 160.153 °C

Temperatura ambiente (T_∞): 196 °C

Temperatura del alrededor (T_{alr}): 90 °C

$$A = \pi * D * L$$

$$A = \pi * 2.6254\text{m} * 2.24\text{m}$$

$$A = 18.47 \text{ m}^2$$

$$q = h_{\text{gases de combustión}} * A * (T_S - T_\infty)$$

$$q = 25 \frac{\text{w}}{\text{m}^2\text{K}} * 18.47 \text{ m}^2 * (433.15 - 469)\text{K}$$

$$q = -9931.41 \text{ w}$$

- **Radiación:**

Radiación teórica:

$$q = \varepsilon * A * \sigma * (Ts^4 - Talr^4)$$

$$q = 0.8 * 18.47 \text{ m}^2 * 5.67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} * (433.15^4 - 363^4)\text{K}^4$$

$$q = 14945.3 \text{ w}$$

Radiación experimental:

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (Ts + Talr) * (Ts^4 - Talr^4)$$

$$h_r = 0.8 * 5.67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} * (433.15 + 363) * (433.15^2 + 363^2)$$

$$h_r = 11.53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$q_r = h_r(Ts - Talr) * A$$

$$q_r = 11.53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} (433.15 - 363)\text{K} * 18.47 \text{ m}^2$$

$$q_r = 14939.71 \text{ w} = 14.9 \text{ KW}$$

- **Potencia emisiva**

El cálculo de la potencia emisiva permite determinar la cantidad de radiación emitida por el cuerpo.

Para dicho cálculo es necesario considerar la emisividad, que es una relación entre la radiación que emite un cuerpo y la que recibe de su alrededor, en el caso del cuerpo negro la emisividad tiene un valor de 1, debido a que la energía que emite es la misma a la que recibe. Para el caldero el manual de Clayton recomienda un valor de 0.8:

$$E = \varepsilon * \sigma * T_s^4 * A$$

$$E = 0.8 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * 433.15^4 K^4 * 18.47 m^2$$

$$E = 294920 w$$

Sabiendo que:

$$1 BHP = 9.8 KW$$

Entonces:

$$14.9 KW = 1.52 BHP$$

En el capítulo VI, se determina que el consumo de combustible es 25.02 kg comb/hr, tomando dicha ecuación:

$$C_{combustible} = \frac{\varphi BHP * 8434.65 kcal/hr}{PCI}$$

Reemplazando el consumo de combustible, y los BHP producidos por Qp5 se tiene:

$$25.02 \frac{kg \text{ comb}}{hr} = \frac{1.52 BHP * 8434.65 kcal/hr}{Qp5}$$

$$Qp5 = 512.56 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Qp5 = 2145.56 \frac{Kj}{Kg}$$

Aplicando sumatoria de las pérdidas calculadas:

$$\sum P = 3679.19 + 103.94 + 3898.34 + 138.42 + 2145.56$$

$$\sum P = 9965.45 \frac{KJ}{Kg}$$

El poder calorífico del diésel empleado en el caldero es de 43292 KJ/Kg, tomando a dicha cantidad como el 100%, los 9965.45 KJ/kg representan el 23.01 %, entonces la eficiencia inicial del caldero es:

$$Eficiencia\ inicial = 100 - 23.01$$

$$Eficiencia\ inicial = 76.98 \%$$

CAPÍTULO IV

PLAN DE MANTENIMIENTO

En el presente capítulo se detallarán las acciones de mantenimiento correctivas realizadas en el caldero, como se mencionó en el Capítulo I el caldero no funcionaba de manera segura por la falta de mantenimiento a lo largo de los últimos años, ocasionando que su operación sea peligrosa para docentes y alumnos, es por esto que, en primera instancia el mantenimiento correctivo al caldero fue el primer objetivo del presente trabajo.

Una vez restaurado completamente el caldero, con sus diferentes sistemas operando sin inconvenientes, se propondrá un plan de mantenimiento preventivo (PMP), detallando en él las diferentes labores de mantenimiento necesarias para el correcto funcionamiento del equipo.

4.1 Detección de defectos

4.1.1 Lado de fuego:

La falta de mantenimiento por prologando periodo de tiempo causó una capa de hollín solidificado en la cámara de combustión y en los ductos de fuego, lo que no permitía una buena transferencia de calor además de contaminar los gases de combustión.

Es importante mencionar que para esta y para las demás acciones de mantenimiento, por motivos de seguridad del personal que trabaje en el caldero, es necesario que el equipo se encuentre apagado y fuera de servicio por lo menos 48 horas antes de cualquier trabajo que se realice en él.

Las acciones realizadas en el lado de fuego se detallan en la tabla 3.

Tabla 3*Acciones de mantenimiento correctivo en el lado de fuego.*

ELEMENTO	ACCIONES REALIZADAS	DETALLES
Cámara de combustión	Limpieza de las paredes, remoción de hollín sólido en los tubos de evacuación de gases, remoción de óxido, cambio de empaquetaduras.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el caldero se encuentre apagado con 2 días de anticipación 2. Verificar que la presión se encuentre por debajo de 1 bar (Aproximadamente 1 atm) 3. Retirar el quemador 4. Limpieza de la cámara de combustión.
Ductos de fuego	Limpieza de los ductos de fuego, remoción de hollín sólido, reparación de la tapa del ducto, soldadura de los pernos de sujeción de la tapa del ducto, cambio de empaquetaduras y limpieza de óxido.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el caldero se encuentre apagado con 2 días de anticipación 2. Remoción de las tapa externas izquierda y derecha 3. Retirar los pernos de las tapas 4. Retirar la tapa 5. Limpieza y reparación

4.1.2 Lado de agua

En el lado de agua se realizó una limpieza de sus componentes, al igual que en el lado de fuego, la falta de mantenimiento provocó acumulación de suciedad y en el caso del tanque de condensado

los pernos de sujeción se encontraban oxidados y rotos, los mismos fueron reemplazados. Las acciones realizadas se detallan en la tabla 4.

Tabla 4

Acciones de mantenimiento correctivo en el lado de agua

ELEMENTO	ACCIONES REALIZADAS	DETALLES
Tanque de condensado	Cambio de visor de nivel y su empaquetadura, cambio de válvula de globo, soldadura de nuevos pernos de sujeción, limpieza de óxido.	1. Retirar los pernos 2. Purga desde el lado de la válvula check 3. Limpieza
Control de nivel de agua.	Cambio de empaquetadura del visor, y de la válvula de globo, cambio del visor de nivel y de válvulas de purga, limpieza interna y limpieza del flotador	1. Purgar el caldero 2. Limpieza
Bomba de agua	Limpieza de impellers, remoción y cambio de sellos y rodamiento y lubricación.	1. Remover los pernos de sujeción de la carcasa de la bomba. 2. Limpieza
Válvula de alivio de presión	Calibración a la presión máxima de operación, y reemplazo	1. Cambiar la válvula

Las características técnicas de la bomba de agua se muestran en la tabla 5:

Tabla 5

Características técnicas de la bomba Baldor Reliance.

BOMBA BALDOR RELIANCE	
Marca	Baldor
Serie	84Z04004
Peso neto	16 kg
Diámetro del eje	15.9 mm
Longitud del eje	47.8 mm
Temperatura máxima ambiente	40 °C
Potencia nominal	0.75 KW
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	115/230 V
Corriente nominal	16/6 A
Velocidad nominal	3450 RPM
Protección térmica	Interna

Fuente: Baldor Reliance

4.1.3 Quemador

Al igual que en los sistemas antes mencionados el quemador se encontraba afectado en la mayoría de sus componentes, el quemador es un elemento de suma importancia en el caldero debido a que en él se produce la combustión. La falta de mantenimiento ocasionó que algunos de sus componentes como la tobera se averíen siendo necesario la colocación de elementos nuevos, otros componentes se los pudo reparar con labores de mantenimiento como lo detalla la tabla 6:

Tabla 6
Acciones de mantenimiento correctivo en el quemador

ELEMENTO	ACCIONES REALIZADAS	DETALLES
Tobera	Reemplazo	Después de un año de vida útil es necesario reemplazar la tobera
Electrodos de ignición	Reemplazo y calibración	Los electrodos de ignición presentaban fisuras que obligaron a reemplazarlos
Fotocelda	Reemplazo	La fotocelda no detectaba haces de luz
Roseta	Limpieza	Se realizó limpieza general a la roseta
Línea de retorno de combustible	Reparación	Se instaló tubería de cobre de diámetro 1/2 in, para el retorno de combustible, debido a que el quemador no presentaba variación de flama de alta a baja intensidad.
Porta tobera	Limpieza	Se realizó limpieza del porta tobera y reemplazo de los pernos de fijación
Manómetros de presión	Reemplazo	Los manómetros no medían correctamente
Electroválvulas de 2 y 3 pasos	Mantenimiento	Se realizó limpieza y se verificó la conductividad
Pistón	Reparación	Mantenimiento y calibración del elemento, adicional se lubricó
Tubería de retorno	Reparación	Se instaló tubería de 1/4 in. para permitir el cambio de alta a baja intensidad de flama
Regulador de flujo	Mantenimiento y calibración	Mantenimiento y lubricación del regulador
Clapeta de aire	Calibración	Calibración de acuerdo al flujo de combustible

Las características técnicas de la bomba de combustible del caldero se presentan en la tabla 7.

Tabla 7*Características técnicas de la bomba de combustible*

Bomba SUNTEC MODEL J single stage	
Marca	Suntec
Modelo	J4
Tipo de Bomba	Simple etapa
Ancho	90 mm
Profundidad	167 mm
Altura	117 mm
Peso	4.2 lbs
Color	Negro
Presión nominal	300 psi
Velocidad de eje	1725/3450 RPM

Fuente: (Global Industrial, 2019)

Las empaquetaduras mencionadas para las labores de mantenimiento se muestran a continuación:

**Figura 43.** Empaquetaduras

Fuente: IC MEGA

Las características de las empaquetaduras se muestran en la tabla 8.

Tabla 8
Características técnicas de las empaquetaduras

Modelo	31241212E
Tipo	Hand hole ovalada
Tamaño	3-1/2" x 4-1/2" x 1/2"
Temperatura máxima de trabajo	380 °F
Presión máxima	180 PSI

Fuente: IC MEGA

4.2 Mantenimiento de sistemas periféricos

4.2.1 Sistema de evacuación de gases

El ducto para salida de gases se encontraba obsoleto, se pudo encontrar fugas en la parte externa del mismo, por tal motivo se modificó la sección para facilitar la salida de gases como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9
Detalle de mantenimiento al sistema de evacuación de gases

ELEMENTO	ACCIONES REALIZADAS	DETALLES
Ducto de evacuación de gases	Cambio de sección de ducto encargada de la evacuación de los gases, se retiró el ventilador empleado para forzar la salida de gases, se sellaron las grietas, se colocó un nuevo termómetro, finalmente se pintó el ducto.	Se procedió a cambiar la sección del ducto de ventilación debido a que el ducto estaba acoplado a otra sección, años atrás se instaló un ventilador para forzar la salida de los gases de combustión, con el nuevo ducto de salida de gases el ventilador no tenía un propósito y fue retirado. Paralelamente se dio mantenimiento.

4.2.2 Sistema de control y seguridad

4.2.2.1 Control de nivel de agua del caldero

Este control de nivel es importante para la seguridad integral del caldero, el control se lleva a cabo por la conexión eléctrica entre la boya del flotador que forma parte del sistema y la bomba de agua.

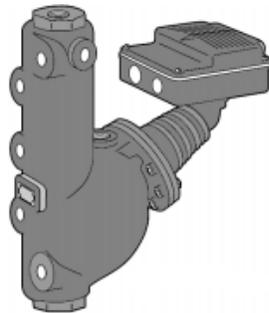


Figura 44. Control de nivel de agua Serie 157S-RB-P

Fuente: AESYS Technologies

Cada caldero cuenta con un nivel de agua establecido por el fabricante en el cual se puede trabajar con seguridad. En el caso particular del caldero York Shipley la boya para el nivel de agua cuenta con dos contactos, ambos en conexión con la bomba de agua. El primero de los contactos mide el máximo nivel de agua permitido, si el agua sobrepasa dicho contacto se emite una señal que apaga la bomba. El segundo contacto se encuentra en el punto mínimo de nivel de agua, si el agua llega a bajar de ese punto inmediatamente se emite una señal a la bomba para accionarla y entregar más fluido desde el tanque de almacenamiento, además el sistema apaga el quemador para impedir accidentes. Las características del control de nivel del caldero se detallan en la tabla 10.

Tabla 10*Características técnicas del control de nivel de agua*

McDONELL MILLER SERIES 157	
Marca	McDonnell
Material	Hierro fundido
Modelo	Serie 157S
Presión	150 PSI
Peso	43 lbs.
Conexión	Roscas BSPT
Operación:	Seteo Manual
Interruptores	SP/ST(2), SP/DT(2)

Fuente: Boiler Supplies

4.2.2.2 Control de nivel de presión

Debido a la combustión producida en el quemador del caldero se genera presión, al igual que en el caso del nivel del agua, el fabricante establece un rango de presión en el cual el caldero funciona de manera segura, igualmente existe un valor mínimo y máximo de seguridad. La presión es medida y controlada por un switch de control, dicho elemento está conectado al quemador y lo puede encender o apagar según se requiera.

**Figura 45.** Honeywell L404A, Pressuretrol Controller

Fuente: Honeywell

Además del switch de control el caldero dispone de un switch de seguridad, al igual que el de control el switch de seguridad también puede encender o apagar el quemador si el nivel de presión se encuentra fuera del rango de seguridad recomendado por el fabricante.

Las características del control de nivel de presión se presentan en la tabla 11.

Tabla 11
Características técnicas del control de presión

Control de presión Honeywell L404A	
Marca	Honeywell
Modelo	L404A
Switch	Switch de Mercurio
Elemento de detección de presión	Diafragma de acero inoxidable
Temperatura ambiente recomendada	-37°C - 66°C
Altura	114.3 mm
Ancho	92 mm
Profundidad	70 mm
Peso	2 lbs
Color	Gris

Fuente: Honeywell

4.2.2.3 Control de llama

Este sistema controla el quemador del caldero, detectando la presencia y nivel de la llama en el interior de la cámara de combustión. El principal elemento del sistema de control de llama es un controlador de llama marca Honeywell, el cual controla al quemador y a la pre purga del caldero



Figura 46. Control de llama Honeywell RM7890

Fuente: Honeywell

Las características del control de llama se presentan en la tabla 12.

Tabla 12

Características técnicas del control de llama

Control de llama Honeywell RM7890	
Marca	Honeywell
Modelo	RM7890
Voltaje	120 Vca
Frecuencia	50/60Hz
Máxima carga recomendada	2000 VA
Temperatura recomendada (operación)	-40°C - 60°C
Temperatura recomendada (almacenamiento)	-40°C - 66°C
Humedad máxima recomendada	85%

Fuente: Honeywell

En el caso que se presente alguna falla en el sistema de control, y este deje de funcionar se podría producir un incremento de presión incluso fuera del límite de seguridad, siendo un aspecto de peligro para el funcionamiento del caldero. Para controlar esta posible situación el caldero debe contar con válvulas de alivio, herramienta alternativa de seguridad para disminuir la presión en caso que sea necesario.



Figura 47. Válvula de alivio de presión

Fuente: Propia Autoría

La válvula de alivio se encuentra seteada a 150 PSI, si en el caldero se presenta un valor mayor al mencionado, se procede a liberar presión, las características de la válvula se muestran en la tabla 13.

Tabla 13

Características técnicas de la válvula de alivio

Válvula de alivio Apollo	
Marca	Apollo
Modelo	19KFEA150
Material	Bronce
Capacidad de descarga	2585 lb/hr
Tipo de rosca	NPT
Máxima temperatura de operación	406°F
Tipo de válvula	Hidráulica
Altura	9in
Presión máxima de trabajo	300 PSI

Fuente: AESYS Technologies

4.3 Prueba hidrostática

Luego de haber realizado el mantenimiento correctivo, se procedió a realizar las pruebas hidrostáticas necesarias para verificar que el caldero se encuentre en óptimas condiciones. Se puede

utilizar agua o aire como fluido de trabajo la presión de operación del caldero York Shipley es 90 PSI.

Para el cálculo de la prueba hidrostática se utiliza la fórmula según el ASME VIII, división I:

$$Ph = 1.5PO \quad (11)$$

$$PO = 90 \text{ PSI}$$

$$Ph = 1.5 * 90 \text{ PSI}$$

$$Ph = 135 \text{ PSI}$$

Una vez calculada la prueba hidrostática se procede a sellar herméticamente el caldero y elevar la presión hasta 135 PSI y mantener de esa forma el caldero durante 6 horas. Al finalizar el tiempo mencionado se pudo observar que el caldero no presentó inconvenientes.

4.4 Plan de mantenimiento preventivo (PMP)

El presente plan de mantenimiento está diseñado en base a la frecuencia con la que el caldero trabaja, su operación en el laboratorio de conversión de la energía es eventual, el PMP se enfoca a sus necesidades específicas de operación.

Según datos proporcionados por el laboratorio las prácticas que se realizan en el caldero y su duración son:

- Calorímetros con duración 2 horas se realiza 10 veces por semestre
- Ciclo Rankine con duración 2 horas se realiza 6 veces por semestre
- Barras de longitud infinita con duración 8 horas se realiza 20 veces por semestre
- Balances exergéticos con duración 6 horas se realiza 10 veces por semestre

De los datos obtenidos se puede observar que el caldero funciona aproximadamente 250 horas por semestre, 500 horas al año.

En la industria generalmente se realiza mantenimiento completo cada 3000 horas de trabajo, para el caldero York Shipley esto implicaría un mantenimiento general cada 6 años, sin embargo, existen acciones de prevención y control que se pueden realizar de manera mensual y semestral, y anual para evitar que surjan inconvenientes como hollín, oxidación, incrustaciones, etc.

Las acciones de mantenimiento y su frecuencia se sugieren a continuación:

4.4.1 Acciones de mantenimiento mensual:

- Verificación de las boquillas del quemador, es importante que las mismas se encuentren libres de suciedad.
- Verificación del nivel de agua en el tanque de almacenamiento. El agua que usa el caldero proviene de un pozo, por tal razón es susceptible a la formación de incrustaciones y corrosión, es importante la adición de químicos ADL para evitar los problemas mencionados
- Inspección visual del sistema de tubería, en búsqueda de posibles fugas

4.4.2 Acciones de mantenimiento semestral:

- Realizar un análisis de gases de combustión y analizar la cantidad de O₂, CO y CO₂, además de la temperatura de salida de los gases (T-STK)
- Realizar una prueba hidrostática para verificar el estado del sistema de seguridad
- Verificación del estado de los manómetros, desmontándolos realizar pruebas de medición buscando posibles errores metrológicos.
- Verificación del estado del termómetro de la chimenea
- Limpieza de los tubos de evacuación de gases, eliminar posible óxido formado en ellos

- Inspección del tanque de almacenamiento en busca de posibles fugas, en caso de existir sellarlas con soldadura, limpiar de sus paredes óxido que pueda formarse.
- Limpieza de la superficie del visor de nivel de agua

4.4.3 Anual:

- Repetir el análisis de gases de combustión
- Desmontaje del quemador y limpieza del mismo, procurando eliminar óxido, hollín o incrustaciones que pudieran producirse
- Desmontaje de la cámara de combustión, limpieza de sus paredes.
- Cambio de empaquetaduras correspondientes a: cámara de combustión, hand hole, tanque de condensado, visor de nivel de agua y bomba de combustible
- Limpieza de tubos de agua y tubos de fuego, es importante limpiar su superficie eliminando partículas no deseadas que puedan acumularse y afectar su funcionamiento.
- Verificación del estado de los electrodos de ignición, si su estado no es óptimo se recomienda colocar nuevas unidades
- Limpieza del flotador del sistema de control de nivel de agua.
- Verificar estado y operación de las válvulas de: tanque de condensado, control de nivel de agua, purga de agua y alivio de presión.

CAPÍTULO V

PUESTA A PUNTO

5.1 Pruebas de operación y seguridad

En los calderos de potencia se debe tener presente dos aspectos importantes para la seguridad y buen funcionamiento.

- Nivel de agua
- Presión de operación

5.1.1 Nivel de agua

El control de nivel de agua modelo 157S-RB-P, utiliza una boya o flotador que va en función del aumento o disminución del nivel de agua. El desplazamiento del flotador permite la transmisión de un eje, y este a los conmutadores de accionamiento rápido permitiendo modificar el camino que debe seguir los electrones. Este tipo específico de control de nivel de agua tiene 2 conmutadores, el primero cuando el flotador se encuentra en el nivel más bajo, este permite que la bomba se active y el segundo conmutador envía una señal para que el quemador permanezca apagado, mientras va subiendo el nivel del agua hasta que el flotador llegue a su punto más alto, los conmutadores cambian de posición apagando la bomba y encendiendo el quemador. La presión máxima de operación es 150 psi (10.5 kg/cm²).

En la figura 48 se muestra un diagrama del control de nivel que permite el accionamiento por medio de un flotador.

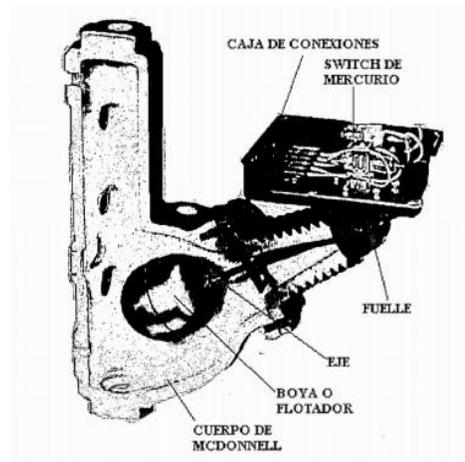


Figura 48. Válvula modelo 157S-RB-P

Fuente: York Shipley Global

El nivel de agua debe mantenerse e ir acorde a las especificaciones del constructor, siguiendo las instrucciones se puede garantizar una operación y manipulación segura del caldero, para evitar accidentes se requiere un control que cumpla con las siguientes funciones:

- Encendido y apagado de la bomba de alimentación de agua
- Encendido y apagado del quemador
- Control de seguridad de corte de agua cuando se encuentre a un nivel por debajo del de operación.

5.1.1.1 Rangos de operación:

El control de nivel de agua modelo 157S-RB-P tiene 2 rangos de operación.

- Rango normal.

Usado para mantener el nivel normal durante la operación controlados mediante 2 sondas electrónicas, el recorrido de este rango es 4" (102 mm) por encima de la línea horizontal del cuerpo se extiende hasta 1 1/4" (38 mm).

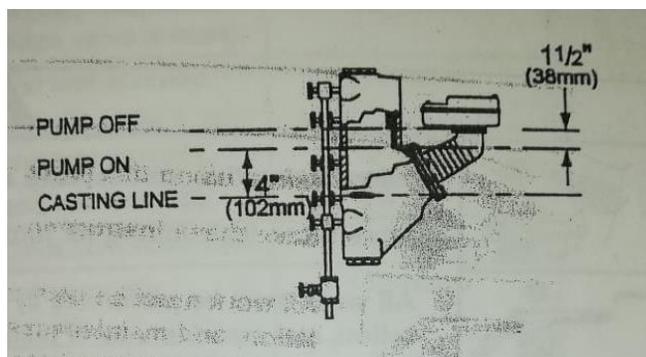


Figura 49. Válvula modelo 157S-RB-P

Fuente: York Shipley Global

- Rango de suspensión.

Controlada por 2 switch, tiene 1 3/8" (35 mm) de rango entre la bomba pagada y el quemador apagado. El recorrido de este rango está incluso con la línea horizontal del cuerpo fundido

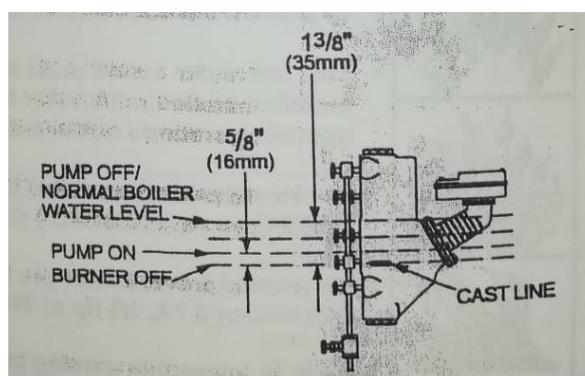


Figura 50. Válvula modelo 157S-RB-P

Fuente: York Shipley Global

5.1.1.2 Switch de operación.

Esta fase ocurre cuando el caldero está en la primera fase de operación hasta llegar a la presión de operación determinada. Como se muestra en el primer cuadro de la figura 51

- 1 y 2 bomba de alimentación de la caldera apagada
- 4 y 5 alarma apagada
- 5 y 6 quemador encendido

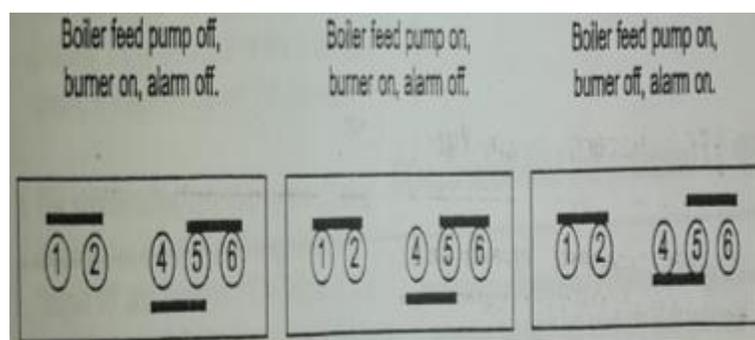


Figura 51. Opciones del switch de operación

Fuente: York Shipley Global

En la segunda parte de la figura 51 podemos observar el momento en que el caldero está generando vapor; el nivel de agua desciende y la bomba se activa hasta llegar al punto máximo.

- 1 y 2 bomba de alimentación de agua activado
- 4 y 5 quemador apagado
- 5 y 6 alarma apagada

La tercera parte es el inicio de llenado de agua al caldero.

- 1 y 2 bomba de alimentación de agua activada
- 4 y 5 quemador apagado
- 5 y 6 alarma encendida

El código ASME especifica que cada caldero debe tener un control de bajo nivel de agua (lower water cut-off). Cuando el nivel de agua desciende a niveles peligrosos para el funcionamiento del caldero, pone en descubierto los tubos que se encuentran en la parte superior del hogar. Los tubos, al no tener una transferencia de calor directa con el agua, deformarse, romperse o en casos más extremos explotar.

5.2 Calibración de la presión y control de seguridad

5.2.1 Control de presión del caldero

Los controles de presión del caldero tienen las siguientes funciones:

- Control de la presión de operación
- Accionamiento o paro del quemador, en función del diferencial de presión
- Control de seguridad

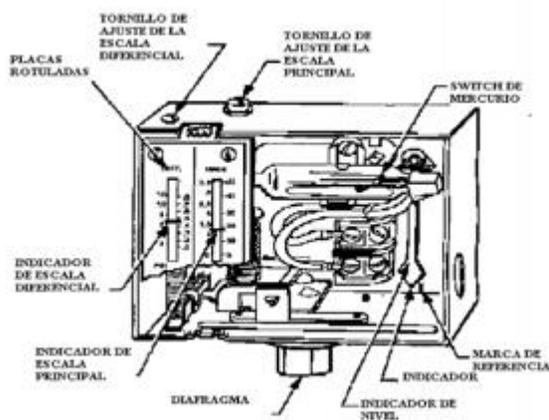


Figura 52. Partes internas del control de presión

Fuente: York Shipley Global

El caldero cuenta con tres presostatos de mercurio modelo L404A-D.

El vapor entra a un diafragma que censa la presión produciéndole una deformación que hace que el bulbo de mercurio se desplace, esta envía una señal que produce que el quemador se prenda o apague.

En la parte superior se encuentra un tornillo que sirve para realizar un set-point de la presión de trabajo que queremos realizar, el segundo tornillo sirve para calibrar el diferencial al cual deseamos que sea la mínima y máxima presión de trabajo.

5.2.2 Control de presión de baja y alta llama

El primer control de presión indica en qué punto se produce el cambio de llama alta a llama baja, al encender el quemador solo al inicio permanece en llama bajo luego cambia a llama alta para que el quemador logre llegar de manera rápida a la presión de operación, pero el set point puede llegar a ser mucho antes que el de operación para que la presión no ascienda de manera brusca, sino que sea controlable.

5.2.3 Control de nivel de operación

Este control de operación permite trabajar a una presión que previamente determinada, teniendo como adición un diferencial de presión de trabajo, suponiendo que la operación de trabajo es de 100 psi el quemador automáticamente se apaga, progresivamente el vapor del caldero es distribuido por la línea de trabajo y la presión disminuye hasta la presión que requerida para se vuelva a activar el quemador y aumentar nuevamente la presión hasta los 100 psi.

5.2.4 Control de nivel de seguridad

Este control es el más importante, por norma todo caldero debe tener un control de presión de seguridad, se lo identifica por tener un botón de color rojo en el centro. Es el encargado de apagar el equipo si este llega a la presión de diseño, que en el caso del caldero York Shipley es 150 psi. Si esto llegase a pasar y se desea reiniciar el caldero, se debe presionar el botón rojo

5.2.5 Válvula de seguridad

Este dispositivo es el último sistema de seguridad que se activa cuando la presión ha sobrepasado la presión de diseño del fabricante, es activado por la presión del vapor, sabiendo que el agua al convertirse en vapor se expande 3000 veces más, la válvula de seguridad tiene una apertura total hasta que reduzca su presión.

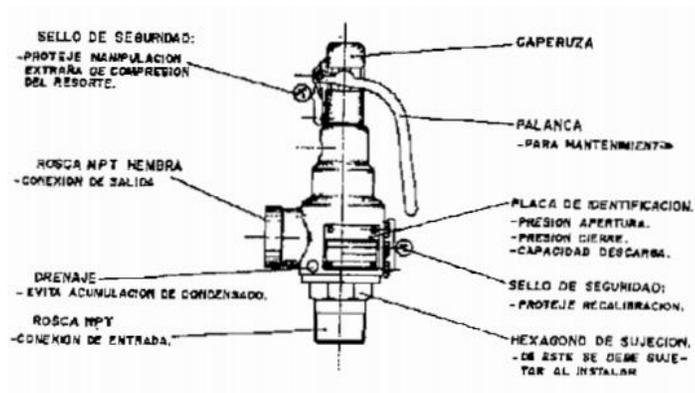


Figura 53. Válvula de alivio de presión

Fuente: York Shipley Global

5.3 Calibración del quemador y seguridad

5.3.1 Calibración y control de combustión del quemador

La combustión genera energía para transformar el agua en vapor a una presión determinada, esto se produce al controlar el suministro más óptimo de la relación aire-combustible mediante instrumentaciones adecuadas utilizando los ajustes necesarios que se considere.

5.3.2 Sistema de control de la combustión

EL objetivo del sistema que controla la combustión es obtener una eficiencia máxima en los gases de combustión, tomando en cuenta la seguridad y confiabilidad de los instrumentos.

El sistema de control de combustión depende de los siguientes factores:

- Características de combustible

- Seguridad de los instrumentos
- Calibración determinada por el usuario

Los gases de combustión para que puedan ser expulsados deben tener una diferencia de temperatura según la segunda ley de la termodinámica, la cual indica que un foco caliente entrega calor a un foco frío, de la misma manera los gases son expulsados por la chimenea al exterior.

Para una combustión completa los gases deben estar regulados y controlados a una determinada operación de trabajo, las regulaciones deben estar relacionados por la mezcla de aire y combustible más los gases que produzca.

Las contra explosiones son producidas por los siguientes factores:

- La fuga de combustible dentro del hogar cuando el caldero no está operando produce una acumulación y saturación de gases.
- Una sincronización errónea al momento de suministrar aire, combustible y el encendido.
- Al momento de trata de encender múltiples veces el quemador el combustible es expulsado al hogar.

Si se presenta este tipo de situación lo más recomendable es una purga de aire prolongada hasta que el combustible sea evaporado o desplazado a través de la chimenea al exterior.

El volumen de la mezcla aire combustible que debe ingresar al hogar no debe ser mayor al 30%. Para obtener una buena combustión se debe introducir una cantidad excesiva de aire al hogar antes de empezar la combustión conocido como prepurga.

La prepurga realiza 2 funciones fundamentales.

- Limpia la cama de combustión de cualquier exceso o residuo de combustible quemado o no quemado.
- Proporciona una adecuada cantidad de oxígeno al hogar para una buena combustión

Los gases calientes que salen por la chimenea producto de la combustión son CO, CO₂, N₂, O₂, NO₂, NOX, SO₂, mediante un análisis de gases de combustión que muestre las cantidades de los gases mencionados, se puede conocer cómo proceder a regular la mezcla aire combustible para una eficiencia óptima y efectiva.

5.3.3 Productos de la combustión

Los gases productos de la combustión expulsados por la chimenea dependen del tipo de combustible que se es utilizando, los principales productos de la combustión a considerar son:

5.3.3.1 Nitrógeno (Ni)

Es el principal componente del aire. Inoloro, insaboro, inoloro, dentro de la combustión no afecta directamente, pero funciona como medio de transporte para los gases que son liberados a la atmosfera. Valores en los gases de combustión 70-80%

5.3.3.2 Dióxido de Carbono (CO₂)

Es un gas inoloro, inoloro con un sabor agrio, se lo considera el principal responsable del efecto invernadero. En la combustión tiene los valores entre 12 – 14%

5.3.3.3 Vapor de agua (H₂O)

El hidrogeno que se encuentra en el combustible formará agua más el del aire al momento de la combustión se transformará en vapor y saldrá por la chimenea.

5.3.3.4 Oxígeno (O₂)

El oxígeno forma parte de los gases de combustión, los valores permitidos se encuentran entre 2-6%

5.3.3.5 Monóxido de Carbono (CO)

Es inoloro, incoloro y tóxico, producto de una mala combustión. Al ser liberado a la atmosfera y al mezclarse con el oxígeno se forma CO₂. Para combustibles sólidos valores entre 200 – 1000 partes por millón (ppm) para combustible de petróleo <100 ppm.

Los otros reactivos productos de la combustión son estrictamente prohibidos ser liberados a la atmosfera.

- Óxidos de nitrógeno (NOX) 0ppm
- Dióxido de azufre (SO₂) 0ppm
- Sulfuro de hidrogeno (H₂S) 0ppm

Tabla 14

Cantidad de gases permitidas en combustión

PORCENTAJE Y PARTES POR MILLON PERMITIDAS (ppm)	
O₂	2-4%
CO	<100 ppm
CO₂	12-14%

Fuente: Secretaría de ambiente del distrito metropolitano de Quito, 2018

5.3.4 Quemador y sus partes

El quemador tiene un conjunto de elementos que trabajan de manera sincronizada y combinada para realizar una buena combustión.

Cumpliendo con 3 funciones principales:

- Realiza una prepurga abasteciendo de aire el hogar y limpiando de impurezas y residuos producidos por el proceso hecho anteriormente, abriendo las plaquetas al 100% dando un máximo de entrada de aire, luego de un tiempo determinado las plaquetas se van cerrando y el aire va regulándose a una calibración dada por el operario.
- Las válvulas solenoides se abren dando entrada al combustible creando una mezcla de aire combustible.
- El transformador manda energía a los electrodos que se encuentran distantes uno del otro generando la energía necesaria para la ignición.

Las partes principales del quemador Power Flame model C3-O se muestran en las figuras 54 y

55.

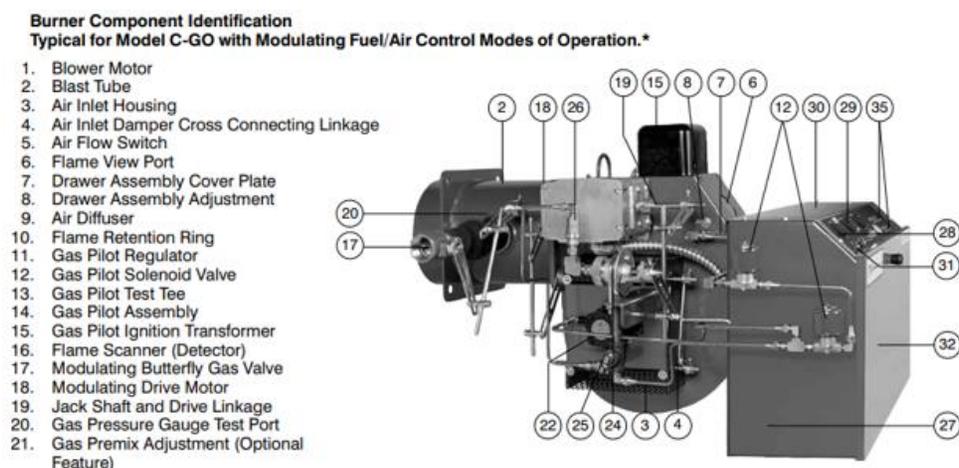


Figura 54. Partes principales del quemador Power Flame C3-O

Fuente: Power Flame incorporated, 2011

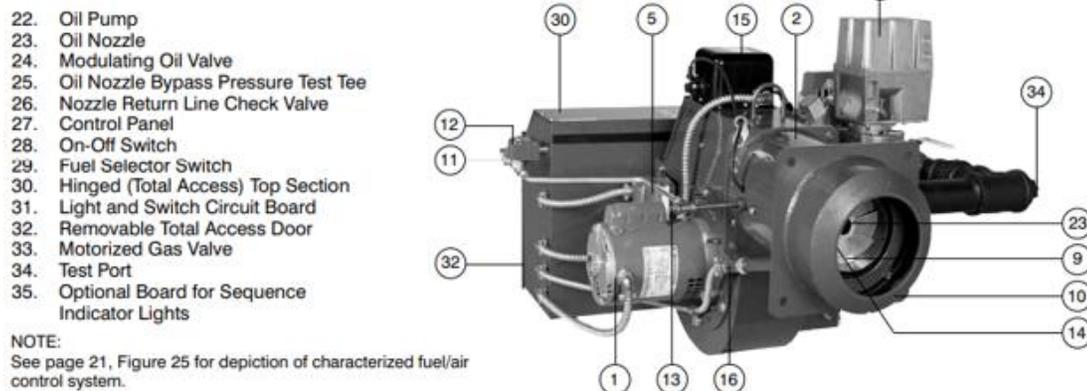


Figura 55. Partes principales del quemador Power Flame C3-O

Fuente: Power Flame incorporated, 2011

5.3.4.1 Selección de tobera

Para la selección de la tobera se debe tener en cuenta que el caldero York Shipley tiene 30 BHP, a partir de allí se calcula la cantidad de energía utilizada BTU que genera el caldero.

$$30BHP * \frac{9.8KW}{1BHP} = 294KW$$

Ese valor se multiplica por la compensación de altura (1.3, dato proporcionado por Clayton)

$$294KW * 1.3 = 382.2KW$$

$$382.2KW * \frac{3412.142BTU}{1KW} = 1304120.672BTU$$

Siendo la cantidad de calor que genera el caldero.

1 BTU es la cantidad necesaria de calor para subir 1 grado F a 1 lb de agua en condiciones ambientales.

Sabiendo cual es la cantidad de BTU máxima que proporciona el caldero, se calcular el tipo de tobera.

El poder calórico de un galón de diésel es de 127800

$$30BHP * \frac{33479BTU}{1BHP \cdot hr} = 1004370BTU/hr$$

$$\frac{1004370BTU/hr}{127800} = 7.8gl/hr$$

7.8 galones de combustible por hora trabajando a su máxima capacidad de operación. Ahora se selecciona el ángulo de atomización. En la industria los ángulos típicos de fabricante varían en 30,50,60,80 grados, la selección del ángulo depende del hogar, la idea fundamental es que la flama no tope las paredes concentrando una mayor cantidad de calor en un sector y su distribución sea de forma simétrica, en este se selecciona 60 grados.



Figura 56. Tobera 6.00 gal/hr y ángulo 60 grados

Fuente: Propia autoría

5.3.5 Quemador de doble etapa

En primera etapa la tobera expulsa combustible y el transformador envía 10000 voltios a los electrodos que genera un arco voltaico, los mismos deben estar separados a 5 mm el uno del otro si se encuentra a nivel del mar, en compensación con la altura se recomienda que estén entre 2 y 3 mm de distancia y a una distancia apropiada de la tobera.

En la segunda etapa hay una mayor apertura de la mezcla aire combustible, no se puede ir a la segunda etapa si no está presente la primera. La apertura de las plaquetas es proporcional al ingreso de combustible que es controlado por un solenoide que permite el flujo, seguido de un segundo solenoide que es por seguridad.

Las plaquetas de aire se mueven por medio de un pistón hidráulico siendo el fluido el combustible y la presión aprovechada por la bomba de combustible, este hace mover al pistón y da apertura a más aire de admisión al hogar. Este proceso ocurre hasta que el quemador llega a la presión de trabajo luego se cierra el solenoide, el pistón vuelve a bajar y retorna a la primera etapa de trabajo.

El uso de la bomba de combustible de dos etapas se hace el arranque de fuego mínimo y la admisión de aire controlado, cuando se llega a la segunda etapa la tobera es controlada por un bypass que se cierra por medio de un solenoide dando la máxima capacidad de combustible compensado el exceso de aire.

La primera etapa se lo conoce como llama baja, aquí el bypass se encuentra abierto, en la segunda etapa se le conoce como llama alta y el bypass se encuentra cerrado.

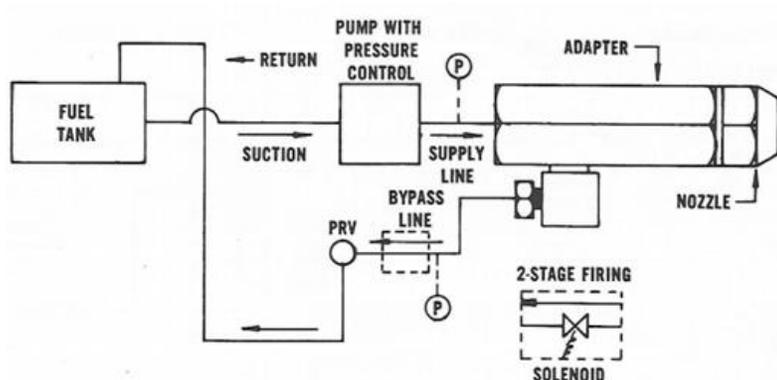


Figura 57. Diagrama flujo de combustible del quemador

Fuente: Clayton sistemas integrales de vapor

5.4 Control de seguridad

5.4.1 Detección de flama

Los detectores de flama son equipos sensibles que detectan luz en un amplio espectro incluso fuera de la visión humana, su rango se encuentra (4000 – 7700 angstroms).

La fotocelda es la más importante dentro del sistema de control de seguridad del quemador, al ser un elemento sensible diferencia la luz de una flama, la luz artificial y la luz solar. Cuando el quemador está funcionando, la fotocelda contantemente envía una señal indicando que hay flama y este a su vez permite que el quemador permanezca prendido y siga enviando combustible al hogar. Si este importante elemento dejase de estar prendida la flama, la bomba seguiría prendida enviando combustible al hogar, y si accidentalmente se activa nuevamente el quemador podría ocurrir una catástrofe.

5.4.2 Modo de controlar la seguridad.

Si el quemador está prendido, es necesario retirar la fotocelda de la mirilla, de esta forma el quemador se apagará, para accionar nuevamente el quemador se presionar el botón de reinicio, en el caso que el quemador no encienda se debería verificar que la mirilla se encuentre libre de suciedad o polvo que interfiera en su accionar, recordando que es un elemento sensible.

CAPÍTULO VI

Cálculos energéticos del caldero

6.1 Balance energético del caldero

6.1.1 Cálculo de consumo de combustible

Para calcular el consumo de combustible se utilizará la siguiente ecuación:

$$C_{combustible} = \frac{\varphi BHP * 8434.65 \text{ kcal/hr}}{PCI} \quad (12)$$

Dónde:

φBHP = Potencia del caldero (nominal) en BHP. En el caso del caldero York Shipley su potencia nominal es 30 BHP

PCI = Poder calorífico inferior del combustible (kcal/kg), en el caso del diésel, su poder calorífico es 10110 kcal/kg

Sabiendo que:

$$8434.65 \text{ kcal/hr} = 1 \text{ BHP}$$

Se tiene:

$$C_{combustible} = \frac{30 * 8434.65 \text{ kcal/hr}}{10110 \text{ kcal/kg}}$$

$$C_{combustible} = 25.02 \text{ kg comb/hr}$$

La masa de gases secos a la salida del caldero se calcula con la ecuación 7, como se vio previamente en el capítulo III, con la diferencia que en este caso se utilizarán los valores resultantes del análisis de gases después del mantenimiento correctivo aplicado (VER tabla 15)

$$m_{gs} = \%Cf \left(\frac{4CO_2 + O_2 + 700}{3(CO_2 + CO)} \right)$$

Dónde:

m_{gs} : Masa de los gases secos a la salida del caldero en Kg por Kg de combustible quemado

CO_2 = Porcentaje de dióxido de carbono en gases de combustión

O_2 =Porcentaje de oxígeno en gases de combustión

CO = Porcentaje de monóxido de carbono en gases de combustión

$\%Cf$ = Porcentaje de carbono real quemado por Kg de combustible

$$CO = 0 \text{ ppm}$$

$$O_2 = 4 \%$$

$$CO_2 = 13.4 \%$$

Reemplazando los valores:

$$m_{gs} = 0.85 * \left(\frac{4 * 13.4 + 4 + 700}{3(13.4 + 0)} \right)$$

$$m_{gs} = 16.01 \frac{Kg}{Kg \text{ comb}}$$

El caudal másico de gases de combustión es el producto del consumo de combustible por la masa de gases secos.

$$\dot{m} = m_{gs} * C_{combustible} \quad (13)$$

$$\dot{m} = 16.01 \frac{Kg}{Kg \text{ comb}} * 25.02 \frac{Kg \text{ comb}}{hr}$$

$$\dot{m} = 400.58 \frac{kg}{hr}$$

$$\dot{m} = 0.12 \frac{kg}{s}$$

6.1.2 Cálculo de la nueva eficiencia del caldero

El cálculo de la eficiencia en las nuevas condiciones del caldero, se realizará de forma similar al cálculo de eficiencia realizado en el capítulo III, tomando en cuenta el nuevo análisis de gases realizado después del mantenimiento correctivo

De igual manera al finalizar las labores de mantenimiento en el caldero se realizó un análisis de gases de combustión con equipo facilitado por la empresa Retena, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 15

Tabla 15

Análisis de gases de combustión posterior al mantenimiento al caldero.

ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN	
O_2	4 %
CO	0 ppm
Eff	89.4 %
CO_2	13.4 %
T-STK	171 °C
T-AIR	42.3 °C
EA	21.9 %
CO(0)	0 ppm

6.1.2.1 Agua procedente de la combustión del hidrógeno

$$Q_{p1} = 9H_2(h_g - h_f)$$

Dónde:

$Qp1$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

H_2 : Peso de hidrógeno por kilogramo de combustible quemado (Kg)

h_g : Entalpía de vapor a la temperatura de los gases de combustión en la chimenea del caldero a una presión de 0.07 Kg/cm² (KJ/Kg)

h_f : Entalpía del agua a la temperatura de entrada del combustible (KJ/Kg). (El combustible ingresa al caldero a 35 °C.)

$H_2 =$ Por cada kilogramo de diésel combustionado existe 15% de hidrógeno

Una vez realizado el mantenimiento al caldero la temperatura de los gases de combustión en la chimenea (T-STK), disminuyó a 171 °C, (VER tabla 15)

$h_g = 2823.62$ KJ/Kg, a 171 °C y 0.07 Kg/cm² de presión

$h_f = 146.65$ KJ/Kg a 35 °C

$$Qp1 = 9 * \frac{15}{100} * (2823.62 - 146.65)$$

$$Qp1 = 3613.91 \frac{KJ}{Kg}$$

6.1.2.2 Humedad en el aire

Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Qp2 = 0.46 * m_{as} * m_v * (T_g - T_a)$$

$Qp2$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

m_{as} : Peso de aire seco empleado por cada kilogramo de combustible

m_v : Porcentaje de saturación multiplicado por el peso de vapor de agua requerido para saturar 1 Kg de aire.

T_g : Temperatura de los gases de combustión a la salida del caldero ($T\text{-STK} = 171\text{ }^\circ\text{C}$, VER tabla15)

T_a : Temperatura del aire a la entrada del hogar del caldero. ($24\text{ }^\circ\text{C}$)

0.46: Calor específico medio del calor de agua desde T_g hasta T_a

Cálculo de peso de aire seco por kilogramo de combustible

$$m_{as} = (1 + X) \left[11.5C + 34.5 \left(H - \frac{1}{8}O \right) + 4.32S \right]$$

El exceso de aire (X) es 21.9 %, (VER tabla 15). Al igual que para la eficiencia inicial por sugerencia del manual de consulta Clayton, se utilizará 85% para carbono y 15% para hidrógeno. En el caso del azufre como se mencionó previamente está presente en el diésel en 81 partes por millón

$$m_{as} = (1 + 0.219)[11.5(0.85) + 34.5(0.15) + 4.32(0.000081)]$$

$$m_{as} = 18.23 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Qp2 = 0.46 * 18.23 * (0.7 * 0.01847) * (171 - 24)$$

$$Qp2 = 15.93 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Qp2 = 66.69 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

6.1.2.3 Gases secos de la chimenea:

$$Qp3 = m_{gs} * Cp_{gs} * (T_g - T_a)$$

Dónde:

$Qp3$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

m_{gs} : Peso de los gases secos a la salida del caldero en Kg por Kg de combustible quemado

Cp_{gs} : Calor específico medio de los gases secos (valor aproximado=0.24)

El peso de los gases secos se puede determinar:

$$m_{gs} = \%Cf \left(\frac{4CO_2 + O_2 + 700}{3(CO_2 + CO)} \right)$$

Mediante el análisis de gases de combustión (VER tabla 15) se tienen los siguientes valores

$$CO = 0 \text{ ppm}$$

$$O_2 = 4 \%$$

$$CO_2 = 13.4 \%$$

$$m_{gs} = 0.85 \left(\frac{4(13.4) + 4 + 700}{3(13.4 + 0)} \right)$$

$$m_{gs} = 16.01 \frac{kg}{kg \text{ de comb}}$$

$$Qp3 = 16.01 * 0.24 * (171 - 24)$$

$$Qp3 = 564.84 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Qp3 = 2364.87 \frac{KJ}{Kg}$$

6.1.2.4 Combustión incompleta:

Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$Qp4 = \left(\frac{CO}{CO_2 + CO} \right) * 5689.6 * C1$$

Donde:

$Qp4$: Pérdidas de calor en KJ/Kg de combustible quemado

CO : Porcentaje de monóxido de carbono obtenido en el análisis de gases de combustión

CO_2 : Porcentaje de dióxido de carbono obtenido en el análisis de gases de combustión

$C1$: Peso de carbono combustionado por kilogramo de combustible

$$Qp4 = \left(\frac{CO}{CO_2 + CO} \right) * 5689.6 * C1$$

$$Qp4 = \left(\frac{0}{13.4 + 0} \right) * 5689.6 * 0.85$$

$$Qp4 = 0 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Qp4 = 0 \frac{KJ}{Kg}$$

6.1.2.5 Pérdidas por radiación:

Los cálculos se realizan de manera similar a los realizados en el capítulo 3, con la diferencia que la temperatura en los gases de la chimenea en este caso es 171 °C (VER tabla 15)

- Cantidad de calor transmitido entre T_2 (gases de combustión) y T_1 (gases en la chimenea)

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_T}$$

$$q = \frac{650^\circ\text{C} - 171^\circ\text{C}}{0.023 \frac{^\circ\text{C}}{w}}$$

$$q = 20826.09 w$$

- Pérdidas por convección y por radiación:

Convección:

Fluido: gases de combustión

$$h_{gases\ de\ combustión} = 25 \frac{W}{m^2K}$$

$$D = 2.6254\ m$$

$$L = 2.24\ m$$

Temperatura de superficie de las paredes: 160.153 °C

Temperatura ambiente (T_{∞}): 171 °C

Temperatura del alrededor (T_{alr}): 90 °C

$$A = \pi * D * L$$

$$A = \pi * 2.6254m * 2.24m$$

$$A = 18.47\ m^2$$

$$q = h_{gases\ de\ combustión} * A * (T_s - T_{\infty})$$

$$q = 25 \frac{W}{m^2K} * 18.47\ m^2 * (433.15 - 444.15)K$$

$$q = -5079.25\ w$$

- **Radiación:**

Radiación teórica:

$$q = \varepsilon * A * \sigma * (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

$$q = 0.8 * 18.47\ m^2 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} * (433.15^4 - 363^4)K^4$$

$$q = 14945.3\ w$$

Radiación experimental:

$$h_r = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_{alr}) * (T_s^4 - T_{alr}^4)$$

$$h_r = 0.8 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} * (433.15 + 363) * (433.15^2 + 363^2)$$

$$h_r = 11.53 \frac{W}{m^2 K}$$

$$q_r = h_r(T_s - T_{alr}) * A$$

$$q_r = 11.53 \frac{W}{m^2 K} (433.15 - 363)K * 18.47 m^2$$

$$q_r = 14939.71 w = 14.9 KW$$

- **Potencia emisiva**

$$E = \varepsilon * \sigma * T_s^4 * A$$

$$E = 0.8 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * 433.15^4 K^4 * 18.47 m^2$$

$$E = 294920 w$$

Sabiendo que:

$$1 BHP = 9.8 KW$$

Entonces:

$$14.9 KW = 1.52 BHP$$

Tomando la ecuación del consumo de combustible:

$$C_{combustible} = \frac{\varphi BHP * 8434.65 kcal/hr}{PCI}$$

Reemplazando el consumo de combustible, y los BHP producidos por Qp5 se tiene:

$$25.02 \frac{kg \text{ comb}}{hr} = \frac{1.52 BHP * 8434.65 kcal/hr}{Qp5}$$

$$Qp5 = 512.56 \frac{kcal}{Kg}$$

$$Q_{p5} = 2145.56 \frac{Kj}{Kg}$$

Aplicando sumatoria de las pérdidas calculadas:

$$\sum P = 3613.91 + 66.69 + 2364.87 + 0 + 2145.56$$

$$\sum P = 8191.03 \frac{KJ}{Kg}$$

El poder calorífico del diésel empleado en el caldero es de 43292 KJ/Kg, tomando a dicha cantidad como el 100%, los 8191.03 KJ/Kg representan el 18.92 %, entonces la eficiencia final del caldero es:

$$Eficiencia\ final = 100 - 18.92$$

$$Eficiencia\ final = 81.07 \%$$

6.1.3 Cálculo de pérdidas

Para el cálculo de pérdidas es necesario calcular el número de Reynolds, para conocer qué tipo régimen de flujo se tiene:

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (13)$$

Dónde:

v : Velocidad del fluido en la tubería

D : Diámetro interno de la tubería

ν : Viscosidad cinemática del fluido

El material de la tubería del caldero es hierro negro (ASTM A106 gr B) cédula 40 con las siguientes características:

- Diámetro externo: 2.308 in

- Espesor: 0.154 in
- Diámetro interno: 2 in (0.0508 m)

Los cálculos realizados para el número de Reynolds y pérdidas de presión se realizarán con el diámetro interno.

Para determinar la velocidad del fluido es necesario mencionar que el caudal de la bomba de alimentación es 4.84 galones por minuto, como se puede ver en la figura 58.



Figura 58. Características técnicas de la bomba de alimentación

Fuente: Propia autoría

Conociendo el caudal de la bomba se calcula el valor de la velocidad:

$$Q = A * V \quad (14)$$

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

Sabiendo que 4.84 gpm = 0.00037 m³/s

$$V = \frac{0.00037 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi * \frac{0.0508^2 \text{ m}^2}{4}}$$

$$V = 0.183 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A 60 °C la viscosidad cinemática del agua es: 0.477 * 10⁻⁶ m²/s.

Reemplazando los datos mencionados en la ecuación de Reynolds se tiene:

$$Re = \frac{0.183 \frac{m}{s} * 0.0508 m}{0.477 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re = 19489$$

El número de Reynolds calculado es mayor a 4000, el régimen es turbulento, por tanto, para el cálculo de pérdidas de presión se utilizará la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$\Delta P = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho * v^2}{2} \quad (15)$$

Dónde:

ΔP : Pérdidas de presión

f : Factor de fricción de Darcy-Weisbach

L : Longitud de la tubería más la longitud calculada a partir de los accesorios que producen pérdidas menores

D : Diámetro de la tubería

ρ : Densidad del fluido (1000 kg/m³)

v : Velocidad del fluido en la tubería

Para determinar el factor de fricción se utilizó la ecuación de Haaland, dicha ecuación es una alternativa al diagrama de Moody, es una estimación que puede generar errores hasta del 2%.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D} \right)^{1.11} \right] \quad (16)$$

Dónde la rugosidad (ϵ) del hierro negro es 0.07 mm

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{19489} + \left(\frac{0.07 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} \right)^{1.11} \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx 5.925$$

$$f \approx 0.028$$

Para el cálculo de las pérdidas menores, los accesorios de la tubería son:

- 2 Válvulas check
- 4 Codos de 90°
- 2 T's
- 1 Válvula de globo

Los coeficientes K_L (coeficiente de pérdidas) para cada uno de los accesorios mencionados se muestran a continuación:

	Nominal diameter, in									
	Screwed					Flanged				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20	
Valves (fully open):										
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5	
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03	
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0	
Elbows:										
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	
Tees:										
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07	
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41	

Figura 59. Coeficientes de pérdida de accesorios de tubería

Fuente: Indian Standard

De la figura 59 se tienen los siguientes valores:

$$K_L \text{ Válvula check} = 2.1$$

$$K_L \text{ Codos de } 90^\circ = 0.95$$

$$K_L \text{ T's} = 0.90$$

$$K_L \text{ Válvula de globo} = 6.9$$

Una vez conocido el coeficiente de pérdidas y la velocidad del fluido se utiliza la ecuación de Darcy Weisbach para pérdidas menores:

$$h_L = K_L * \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Para las válvulas check:

$$h_L = \left(2.1 * \frac{0.183^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}} \right) * 2$$

$$h_L = 0.0072 \text{ m}$$

Para los codos de 90°

$$h_L = \left(0.95 * \frac{0.183^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}} \right) * 4$$

$$h_L = 0.0065 \text{ m}$$

Para las T's:

$$h_L = \left(0.90 * \frac{0.183^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}} \right) * 2$$

$$h_L = 0.0031 \text{ m}$$

Para la válvula de globo:

$$h_L = \left(6.9 * \frac{0.183^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9.8 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$h_L = 0.0117 \text{ m}$$

Sumatoria de pérdidas menores: $0.0072 \text{ m} + 0.0065 \text{ m} + 0.0031 \text{ m} + 0.0117 \text{ m}$

Sumatoria de pérdidas menores: 0.0285 m

Reemplazando los valores en la ecuación de Darcy-Weisbach se tiene la pérdida de presión:

$$\Delta P = f * \frac{L}{D} * \frac{\rho * v^2}{2}$$

$$\Delta P = 0.028 * \frac{12 \text{ m}}{0.0508 \text{ m}} * \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 0.183^2 \frac{m^2}{s^2}}{2}$$

$$\Delta P = 111.015 \text{ Pa} = 0.017 \text{ Psi}$$

6.2 Evaporación real:

La evaporación (nominal) teórica se calcula con la siguiente ecuación:

$$m = BHP \text{ del caldero} * \frac{15.65 \frac{Kg}{h}}{1BHP} \quad (18)$$

$$m = 30 \text{ BHP} * \frac{15.65 \text{ Kg/h}}{1BHP}$$

$$m = 469.5 \text{ Kg vapor /h}$$

Aplicando la ecuación de transferencia de calor:

$$Q = mCp\Delta T + m\Delta h \quad (19)$$

Despejando:

$$m = \frac{Q}{C_p \Delta T + \Delta h}$$

Aplicando la relación entre BHP y kcal/h:

$$Q = \text{BHP del caldero} * \frac{8346 \text{ Kcal/h}}{1 \text{ BHP}}$$

$$Q = 30 \text{ BHP} * \frac{8346 \text{ Kcal/h}}{1 \text{ BHP}}$$

$$Q = 250380 \text{ kcal/h}$$

La presión de operación del caldero es 90 psi, a esa presión se tienen los siguientes valores:

- *Temperatura de saturación* = 160.153 °C
- *Calor latente del vapor: hfg* = 497.219 kcal/kg
- *Entalpía del vapor saturado: hg* = 658.767 kcal/kg
- *Entalpía del líquido saturado: hf* = 161.548 kcal/kg

Considerando 60 °C a la temperatura del agua a la entrada del tanque de condensado, y reemplazando los datos mostrados en la ecuación, se obtiene la evaporación real:

$$m = \frac{250380 \text{ kcal/h}}{1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * (160.153 - 60)^\circ\text{C} + (658.767 - 161.548)}$$

$$m = 419.14 \frac{\text{Kgvapor}}{\text{h}}$$

Una segunda forma alternativa para el cálculo de la evaporación real se da por la siguiente expresión:

$$Ws = \text{BHP del caldero} * 15.65 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * Fe \quad (20)$$

Siendo Fe:

$$FE = \frac{hfg (\text{Presión atmosférica})}{hg (\text{Presión}_{operación}) - hf(\text{Temperatura del agua de alimentación})} \quad (21)$$

Considerando la presión atmosférica de Sangolquí en 1011 hpa= 1.011 bar

El tiempo en Sangolqui, Ecuador ★

Ultima actualización hace 49 minutos

Reportado a Quito



14 °C

Parcialmente nuboso

Punto del rocío: 9 °C

Humedad relativa: 72%

Presión atmosférica: 1011 hPa

Viento: 4 km/h - SO (220°)

Visibilidad: 10.0 km

Luna: Cuarto creciente

Salida del sol: 06:11

Puesta del sol: 18:16

Figura 60. Presión atmosférica en Sangolquí

Fuente: Worldmeteo

- *Calor latente del vapor:* $hfg (1.011 \text{ Bar}) = 539.125 \text{ kcal/kg}$

Considerando 90 Psi como presión de operación

- *Entalpía del vapor saturado:* $hg (90 \text{ Psi}) = 658.767 \text{ kcal/kg}$

Considerando 60 °C, como la temperatura de alimentación del agua al tanque de condensado:

- *Entalpía del líquido saturado:* $hf(60 \text{ °C}) = 59.9 \text{ kcal/kg}$

Reemplazando los datos mencionados en la ecuación, se obtiene el valor de la evaporación

real:

$$FE = \frac{539.125 \text{ kcal/kg}}{658.767 \text{ kcal/kg} - 59.9 \text{ kcal/kg}}$$

$$FE = 0.9$$

$$W_s = 30 \text{ BHP} * 15.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.9$$

$$W_s = 422.56 \text{ Kg vapor/h}$$

6.3 Calidad de vapor

El cálculo de la calidad de vapor permite cuantificar el porcentaje de vapor presente en una mezcla líquido-vapor.

De acuerdo al libro Termodinámica de Yunus Cengel en su séptima edición, la calidad del vapor se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$x = \frac{h_{\text{promedio}} - h_f}{h_g - h_f} \quad (22)$$

Dónde:

x = Calidad del vapor

h_f = Entalpía del líquido saturado

h_g = Entalpía del vapor saturado

h_{promedio} = Entalpía promedio del sistema, dicho valor se encuentra entre los valores de la entalpía del líquido saturado y el vapor saturado

$$h_f \leq h_{\text{promedio}} \leq h_g$$

La ecuación mostrada para el cálculo de la calidad en este caso utiliza valores de entalpía para su solución, pero se pueden usar también valores de entropía y de energía interna.

Como se ha mencionado previamente el caldero trabaja a 90 Psi (620.528 Kpa), a esa presión se tienen los siguientes valores de entalpías (Tabla A-5, Cengel):

$$h_g = 2757.6 \text{ kj/kg}$$

$$h_f = 676.24 \text{ kJ/kg}$$

Reemplazando los valores en la ecuación de la calidad:

$$x = \frac{h_{promedio} - 676.24 \text{ kJ/kg}}{2757.6 \text{ kJ/kg} - 676.24 \text{ kJ/kg}}$$

Se tiene una ecuación con dos incógnitas, la calidad del vapor y la entalpía promedio del sistema.

En este punto para determinar la entalpía promedio se pudo haber utilizado los calorímetros de estrangulación del caldero York Shipley, sin embargo, el caldero ya no cuenta con dichos instrumentos y no fue posible realizar la medición de manera práctica.

En el año 2018 los ingenieros Paúl Buenaño y Franklin Salguero presentaron su trabajo de titulación "Mantenimiento de cuarto y quinto escalón e implementación de un sistema de adquisición de datos para el supercalentador de la planta de vapor del laboratorio de conversión de energía". En dicho trabajo de titulación tampoco se pudo utilizar los calorímetros para determinar la calidad de vapor, frente a ello los ingenieros Buenaño y Salguero utilizaron una placa orificio para determinar de manera teórica la calidad de vapor del caldero, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

$$\text{Masa de vapor teórica: } \dot{m}_{vt} = 3.80 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$\text{Flujo de vapor seco: } \dot{m}_{vt} = 3.4 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

A partir de los datos mostrados, se puede estimar un valor aproximado de la entalpía promedio:

$$h_{promedio} = 2528.65 \text{ kJ/kg}$$

Se puede observar en la campana de saturación (VER figura 61) que el valor de la entalpía promedio se encuentra en el rango de la entalpía del líquido saturado y del vapor saturado como menciona Cengel, entonces la calidad teórica del vapor es:

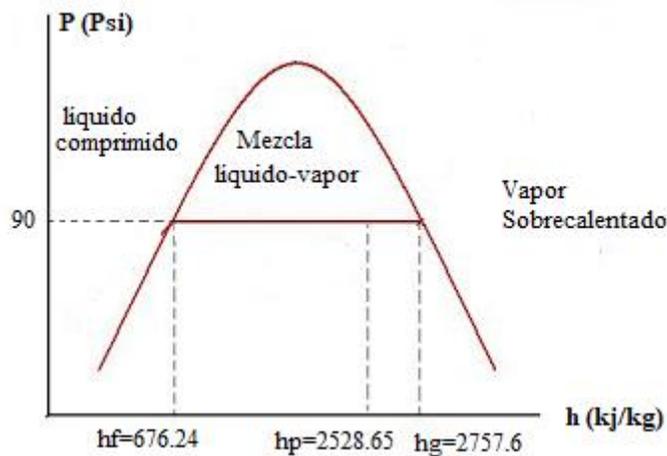


Figura 61. Campana de saturación del sistema

Fuente: Propia autoría

$$x = \frac{2528.65 \text{ KJ/Kg} - 676.24 \text{ KJ/Kg}}{2757.6 \text{ KJ/Kg} - 676.24 \text{ KJ/Kg}}$$

$$x = 0.889$$

6.4 Selección de válvula de alivio de presión

Para la selección de válvula de alivio de presión en el caldero York Shipley se tiene como medio de fluido vapor saturado a una presión de trabajo de 90 psi y una presión máxima de diseño de 150 psi según estipula el fabricante.

En esta selección cuando se trabaja con vapor de agua, el dimensionamiento se realiza sobredimensionando al 10% de sobrepresión.

La información dada por “Crosby engineering handbook – technical publication TP-V300” indica que se utilizará la formula siguiente:

$$A = \frac{W}{51.5 * K * P_1 * K_{sh} * K_n * K_b} \quad (23)$$

Donde:

A: Requerimiento mínimo de descarga efectiva

W: Capacidad de alivio requerido

K: Coeficiente efectiva a la descarga, K=0.975

P₁: Presión de descarga que conforma la presión máxima de descarga del caldero + el 10% de sobrepresión + la descarga final en este caso la atmosférica (1 atm)

K_{sh}: Factor de corrección. Para vapor saturado el valor de K=1.00

K_n: Factor de corrección para vapor saturado seco a una presión entre 1500 – 3200 psia

K_b: Factor de corrección dividiendo presión de descarga y P₁ por 100

Los valores obtenidos para la velocidad obtenidos de Ludwig, E, 1965 mostrados en la figura 62 están en el rango de 30 – 150 psi en saturación están en 6000-10000 fpm (30 – 60 fps) dando un valor máximo de 18.28 m/s

Con sólidos	(6 Min.-15 Máx.) fps 7.5 fps	Monel o Níquel
Percloroetileno	6 fps	Acero
Vapor		
0-30 psi Saturado	4000-6000 fpm	Acero
30-150 psi Saturado o sobrecalentado	6000-10000 fpm	Acero
Más de 150 psi, sobrecalentado	6500-15000 fpm	Acero
Líneas cortas	15000 fpm (máx)	Acero
Acido sulfúrico		
88-93%	4 fps	S.S.-316, plomo
93-100%	4 fps	Acero Cat. 80
Dióxido de azufre	4000 fpm	Acero
Estireno	6 fps	Acero
Tricloroetileno	6 fps	Acero
Cloruro de vinilo	6 fps	Acero
Cloruro de vinileno	6 fps	Acero
Agua		
Servicio promedio	3-8 (prom.6) fps	Acero
Alimentación de caldera	4-12 fps	Acero
Líneas de succión de bombas	1-5 fps	Acero
Máxima economía (usual)	7-10 fps	Acero
Agua de mar, tubería	5-8 fps (3 min.)	Concreto R. L., canal de asfalto
Agua de mar, concreto	5-12 fps (3 min.)	Saran-lined, Transite

Figura 62. Velocidades sugeridas para tuberías

Fuente: Ludwig 1965

$w = 1035 \text{ lb/hr}$ dato obtenido de la placa del caldero York Shipley

$K = 0.975$

$$P_1 = 150 \text{ psig} + 15 \text{ psig} + 14.69 \text{ psig}$$

$$P_1 = 179.69 \text{ psig}$$

K_{sh} : 1.00 Recomendación para vapor saturado

K_n : 1500 – 3200 psi (No aplica)

$$K_b = \frac{14.69 \text{ psig}}{179.69 \text{ psig}}$$

$$K_b = 8.175$$

Table T7-1
Correction Factor for Vapors and Gases, K_b
for Conventional Valves with Constant Back
Pressure and Styles JPV/JPVM Pilot Valves with
Back Pressures Exceeding Critical Pressure*

$$P_b / P_1 = \text{Back Pressure Percentage}$$

$$= \frac{\text{Back Pressure (absolute)}}{\text{Relieving Pressure (absolute)}} \times 100$$

P_b / P_1	K_b	P_b / P_1	K_b	P_b / P_1	K_b
55	1.00	72	0.93	86	0.75
60	0.995	74	0.91	88	0.70
62	0.99	76	0.89	90	0.65
64	0.98	78	0.87	92	0.58
66	0.97	80	0.85	94	0.49
68	0.96	82	0.81	96	0.39
70	0.95	84	0.78		

* Critical pressure is generally taken as 55% of accumulated inlet pressure, absolute

Figura 63. Factores de corrección para vapor y gases

Fuente: Crosby Valve Inc

De la figura 64, obtenida del handbook de Crosby se observa que el valor de K_b , siendo menor que 55% adoptamos el valor de 1.00

Sustituyendo los valores en la fórmula se obtiene el siguiente resultado.

$$A = \frac{1035 \text{ lb/hr}}{51.5 * 0.975 * 176.69 * 1.00 * 1.00}$$

$$A = 0.1147 \text{ in}^2$$

Orifice Designation and Effective Area Sq. In. (Sq. mm)	Series BP Fixed Blowdown Balanced Pressure Relief Valve Gas, Vapor, Liquid 3/4" x 1", 1" x 1"	Style JOS/JBS Closed Bonnet Pressure Relief Valve Gas, Vapor, Steam 1 D 2 to 8 T ₂ , 10	Style JLT-JOS/JBS Closed Bonnet Pressure Relief Valve Liquid 1 D 1 to 8 T ₂ , 10	Style JOS-H Open Bonnet Pressure Relief Valve Steam 1 D 2 to 8 T ₂ , 10	Style JO/JB Closed Bonnet Pressure Relief Valve Gas, Vapor, Steam 10 V 14 to 20 BB, 24	Series 800 Adjustable Blowdown Pressure Relief Valve Gas, Vapor, Steam 3/4" x 1" to 1-1/2" x 2-1/2"	Series 900 OMNI-TRIM® Fixed Blowdown Pressure Relief Valve Gas, Vapor, Steam, Liquid 1/2" x 1" to 1-1/2" x 2-1/2"
-	0.074 (47.7)	*					*
D	0.110 (71.0)	*	*	*	*	*	*
E	0.196 (126)		*	*	*	*	*
F	0.307 (198)		*	*	*	*	*
G	0.503 (325)		*	*	*	*	*
H	0.785 (506)		*	*	*		
J	1.287 (830)		*	*	*		
K	1.838 (1186)		*	*	*		

Figura 64. Tipos de válvula de presión

Fuente: Crosby Valve Inc

El valor es próximo a 0.110 y se tiene un orificio tipo D, por servicio de vapor se selecciona una válvula tipo JOS-H, con las siguientes características:

- Tipo: D
- Diámetro de entrada: 1 pulgada
- Diámetro a la descarga: 2 pulgadas

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1 Comparación del estado actual vs el estado inicial

El último mantenimiento realizado al caldero York Shipley fue realizado en el año 2014 por el Ingeniero Boris Pumisacho y el laboratorio de conversión de la energía con colaboración de la empresa Retena S.A. Desde la fecha señalada hasta la actualidad la falta de mantenimiento provocó oxidación y formación de corrosión e incrustaciones en el sistema de tuberías, además de una gruesa capa de hollín solidificado formado en las paredes del lado de fuego. La principal consecuencia de los efectos mencionados es una mala transferencia de calor y consumo excesivo de combustible.

Para resumir y comparar de mejor manera el estado actual vs el estado inicial de las partes y piezas de los diferentes sistemas del caldero se presenta a continuación la tabla con el detalle de las modificaciones realizadas en el presente trabajo

Tabla 16*Tabla comparativa de condiciones iniciales y finales del caldero*

Parte/Pieza	Condición inicial	Condición final
Cámara de combustión	Operación deficiente, capa de hollín en las paredes	Operativa, paredes libres de elementos no deseados
Empaquetaduras de la cámara de combustión	Rotas	Empaquetaduras nuevas colocadas
Tubos de evacuación de gases	Operación deficiente, capa de óxido formada	Operativos, libres de óxido
Ductos de fuego	Operación deficiente, hollín y óxido en su superficie	Operativos, superficie libre de elementos no deseados
Pernos de sujeción de la tapa del ducto de fuego	Rotos	Nuevos pernos colocados
Hand hole	Operación deficiente, Presencia de polvo y suciedad	Operativa
Empaquetaduras de la hand hole	Rotas	Empaquetaduras nuevas colocadas
Tanque de condensado	Operación deficiente, óxido acumulado	Operativo, tanque libre de óxido
Visor de nivel del tanque de condensado	Roto	Nuevo visor colocado
Empaquetaduras del tanque de condensado	Rotas	Empaquetaduras nuevas colocadas
Válvula de globo del tanque de condensado	Rota	Nueva válvula colocada

Continúa 

Pernos de sujeción del tanque de condensado	Oxidados, rotos	Nuevos pernos colocados
Empaquetadura del visor de nivel de agua	Rotas	Empaquetaduras nuevas colocadas
Válvula de globo del control de nivel de agua	Rota	Nueva válvula colocada
Visor de nivel del control de agua	Roto	Nuevo visor colocado
Válvula de purga del control de nivel de agua	Rota	Nueva válvula colocada
Flotador del control de nivel de agua	Oxidado	Operativo, libre de óxido
Sellos de bomba de agua	Rotos	Nuevos sellos colocados
Rodamientos de bomba de agua	Rotos	Nuevos rodamientos colocados
Válvula de alivio de presión	Obsoleta	Nueva válvula colocada
Tobera del quemador	Obsoleta	Nueva tobera colocada
Electrodos de ignición	Rotos	Nuevos electrodos colocados
Fotocelda del quemador	Obsoleta	Nueva fotocelda colocada
Línea de retorno de combustible	Operación deficiente	Operativa, instalación de tubería de cobre de diámetro 1/2 in, para el retorno de combustible
Porta tobera	Operación deficiente, suciedad acumulada	Operativa
Bomba de combustible	Operación deficiente	Operativa

Continúa 

Empaquetadura de la bomba de combustible	Rotas	Empaquetaduras nuevas colocadas
Filtro de bomba de combustible	Roto	Nuevo filtro colocado
Sellos de bomba de combustible	Rotos	Nuevos sellos colocados
Manómetros de presión	Fuera de servicio	Nuevos manómetros colocados
Electroválvulas de 2 y 3 pasos	Operación deficiente	Operativa
Tubería de retorno	Rota, con filtraciones	Se instaló tubería de 1/4 in. para permitir el cambio de alta a baja intensidad de flama
Regulador de flujo	Operación deficiente	Operativo
Clapeta de aire	Fuera de rango	Calibrada
Sección del ducto de evacuación de gases	Ducto con grietas	Sello de grietas, pintura nueva en el ducto y cambio de sección
Termómetro del ducto de salida de gases	No existía	Nuevo termómetro colocado
Ventilador del ducto de gases	Roto	Ventilador removido, con la nueva sección instalada su presencia no era necesaria
Sistema de tuberías del caldero	Oxidadas	Libres de óxido, pintadas según la norma INEN 440

Uno de los objetivos específicos del presente trabajo es realizar un análisis para mejorar la eficiencia del caldero. Cuando se realizaron las primeras inspecciones para analizar el estado de

las partes y sistemas del caldero, se pudo observar que el quemador era una de las partes más afectadas, al mismo tiempo el quemador es una parte importante en la combustión del combustible de trabajo. Una hipótesis que se maneja fue que, al realizar mantenimiento del quemador y sus partes, se reducirían las pérdidas producidas en la combustión, consecuencia de esto la eficiencia del caldero aumentaría.

Esta hipótesis fue confirmada, como se pudo ver en el capítulo 6, las pérdidas en el proceso de combustión disminuyeron aumentando al mismo tiempo la eficiencia del caldero, como se puede observar en la tabla 17. (Las pérdidas de la tabla están expresadas en KJ/Kg de combustible)

Tabla 17

Comparación de pérdidas en combustión inicial en las condiciones iniciales y finales

Parámetro	Pérdida inicial	Pérdida final
Agua procedente de la combustión del hidrógeno	3679.19	3613.91
Humedad en el aire	103.94	66.69
Gases secos de la chimenea	3898.34	2364.87
Combustión incompleta	138.42	0
Pérdidas por radiación	2145.56	2145.56

Como se puede observar a excepción de las pérdidas por radiación todos los parámetros de pérdidas disminuyeron, producto del mantenimiento realizado en el quemador. Esta reducción de pérdidas provocó un aumento en la eficiencia del caldero como lo muestra la tabla 18.

Tabla 18*Tabla comparativa de eficiencias inicial y final*

Eficiencia inicial	76.98 %
Eficiencia final	81.07 %
Incremento	4.09 %

CAPÍTULO VIII

ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del presente proyecto contempla costos directos e indirectos, los cuales se detallan a continuación:

- **Costos directos**

Tabla 19

Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas

Colaborador	Cargo	Horas	Costo hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. Ángelo Villavicencio, MSc.	Director del proyecto	70	20	1400
Ing. Roberto Gutierrez, MSc.	Tutor del proyecto	60	20	1200
			Subtotal1	2600

Tabla 20

Remuneración a profesionales de RETENA S.A.

Colaborador	Horas	Costo Hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. David Platzer	30	60	1800
Ing. Xavier Viteri	20	50	1000
Ing. Boris Pumisacho	20	50	1000
		Subtotal2	3800

Tabla 21
Remuneración a estudiantes

Nombre	Cargo	Horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Sr. James	Responsable del proyecto	480	2,5	1200
Jurado				
Sr. Iván Tapia	Responsable del proyecto	480	2,5	1200
			Subtotal3	2400

Tabla 22
Materiales utilizados

Ítem	Cant.	Descripción	Valor unit. (USD)	Total (USD)
1	1	Kit de limpieza de calderos	150	150
2	2	Empaque hand-hole de caucho EPDM para el lado de agua 3 1/2 X 4 1/2	10	20
3	1	Caja de fibra de cerámica	150	150
4	1	Válvula flotador de 1 in. ingreso de agua	120	120
5	2	Juego de nivel completo	100	200
6	1	Empaque control de nivel Mcdonnell & Miller	10	20
7	1	Juego de válvulas de purga	200	200
8	1	Kit de mantenimiento de quemador	150	150
9	1	Tobera	80	80
10	1	Juego de electrodos	60	60
11	1	50 kg de sal en grano virgen	50	50
12	1	Dosis de químico	200	200
			Subtotal4	1400

Total costos directos: Subtotal1 + Subtotal2 + Subtotal4

Total costos directos: 2600 + 3800 + 1400

Total costos directos: 7800

En la sumatoria de costos directos se excluye la remuneración a los señores estudiantes responsables del proyecto.

Costos indirectos

Tabla 23

Costos indirectos

Ítem	Descripción	Valor (USD)
1	Combustible	500
2	Material de oficina	150
3	Energía eléctrica	100
4	Agua potable	200
5	Comunicación	20
	Total	970

El costo total del proyecto fue:

$$\text{Costo total} = \text{Costos directos} + \text{costos indirectos}$$

$$\text{Costo total} = 7800 + 970$$

$$\text{Costo total} = 8770 \text{ USD}$$

Tabla 24
Detalle de costos y financiamiento

	Rubro	Valor (USD)	%	Observaciones
Costos directos	Remuneración a profesionales de la Universidad de las Fuerzas Armadas	2600	29,65	Rubro correspondiente a tutorías de docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas
	Remuneración a profesionales de RETENA S.A.	3800	43,33	Rubro correspondiente a tutorías del personal de la empresa Retena S.A.
	Aporte de los estudiantes responsables del proyecto	1400	15,96	Rubro correspondiente a adquisición de materiales
Costos indirectos	Costos indirectos durante la elaboración del proyecto	970	11,06	Costos durante la elaboración del proyecto y pruebas del mismo
	Total	8770	100	

- La universidad de las Fuerzas Armadas aportó al proyecto con el 29.65% del mismo, correspondiente a tutorías de docentes
- La empresa Retena S.A. colaboró con el 43.33% del proyecto por concepto de asesoría técnica, además de insumos y materiales para la realización del proyecto
- La adquisición de materiales se financió por parte de los estudiantes responsables del proyecto

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES

- Se realizó el análisis del caldero York Shipley del laboratorio de conservación de la energía, empleando manuales de usuario e investigando características técnicas de los diferentes componentes del caldero se pudo evaluar su estado inicial, y a partir de ahí, mediante la aplicación de mantenimiento correctivo, llevar a cabo la puesta a punto de su sistema térmico, como resultado se entrega un caldero completamente operativo, funcionando bajo parámetros y normas industriales que brindan seguridad a docentes y estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica durante sus prácticas de laboratorio.
- Se elaboró el marco teórico del caldero York Shipley, investigando en diferentes fuentes de consulta como: libros, manuales de usuario, documentos científicos y trabajos de titulación, esta base teórica enfocada al estudio y comprensión de los elementos del caldero, permitió mediante inspección visual y desmontaje, analizar el estado de los mismos, posteriormente asesorados por personal de la empresa Retena S.A., se pudo determinar de manera individual si su funcionamiento cumplía los parámetros técnicos recomendados por el fabricante para el óptimo funcionamiento del caldero.
- Teniendo como base el estudio de los diferentes elementos y componentes del caldero York Shipley, y mediante la aplicación de conceptos termodinámicos, se pudo analizar e identificar la causa de pérdidas en el proceso de combustión, las cuales impedían una adecuada transferencia de calor afectando directamente a la eficiencia del equipo. Después de reparar y en algunos casos reemplazar partes afectadas, se pudo obtener una mejor y más completa combustión, los gases secos en la chimenea disminuyeron al

igual que la humedad en el aire, consecuencia de esto la eficiencia bajo las nuevas condiciones de operación es de 81.07%, habiéndose incrementado 4.07% en relación a sus condiciones de operación iniciales, generando así un mejor aprovechamiento de recursos como combustible y energía empleada por el caldero.

RECOMENDACIONES

- Realizar limpieza frecuente en el área donde se encuentra el caldero, es importante mantener la superficie y sus diferentes elementos libres de polvo o suciedad que pudieran ocasionar taponamientos u obstrucciones por su acumulación.
- Verificar continuamente que el sistema de tuberías no presente fugas, además de que las conexiones al caldero se encuentren en buen estado. A la par verificar el funcionamiento de las válvulas del caldero, su operatividad es importante para el buen funcionamiento del sistema
- Mantener al tanque de almacenamiento con una dosificación adecuada de químicos ADL para tratar al agua, y evitar problemas de corrosión, incrustaciones como se ha mencionado en el presente trabajo.
- Realizar verificaciones periódicas de los manómetros de presión, considerando que la presión es un aspecto delicado en el funcionamiento del caldero y su seguridad, es importante comprobar que no existan errores metrológicos en ellos.
- Seguir el plan de mantenimiento preventivo (PMP) sugerido en el capítulo IV del presente documento, con el objetivo de que no se presenten problemas en el funcionamiento del caldero, sus sistemas y partes

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESYS Technologies. (2007). Series 300 VTB Installation Instructions. Pensilvania.

Baldor Reliance. (10 de Junio de 2019). Vertical P-Base Motors. Obtenido de Baldor Products:

<https://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/motors/ac-motors/pump/vertical-p-base-motors>

Bertomeu. (2015). Incrustaciones en calderas de vapor a fuel-oil. Fraga.

Boiler Supplies. (2019). McDonnell Miller Series 157. Obtenido de

<https://www.boilersupplies.com/mcdonnell-miller-controls/mcdonnell-miller-series-157/259>

BOSCH . (2018). Hot water boilers. Nuernberger.

BOSCH, Eberhard, F., & Tuffner, M. (2016). Comparativa de caldera pirotubular y caldera

acuotubular. Obtenido de Informe Técnico: https://www.bosch-industrial.com/files/fb013_sp.pdf

Cengel, Y. (2012). Termodinámica. Reno: Mc Graw Hill.

Clayton sistemas integrales de vapor . (2018). Información técnica económica y rentabilidad sobre operación de calderas de vapor y agua caliente. California.

Crosby Valve Inc. (1997). Pressure Relief valve, engineering handbook.

García, F., & Redrobán, C. (2015). *Puesta en marcha y mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) del caldero pirotubular de la facultad de mecánica*. Riobamba : Escuela superior politécnica de Chimborazo.

García, J. (2013). *Diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera pirotubular horizontal*. Riobamba: Universidad Politécnica de Chimborazo.

- Global Industrial. (04 de Junio de 2019). Suntec Model J Single-Stage Fuel Unit . Obtenido de <https://www.globalindustrial.com/p/hvac/pumps-circulators/fuel-oil-pump/st-model-j-single-stage-fuel-unit-j4pa-c1000g-rh-rh-1725-3450-rpm-2-35-gph-300-psi>
- Honeywell. (1994). 7800 Series RM7890A,B,C Relay Module. Charlotte.
- Honeywell. (2003). L404A-D,F; L604A,L Pressuretrol Controllers. Minneapolis.
- Huamancayo, C. (2017). "Análisis de un caldero pirotubular de 300 BHP, usando combustibles y glp, para mejorar la eficiencia, en la empresa Agromantaro S.A.C.". Huancayo: Universidad Nacional del centro del Perú.
- IC MEGA. (2019). Topog-e boiler gaske. Obtenido de <https://www.icmega.com/product-page/topog-e-3-1-2-x-4-1-2-x-1-2-e-handhole-boiler-gasket>
- Indian Standard. (1999). Specification for cooper gate, globe and check valves por water purposes. Nueva Delhi.
- Ludwig, E. (1965). Applied process desgin for chemical and petrochemical plants. Butterworth: Gulf professional publishing.
- McWANE International . (2018). Válvula de compuerta de sello elástico. California.
- Miranda, R. (2018). Calderas: *Clasificación, usos y mecanismos de transferencia de calor*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Oelker, A. (2018). Tratamiento de agua para calderas. Santiago de Chile.
- Power Flame Incorporated. (2011). Nova Plus, Installation and operation Manual. Parsons City.
- Pumisacho, B., & Avalos, J. (2018). *Diseño y construcción de sistemas periféricos: agua, combustible, control y gases de combustión del caldero fulton, para suministrar vapor a equipos dependientes*. Sangolquí: ESPE.

- Salguero, F., & Buenaño, P. (2018). *Mantenimiento de cuarto y quinto escalón e implementación de un sistema de adquisición de datos para el supercalentador de la planta de vapor del laboratorio de conversión de la energía*. Sangolquí: Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.
- Secretaría de ambiente del distrito metropolitano de Quito. (2018). Límites máximos permisibles de emisiones para plantas termoeléctricas. Quito.
- Swagelok. (2018). Válvulas de bola, servicio general y aplicaciones especiales. México.
- Tesquimsa S.A. (2018). Parámetros necesarios y recomendados para el agua de alimentación del caldero FULTÓN. Quito.
- Uceda, J. (2012). *Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes*. Madrid: La suma de todos .
- Valmec. (2015). Innovación y tecnología para el control de fluidos. Buenos Aires.
- Venamet. (2018). Controles de calderas. Quito.
- Worldmeteo. (15 de Junio de 2019). Tiempo en Sangolquí. Obtenido de <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/ecuador/sangolqui/tiempo-137415/>
- York Shipley Global. (s.f.). Series 300 VTB Installation Instructions . North Hills: AESYS contact.