

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



**“DIAGNÓSTICO EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN DE
FALLAS EN UNA CALDERA PIROTUBULAR DE 150 BHP PARA
PROPONER PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LA
CIUDAD DE AREQUIPA”**

TESIS

PRESENTADA POR:
CRISTIAN JOHNATAN CARRION SALAZAR
EDER WILSON MAQUERA CUSACANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PUNO – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA

DIAGNOSTICO EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS
EN UNA CALDERA PIROTUBULAR DE 150 BHP PARA PROPONER
PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LA CIUDAD DE
AREQUIPA

TESIS PRESENTADA POR:

CRISTIAN JOHNATAN CARRIÓN SALAZAR
EDER WILSON MAQUERA CUSACANI
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

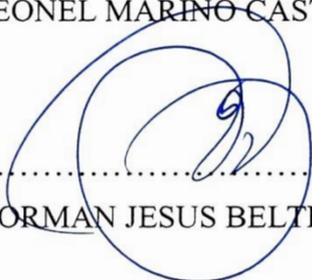


APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE : 
M.Sc. MARIO MAMANI PAMPA

PRIMER MIEMBRO : 
M.Sc. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

SEGUNDO MIEMBRO : 
Ing. LEONEL MARINO CASTILLO ENRIQUEZ

DIRECTOR / ASESOR : 
Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

TEMA: Máquinas Térmicas
ÁREA: Mecánica

FECHA DE SUSTENTACIÓN 21 DE DICIEMBRE DEL 2018

DEDICATORIA

A nuestro Dios antes que nada, por estar siempre con nosotros.

A nuestros padres Julio Carrión y Ana Salazar; Edilberto Maquera y Brigida Cusacani quienes son las personas que nos impulsan en todos nuestros objetivos.

A nuestras familias por confiar en nosotros y por permitirnos ser un orgullo.

A todos los ingenieros de nuestra querida carrera profesional, a ellos que están en constante dedicación y preparación para enseñarnos e inculcarnos todo su conocimiento.

AGRADECIMIENTO

A nuestra universidad, por todo lo que nos enseñó en nuestro día a día, formándonos conjuntamente con todas las personas que fueron partícipes de este logro, gracias a todos ustedes que por ello se ve el reflejo de culminar un paso en nuestras vidas. A nuestros padres que nos impulsaron a lograr este objetivo. A Dios nuestro principal apoyo e impulsador de lograr nuestros propósitos.

Al cuartel de Hunter en la ciudad de Arequipa que nos brindó ciertas facilidades para poder realizar esta tesis con el apoyo de sus integrantes, agradecer a todos ellos.

Es un logro muy especial para nosotros que espero llegue nuestro agradecimiento para todas esas personas y entidades, y también para todas aquellas personas que puedan leer este proyecto de tesis; a ellos gracias.

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	13

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.3. HIPÓTESIS	19
1.4. OBJETIVO GENERAL	19
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	20
2.2. MARCO CONCEPTUAL	22
2.2.1. Caldera.....	22
2.2.2. Tipos de calderas de vapor	23
2.2.2.1. Calderas acuotubulares	24
2.2.2.2. Calderas pirotubulares	25
2.2.3. Componentes fundamentales de las calderas pirotubulares	29
2.2.4. Combustión	30
2.2.4.1. Triángulo de la Combustión	32
2.2.4.2. Tipos de combustión	34
2.2.4.3. Parámetros de la Combustión.....	35
2.2.5. Propiedades Generales de los Combustibles	36
2.2.6. Mantenimiento	38

2.2.6.1. Tipos de mantenimiento	40
2.2.7. Tratamiento de Agua para Calderas	44
2.2.7.1. Parámetros de tratamiento de agua.....	44
2.2.7.2. Requerimientos Agua Alimentación y Caldera.....	45

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES.....	47
3.1.1. Equipos	47
3.1.1.1. Caldera Pirotubular.....	47
3.1.1.2. Quemador	48
3.1.1.3. Bomba de petróleo.....	48
3.1.1.4. Control de nivel de agua.....	48
3.1.1.5. Electrobomba de agua	49
3.1.1.6. Controles de Presión.....	49
3.1.1.7. Válvula de salida de vapor	49
3.1.1.8. Válvula de Seguridad	50
3.1.2. Instrumentos	50
3.1.2.1. Analizador de Gases	50
3.1.2.2. Termocupla digital	54
3.1.2.3. Psicrómetro.....	55
3.1.2.4. Barómetro.....	57
3.1.3. Equipos y materiales para mantenimiento predictivo.....	58
3.1.3.1. Para mantenimiento diario.....	58
3.1.3.2. Para mantenimiento mensual.....	59
3.1.3.3. Mantenimiento Anual.....	59
3.1.3.4. Equipos para mantenimiento de calderas	60
3.2. MÉTODOS.....	63
3.2.1. Determinación de las condiciones ambientales	64
3.2.1.1. Presión Atmosférica	64
3.2.1.2. Humedad Relativa	64
3.2.2. Arranque de la Caldera	65
3.2.3. Medición de datos experimentales	66

3.2.4.	Determinación del Flujo de Vapor (\dot{m}_v)	67
3.2.5.	Determinación del Flujo de Combustible (\dot{m}_c)	67
3.2.6.	Análisis de los gases de escape.....	68
3.2.7.	Determinación de la masa de gases de combustión (mg)	70
3.2.8.	Método para realizar el Balance Energético.....	72
3.2.8.1.	Determinación del Calor ganado por el agua o Calor Útil (Q_u) ..	72
3.2.8.2.	Calor perdido hacia el exterior por los gases de escape (Q_1)	73
3.2.8.3.	Calor perdido por combustión incompleta (Q_2)	74
3.2.8.4.	Calor perdido que se lleva el agua formada en el H_2 del combustible (Q_3).....	75
3.2.8.5.	Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q_4)	76
3.2.8.6.	Calor perdido por radiación, convección y otros (Q_5).....	77
3.2.8.7.	Diagrama de Sankey.....	77
3.2.9.	Parámetros indicadores del buen funcionamiento	80
3.2.9.1.	Factor de evaporación (f_e)	80
3.2.9.2.	Evaporación equivalente (E_e)	80
3.2.9.3.	Producción de Caldera (P_v)	81
3.2.9.4.	Eficiencia de la Caldera (η).....	81

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Datos experimentales medidos en la Sala de Máquinas.....	83
4.1.1.	Datos experimentales del Análisis de Gases de Combustión	84
4.2.	Determinación de las condiciones ambientales.....	85
4.3.	Determinación del Flujo de Masa de Vapor (\dot{m}_v).....	88
4.4.	Determinación del Flujo de Combustible (\dot{m}_c).....	89
4.5.	Análisis de los gases de combustión o humos.....	91
4.5.1.	Determinación de la relación aire combustible real ($r_{a/cR}$)	92
4.5.2.	Determinación de la relación aire combustible teórica o completa.....	94
4.5.3.	Determinación del porcentaje de exceso de aire	95
4.6.	Determinación de la masa de los gases de combustión (mg)	95
4.7.	Cálculos del Balance Energético o Térmico de la Caldera	96

4.7.1. Cálculo del calor ganado por el agua o calor útil (Q_u)	96
4.7.2. Cálculo del calor perdido hacia el exterior por los gases de escape (Q_1)..	98
4.7.3. Determinación del Calor perdido por combustión incompleta (Q_2).....	99
4.7.4. Determinación del calor perdido que se lleva el agua formada en el H_2 del combustible (Q_3).....	100
4.7.5. Determinación del calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q_4).....	101
4.7.6. Determinación del Calor perdido por radiación, convección y otros factores (Q_5).....	104
4.7.7. Representación de balance energético en el Diagrama de Sankey	105
4.8. Determinación de los parámetros indicadores del buen funcionamiento	108
4.8.1. Determinación del Factor de evaporación (f_e).....	108
4.8.2. Determinación de la evaporación equivalente (E_e)	108
4.8.3. Determinación de la Producción de Caldera (P_v)	109
4.8.4. Determinación de la Eficiencia de la Caldera (η)	109
4.9. Discusión - Diagnóstico de Fallas	110
4.9.1. Calor perdido por los gases de escape (Q_1)	113
4.9.2. Calor perdido por combustión incompleta (Q_2)	113
4.9.3. Calor perdido por radiación, convección y otros factores (Q_5)	115
4.9.4. Calor perdido por agua de formación (Q_3)	116
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS.....	124
ANEXOS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Caldera pirotubular.	23
2.2. Caldera acuotubular	25
2.3. Caldera pirotubular horizontal.	26
2.4. Caldera de dos pasos de gases.	27
2.5. Caldera de triple paso de humos.	28
2.6. Triángulo de la combustión.	33
3.1. Caldera Pirotubular INTESA 150 BHP	50
3.2. Analizador de gases - MTEST	54
3.3. Termocupla digital	55
3.4. Psicrómetro	57
3.5. Barómetro	58
3.6. Expansores para acampanar Tubos de Calderas	60
3.7. Expansor Rebordeador de un Rodillo	60
3.8. Motores de Rolado en Ángulo Recto.....	61
3.9. Super Extractor de Tubos	61
3.10. Martillo Neumático de Alta Potencia	62
3.11. Expansores para Acampanar Tubos de Calderas	62
3.12. Bombas Hidráulicas	63
3.13. Diagrama Psicrométrico	65
3.14. Proceso termodinámico en la caldera	73
3.15. Diagrama de Sankey - Para caldera eficiente.	79
4.1. Determinación de la humedad relativa de Arequipa en el diagrama Psicrométrico	87
4.2. Consumo del Petróleo en el tanque.....	89
4.3. Proceso en el Generador de Vapor en el Diagrama P-h.	97
4.4. Determinación de la relación de humedad o humedad específica.	103
4.5. Diagrama de Sankey	107
4.6: Análisis Energético Comparativo para Diagnosticar fallas en la caldera.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Poderes caloríficos de los combustibles.	37
2.2. Pesos específicos de los combustibles.	38
2.3. Densidades de los combustibles.	38
2. 4. Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486	46
2. 5. Requerimientos agua caldera según BS 2486.....	46

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado la instalación de generadores de vapor por el potencial energético y la diversidad de aplicaciones que tienen el vapor de agua. Sectores como el hotelero, hospitalario e industrial han incrementado la demanda de dicho recurso en aplicaciones para el calentamiento de agua, cocción de alimentos, generación de electricidad, esterilización y otras. En este contexto se aplicó los conocimientos de la termodinámica y de las máquinas térmicas al diagnóstico experimental de la Caldera Piro tubular de 150 BHP de la Tercera Región Militar de Arequipa, con el objetivo de resolver los problemas de detección de fallas en el funcionamiento de la caldera, las cuales se predijeron a través de un análisis comparativo energético de los diagramas de Sankey de la caldera con funcionamiento eficiente de referencia y la de la caldera en estudio de la tesis; deduciendo que si el porcentaje del calor perdido es mayor o menor que el recomendado nos permite detectar qué sistema de la caldera presenta fallas para planificar el mantenimiento predictivo respectivo.

La metodología que se utilizó para realizar el diagnóstico predictivo de fallas en la caldera está basado en el balance energético para establecer si la energía aprovechada y la pérdida están entre los rangos prefijados para su funcionamiento y de no ser así, analizar a qué se deben las discrepancias y en base a ello detectar las fallas de la caldera (Código PTC4.1 The American Society of Mechanical Engineer).

Los resultados obtenidos del balance energético se presentaron gráficamente en el diagrama de Sankey el cual se analizó comparativamente respecto al diagrama de Sankey recomendado para calderas piro tubulares; en base al cual se estableció que las pérdidas de calor por gases de escape es 45% mayor que el recomendado, el calor

perdido por combustión incompleta es 400% mayor que el recomendado, el calor perdido por agua de formación es 100% mayor que el recomendado y el calor perdido por radiación, convección y otros es 100% mayor que el recomendado. La frecuencia principal de fallas está relacionada con la excesiva pérdida de calor por combustión incompleta lo que implica fallas en el control de regulación del % de exceso de aire (15% - 35%), la excesiva temperatura del aire de la combustión se debe disminuir haciendo el mantenimiento al material refractario y aislamientos de tuberías y accesorios de la caldera. Las incrustaciones de los tubos del lado del fuego deben disminuirse por su efecto aislante que recalienta la caldera, por lo que el tratamiento del agua que ingresa a la caldera se deberá controlar y supervisar.

Las conclusiones del análisis energético comparativo de todos los calores perdidos nos permitieron el diagnóstico y predicción de fallas para proponer el mantenimiento predictivo para la caldera.

Palabras clave: Caldera, diagnóstico, balance energético, fallas, mantenimiento predictivo, diagrama Sankey.

ABSTRACT

In the last years the installation of generators of vapor has been increased by the energy potential and the diversity of applications that have the vapor of water. Sectors like the hotel, hospital and industrial have increased the demand of this resource in applications for the heating of water, cooking of foods, electricity generation, sterilization and others. In this context it was applied the knowledge of the thermodynamics and of the thermal machines to the experimental diagnosis of the Boiler Pirotubular of 150 BHP of the Third Military Region of Arequipa, with the objective of solving the problems of detection of flaws in the operation of the boiler, which were predicted through a comparative energy analysis of the diagrams of Sankey of the boiler with efficient operation of reference and that of the boiler in study of the thesis; deducing that if the percentage of the lost heat is bigger or smaller than the one recommended it allows us to detect what system of the boiler it presents flaws to plan the maintenance respective predictive.

The methodology that was used to carry out the diagnostic predictive of flaws in the boiler is based on the energy balance to settle down if the taken advantage of energy and the loss are among the ranges preset for its operation and of not being this way, to analyze to what the discrepancies are owed and based on it to detect the flaws of the boiler (Code PTC4.1 The American Society of Mechanical Engineer).

The obtained results of the energy balance showed up graphically in the diagram of Sankey which was analyzed comparatively regarding the diagram of Sankey recommended for boilers pirotubulares; based on which settled down that the losses of heat for escape gases are 45 bigger% that the one recommended, the heat lost by incomplete combustion is 400 bigger% that the one recommended, the heat lost by

formation water is 100 bigger% that the one recommended and the heat lost by radiation, convection and others are 100 bigger% that the one recommended. The main frequency of flaws is related with the excessive loss of heat for incomplete combustion what implies flaws in the control of regulation of the% of excess of air (15% - 35%), the excessive temperature of the air of the combustion he/she should diminish making the maintenance to the refractory material and isolations of pipes and accessories of the boiler. The inlays of the tubes on the side of the fire should diminish for their insulating effect that reheats the boiler, for what the treatment of the water that enters to the boiler will be controlled and to supervise.

The conclusions of the energy comparative analysis of all the lost heats allowed us the diagnosis and prediction of flaws to propose the maintenance predictivo for the boiler.

Keywords: Boiler, diagnosis, energy balance, you fail, maintenance predictive, diagram Sankey.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la Ingeniería Mecánica Eléctrica el mantenimiento de las calderas constituye un área de especialización importante para el desarrollo profesional de la Ingeniería Electromecánica en la región Puno.

Las calderas son máquinas térmicas cuya función es la generación de agua y vapor a una presión y temperatura determinada para los diferentes procesos industriales como la cocción y pasteurización en la industria alimentaria, esterilización de utensilios y trajes utilizados en el sector hotelero y hospitalario, en la generación de energía eléctrica, etc.

Actualmente el crecimiento de la demanda energética a nivel mundial, el incremento del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía han provocado la escasez de las reservas de los recursos energéticos y; es evidente el creciente impacto ambiental negativo asociado a procesos de generación de energía que está llegando a niveles donde el cambio climático es irreversible, como se aprecia en la región de Puno. Por lo tanto nuestra industria necesita ser eficiente en el uso de los recursos energéticos, empleando una menor cantidad de energía en relación al beneficio técnico económico obtenido y el impacto ambiental ocasionado; por lo que es necesario implementar proyectos en eficiencia energética, aplicando instrumentos y metodologías para el diagnóstico energético y ambiental de máquinas para su mantenimiento predictivo y, así aumentar la rentabilidad de los procesos industriales.

Las calderas son máquinas de mayor consumo energético en el sector industrial y a su vez de mayor potencial de ahorro energético. El presente trabajo parte de una recopilación bibliográfica que brinde un marco de referencia a la aplicación de los conocimientos de la termodinámica y de las máquinas térmicas para realizar el diagnóstico experimental de una caldera de 150 BHP de potencia, basado en el balance energético para el uso racional y eficiente de la energía y proponer un plan de mantenimiento predictivo.

La metodología de investigación utilizada se basa en el código PTC4.1 para unidades de generación de vapor de la ASME, cuyos resultados se graficarán en el diagrama de Sankey y en base al cual se realizó el diagnóstico de fallas en la caldera y se propuso el plan de mantenimiento predictivo.

En el panorama energético mundial y del Perú el sector industrial tiene mayor demanda energética y la perspectiva de un elevado potencial de ahorro basado en la eficiencia energética, y el vapor generado por las calderas también puede ser considerado como un recurso energético, y un servicio muy empleado en la industria.

Entre el 40% y 60% de la energía empleada en la industria a nivel mundial es empleada para la generación de vapor, y es una razón más para que la operación eficiente de las calderas y el mantenimiento oportuno, representan una relevante oportunidad para disminuir los consumos energéticos, los costos de operación y aumentar la rentabilidad de los procesos industriales.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El mantenimiento es importante en el sector industrial, lo que se refleja en la necesidad de mejorar, conservar y permitir el buen funcionamiento de un sistema o máquina para así obtener una mayor eficiencia y evitar costos extras producto de una falla imprevista.

La planificación y programación del mantenimiento son actividades amplias y complejas. La alta tecnología tales como la robótica, la fabricación automatizada, ayuda a las empresas a producir más productos con mayor calidad; pero estas máquinas nuevas y complicadas son costosas tanto en el precio de adquisición como la reparación y el mantenimiento.

Los trabajos de reparación en la Caldera se pueden reducir o evitar con un plan de mantenimiento predictivo y un tratamiento adecuado del agua que ingresa a la caldera. El tipo y las frecuencias de fallas más comunes en las calderas son: Falla de controles eléctricos y/o electrónicos debido al uso continuo y al calor que generan y que puedan soportar, Falla del quemador debido a fallas en el suministro de caudal o presión de la bomba de combustible y defectos de las boquillas por desgaste lo cual produce una mala atomización del combustible, Fallas en válvulas de seguridad y servicio por fugas indeseadas, Fallas en los tubos de fuego por fugas cuando el tubo expandido por el calor se afloja causando aumento o disminución de la presión, Fallas en el material refractario que determinan pérdidas de calor por los mecanismos de transferencia de calor.

En base a estas consideraciones nos planteamos la problemática de realizar el diagnóstico del funcionamiento de la caldera de 150 BHP de la Tercera Región Militar de Arequipa, aplicando el balance energético para predecir las posibles fallas para proponer su plan de mantenimiento predictivo.

En ese contexto nos formulamos las preguntas de investigación que son las guías del desarrollo de la tesis:

¿Es posible realizar el diagnóstico experimental del balance energético de la caldera para detectar sus fallas?

¿Es posible analizar el diagrama de Sankey del balance energético para diagnosticar las fallas de la caldera y proponer su plan de mantenimiento predictivo?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Los generadores de vapor o calderas es una especialización en la Ingeniería Mecánica Eléctrica, actualmente en la región el número de calderas se ha incrementado considerablemente para su utilización en hoteles, hospitales e industrias que requieren el vapor a cierta presión y temperatura. Por consiguiente la realización de la tesis contribuyó a la capacitación en esta área importante de la Ingeniería Mecánica con la perspectiva futura de generar empresas puneñas que se dediquen al mantenimiento y fabricación de calderas, aspectos justificativos del desarrollo de la tesis. Además se establece una metodología de diagnóstico de fallas en la caldera fundamentado en la eficiencia energética y, que nos permitió proponer su programa de mantenimiento.

El funcionamiento eficiente de las calderas del Perú, gracias a un programa de mantenimiento predictivo implicará un gran ahorro de dinero por la menor cantidad de combustible a utilizar.

El mantenimiento de calderas industriales es una fuente importante de puestos de trabajo para los ingenieros mecánicos eléctricos.

Académicamente elevará el nivel académico de nuestra Escuela Profesional, al establecer en los laboratorios del área de máquinas térmicas los ensayos de balances energéticos de calderas y propiciar la investigación formativa.

1.3. HIPÓTESIS

Los conocimientos de la termodinámica y máquinas térmicas nos permitirá diagnosticar experimentalmente a través de un balance energético las fallas técnicas de una caldera pirotubular de 150 BHP para planificar su mantenimiento predictivo.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Diagnosticar experimentalmente una caldera de 150 BHP a través de un balance energético para detectar sus fallas de funcionamiento y operación para planificar su mantenimiento predictivo.

1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar experimentalmente el ensayo técnico del análisis de gases de la caldera de 150 BHP.
- Realizar el balance energético de la caldera de 150 BHP.
- Analizar energéticamente el diagrama de Sankey y diagnosticar las fallas de funcionamiento de la caldera de 150 BHP para planificar su mantenimiento predictivo.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

2.1.1. Rivera, E. (2011). Sistema de gestión de mantenimiento industrial. Tesis para optar el título de ingeniero industrial de la Facultad de ingeniería industria! de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima, en la cual como objetivo se hace un análisis de la realidad de! mantenimiento industrial en nuestro país para la pequeña y mediana empresa, para planificar una adecuada gestión de mantenimiento de equipos e infraestructura. Se concluye que una correcta y adecuada implementación de un sistema de mantenimiento industrial basado en términos de calidad, seguridad, conservación del medio ambiente y contabilidad, se reflejará en la disminución del coste de! mantenimiento. La metodología de la tesis permiten obtener indicadores a tomar en cuenta para la correcta implementación de un sistema de gestión del mantenimiento industrial.

2.1.2. Tamajon, Carlos & Mojican, S. (2015). Análisis de fallas de calderas pirotubulares y su impacto ambiental. Centro de información y gestión tecnológica de Santiago de Cuba. Investigación en la que se realiza un estudio integral de calderas pirotubulares basado en la teoría de la fiabilidad y teorías de diseño, para identificar las causas y efectos de las fallas en este tipo de calderas. De! mismo modo se derivan soluciones para la reducción de su frecuencia, consecuencias y riesgos asociados al ambiente. Se realizó además un análisis de impacto ambiental directo en zonas aledañas a estos equipos mediante la medición de la concentración de los contaminantes fundamentales.

2.1.3. Escudero, J, (2001). Mantenimiento de generadores de vapor y su equipo auxiliar en una fábrica de azúcar. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima. Se establece como objetivo la determinación del tipo de mantenimiento para la fábrica. En las conclusiones se manifiesta que en la planta de generación de vapor es necesario que el rendimiento térmico sea el mejor, con producciones de vapor máximos y constantes y que los gastos de mantenimiento sean los menores; para lo cual se debe recuperar el calor perdido en gases de escape con dispositivos de recuperación de calor y, utilizan la tecnología de la combustión de bagazo.

La implementación de un programa de mantenimiento preventivo es fundamental en esta planta para su funcionamiento ininterrumpido, por medio de disminución de fallos o paralizaciones de equipo los que afectan el desarrollo de! proceso industrial. También la implementación del control de calidad del tratamiento, del agua de alimentación de la caldera evitará problemas en roturas de tubos, incrustaciones y ayudará en la vida útil de! generador de vapor.

2.1.4. Vilca, E. (2003). Instalación y evaluación de un Generador de vapor tipo vertical de dos pasos de 10 BHP. Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, cuyas conclusiones son que la instalación de la caldera se hizo de acuerdo a las normas vigentes y que su funcionamiento permitirá la realización de prácticas de laboratorio.

2.1.5. Montalvo, L. (2009). Evaluación y comparación técnico-económica del rendimiento de la caldera del comedor de la UNA - Puno. Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Nacional del Altiplano, en el que se realizan un análisis comparativo de los parámetros de funcionamiento de

las calderas con petróleo y gas licuado de petróleo, concluyéndose que desde el punto de vista económico-técnico el funcionamiento de la caldera con gas licuado de petróleo es recomendable.

2.1.6. Sermin S.A. (2005). Calderas, ablandadores, plantas industriales, reparaciones y mejoramiento. Empresa dedicada a la venta de calderas y accesorios, su manual consta de la teoría referente a calderas, tratamiento de agua, operación de calderas y brinda asesoramiento profesional tanto en el aspecto teórico como en la práctica experimental del funcionamiento de calderas.

2.1.7. Laboratorio de Ingeniería Mecánica II (2010). Generador de Vapor, publicación de la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima, constituye una guía de ensayos técnicos, con una teoría mínima sobre calderas y describe el procedimiento para realizar el balance energético de la caldera y teoría respecto al ablandamiento del agua con zeolita, proceso necesario para el funcionamiento óptimo de la caldera.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Caldera

Caldera es un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor que la atmosférica.

Las calderas o generadores de vapor son dispositivos cuyo objetivo es:

- a) Generar agua caliente para calefacción y uso general.
- b) Generar vapor para plantas de fuerza, procesos industriales o calefacción.

Funcionan mediante la transferencia de calor, producido generalmente al quemarse un combustible, al que se le entrega el agua contenida o que circula dentro de un recipiente metálico.

Figura 2.1. Caldera pirotubular.



Fuente: Empresa INTESA Lima – Perú

2.2.2. Tipos de calderas de vapor ¹

Fundamentalmente son dos los tipos de calderas de vapor que normalmente suelen utilizarse: caldera de tubos de humo o pirotubulares y calderas de tubos de agua o acuotubulares.

Las calderas de tubos de humo o pirotubulares se pueden explicar como un cilindro compacto de agua, atravesado longitudinalmente por un haz de tubos por los que circulan la llama y/o los humos. Lógicamente, los humos y la llama pasarán por el interior de los tubos de acero, los cuales estarán rodeados de agua.

¹ Bosch (2013). Calderas Industriales, Alemania. Editorial Bosch Industriekessel GmbH.

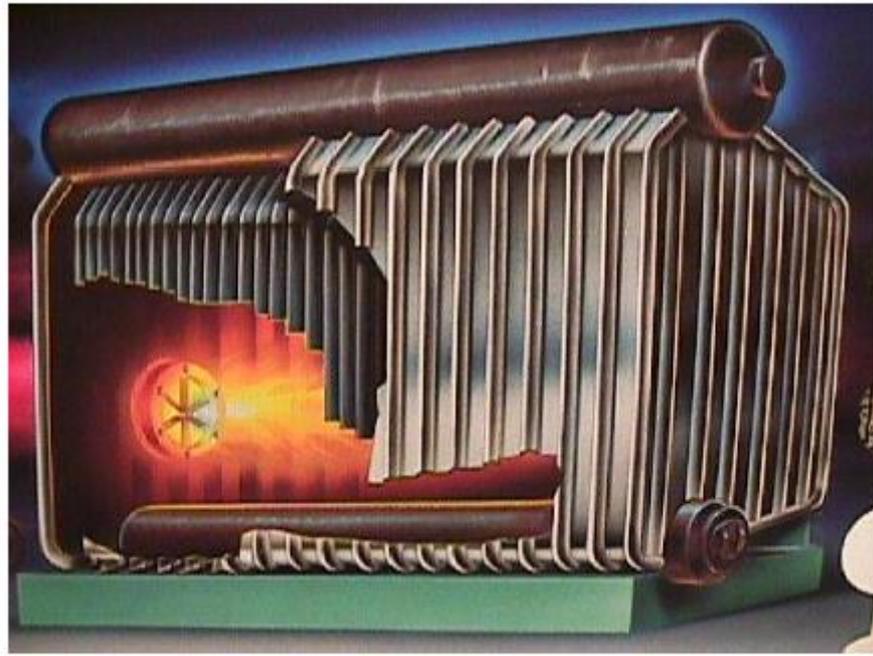
En el caso de las calderas acutubulares, el agua está en parte o casi toda contenida en haces de tubos de acero rodeados por la llama y los gases calientes de la combustión. Teniendo en cuenta el elevado número de tubos que pueden instalarse, la superficie de calefacción puede ser muy grande para dimensiones relativamente reducidas. Por esta razón, su puesta a régimen es muy rápida, teniendo la posibilidad de producir vapor a elevadas presiones.

2.2.2.1. Calderas acuotubulares

Son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bar.

En el caso de calderas de vapor, el título de vapor es muy bajo (0,85), es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es muy alto (15%) si no se les añaden subconjuntos secadores del vapor, tales como recalentadores o sobrecalentadores.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas suele ser superior al requerido para otro tipo de calderas.

Figura 2.2. Caldera acuotubular

Fuente: Kohan A. (2011). Manual de Calderas, Madrid. Editorial McGraw Hill

2.2.2.2. Calderas pirotubulares

Son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar.

El vapor producido por las mismas suele tener un título de vapor cercano al 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (3%), no siendo necesario instalar equipos auxiliares complementarios.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares.

Las calderas pirotubulares se clasifican en función de la disposición del haz tubular en:

- a) **Calderas horizontales:** el haz tubular está dispuesto de la parte delantera a la trasera de la caldera.

Figura 2.3. Caldera pirotubular horizontal.



Fuente: Kohan A. (2011). Manual de Calderas, Madrid. Editorial McGraw Hill

- b) **Calderas verticales:** el haz tubular está dispuesto de la parte inferior a la parte superior de la caldera.

Las calderas pirotubulares se clasifican en función del número de haces tubulares en:

- c) **Calderas de dos (2) pasos de gases.**

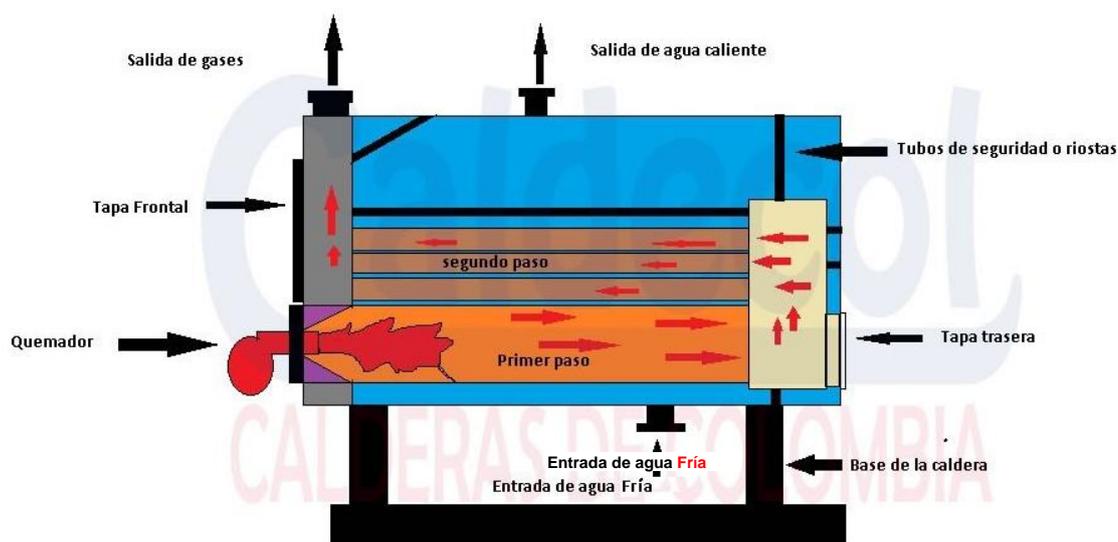
En el diseño de dos pasos de humos, ver Fig. 2.4, se distinguen claramente dos vías de paso autónomas de circulación de los productos de combustión. Se puede diferenciar una cámara cilíndrica de combustión denominada hogar, localizada en la parte inferior de la caldera y rodeada por una pared posterior totalmente refrigerada por agua (cámara húmeda).

Los gases de combustión producidos por el quemador en la parte posterior de la cámara de combustión (hogar) fluyen en sentido inverso a través del hogar volviendo hacia el núcleo de la llama por la zona exterior de la misma hasta la zona delantera de la caldera para introducirse en los tubos del segundo paso de humos.

Seguidamente, los gases de combustión de la caldera son dirigidos hacia la caja de gases trasera y evacuados al exterior.

Las calderas que se basan en este principio se caracterizan por su bajo rendimiento, así como por el alto contenido de sustancias contaminantes en sus gases de combustión.

Figura 2.4. Caldera de dos pasos de gases.



Fuente: Rodríguez, J. (2012). Operación de Calderas Industriales, Lima, Editorial COES

d) Calderas de tres (3) pasos de gases.

En el diseño de tres pasos de humos, ver Fig. 4.5, se distinguen claramente tres vías de paso autónomas de sentido único de circulación de los productos de combustión.

Se puede diferenciar una cámara cilíndrica de combustión denominada hogar (1),

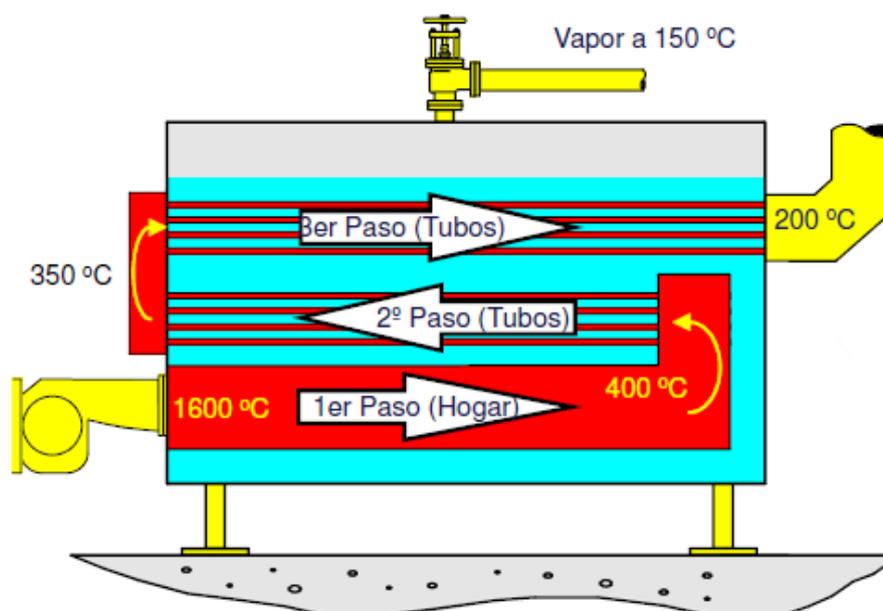
localizada en la parte inferior de la caldera y rodeada por una pared posterior totalmente refrigerada por agua (cámara húmeda).

Los gases de combustión producidos por el quemador en la parte posterior de la cámara de combustión (hogar) fluyen a través de los tubos de humos (2) en el segundo paso de humos.

Seguidamente, los gases de combustión de la caldera cambian de dirección en la parte frontal de la caldera, pasando a través de los tubos de humos (3) en el tercer paso de humos, hacia el conducto de expulsión de gases (4), por el que se evacúan al exterior.

Las calderas que se basan en este principio se caracterizan por su alto rendimiento, así como por el bajo contenido de sustancias contaminantes en sus gases de combustión. Estas calderas pueden ser instaladas cumpliendo las exigencias medioambientales más rigurosas.

Figura 2.5. Caldera de triple paso de humos.



Fuente: Rodríguez, J. (2012). Operación de Calderas Industriales, Lima, Editorial COES

2.2.3. Componentes fundamentales de las calderas pirotubulares ²

Los componentes que forman las calderas pirotubulares son los siguientes:

a) Envoltente exterior o virola exterior.

Este elemento es de forma cilíndrica y es el encargado de contener los fluidos (agua/vapor) y evitar que estos salgan al exterior, en la misma van montadas las tubuladuras de control y supervisión, tales como los controles de nivel, los indicadores ópticos de nivel y orificios de inspección del lado de agua, etc.

b) Cámara de combustión u hogar de combustión.

La cámara de combustión, de construcción cilíndrica y disposición horizontal, puede fabricarse en ejecución lisa u ondulada, en función del tamaño de la caldera y de la presión de trabajo de la misma. Es la encargada de contener la llama del quemador e iniciar el intercambio de energía por radiación.

c) Cámara de inversión de gases (solo en las calderas de tres pasos de gases).

Este elemento es el encargado de reconducir los gases de la combustión hacia el haz tubular o II (2º) paso de gases, haciendo cambiar de dirección a los mismos. Por regla general, esta cámara está totalmente refrigerada por agua, y construida de forma cilíndrica y horizontal. En calderas de bajo rendimiento, uno de los dos fondos no está refrigerado por agua, sino que lo está de una mampostería de cemento refractario.

² Rodríguez, J. (2012). Operación de Calderas Industriales, Lima, Editores COES.

d) Fondo delantero y trasero exterior.

De forma circular, van soldados a la virola exterior y, al igual que ésta, evitan que los fluidos salgan al exterior. En estas piezas van soldados los tubos de humos del II (2°) y III (3°) paso de gases, así como puertas de registro e inspección y cajones recolectores de gases.

e) Fondo delantero y trasero Interior (solo en calderas de tres (3) pasos de gases).

De forma circular, van soldados a la virola de la cámara de inversión.

Su misión es la de contener los productos de la combustión. En el fondo delantero van soldados los tubos de segundo paso de gases y en el fondo trasero van soldados entre éste y el fondo trasero exterior unos tubos huecos (tubos stay) para dar al conjunto robustez y flexibilidad.

f) Haz tubular (de 1 o 2 secciones en función de las calderas de 2 o 3 pasos de gases).

Son conjuntos formados por una cantidad variable de tubos, por los cuales circulan los gases de la combustión por su interior. Son los encargados de la transmisión por convección.

2.2.4. Combustión ³

La casi totalidad de las actividades de nuestra sociedad se basan en el uso de la energía en sus distintas expresiones, desde el uso de un vector energético como es la electricidad para la iluminación, motores eléctricos y equipos electrónicos, hasta el uso

³ Levenspiel, O. (2011). Fundamentos de Termodinámica, México Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

de fuentes de energía como son los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos en la cobertura de nuestras demandas: térmicas.

Precisamente en este último uso de la energía, la cobertura de demanda: térmicas para sus distintos usos, el proceso fundamental utilizado es la combustión de los denominados combustibles.

Combustión es el conjunto de procesos físico-químicos en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

Las reacciones básicas de combustión corresponden a las reacciones de oxidación del carbono (C) y del hidrógeno (H) mediante oxígeno que puede aportarse en forma pura (oxicombustión) o mediante el aporte de aire que lo contiene en una proporción media del 21%. Estas reacciones son:



Pero estos dos componentes químicos no se encuentran habitualmente en estado puro para actuar como combustibles (salvo el carbono en el carbón de origen fósil). Los combustibles tienen una composición general que se puede expresar como C_aH_b y cuya reacción de combustión es:



La combustión no es realmente una única reacción química, sino que se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión:

- **Fase de prerreacción (formación de radicales):** el combustible se descompone dando lugar a la formación de *radicales*, que son unos compuestos intermedios inestables y muy activos, para que, de este modo, el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno. Estos radicales son del tipo H^+ , CO , CH_3^+ (en el caso del metano), OH^- , O^- .
- **Fase de oxidación:** en esta fase se produce la combinación entre radicales y el oxígeno de un modo exotérmico. Es cuando tiene lugar la propagación de la llama.
- **Fase de terminación:** en esta fase se forman los compuestos estables finales. El conjunto de estos compuestos es lo que se denominan "*gases de combustión*".

Aun existiendo en el conjunto de estas reacciones algunas endotérmicas y otras exotérmicas, el balance global es netamente exotérmico.

2.2.4.1. Triángulo de la Combustión

Para que se produzca la combustión, deben encontrarse en el espacio y en el tiempo tres elementos:

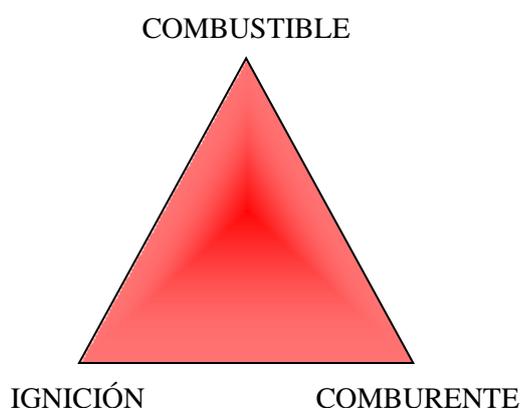
- Combustible.
- Comburente.
- Fuente de ignición.

El combustible y el comburente se deben encontrar en unas proporciones adecuadas, no produciéndose la combustión fuera de esas condiciones.

Adicionalmente, es precisa una fuente de energía que produzca el inicio de la combustión, lo que se denomina fuente de ignición, y que después mantenga esta combustión.

El conjunto de estos tres elementos es lo que se denomina triángulo de combustión, o triángulo del fuego, del cual se puede concluir que para mantener la combustión deben estar presentes todos los elementos.

Figura 2.6. Triángulo de la combustión.



Elaborado por el equipo de trabajo

Por otra parte, para que se inicie la combustión, es necesario que el combustible se encuentre en forma gaseosa. Por ello, los combustibles líquidos y sólidos precisan calentarse primero para que desprendan vapores que puedan inflamarse. En consecuencia, se pueden diferenciar, para cada material:

- **Temperatura de gasificación:** temperatura a la cual el combustible se gasifica.
- **Temperatura de ignición:** temperatura a la cual el combustible ya gasificado se inflama espontáneamente.

2.2.4.2. Tipos de combustión

De acuerdo con el nivel de combustión alcanzado y la cantidad de comburente aportado a la combustión, se pueden dar los siguientes tipos de combustión:

- **Combustión completa:** es aquella reacción en la que el combustible se quema hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 .
- **Combustión incompleta:** es aquella reacción en la que el combustible no se oxida completamente. Se forman sustancias, denominadas inquemados, que todavía pueden seguir oxidándose, por ejemplo, CO . Otros inquemados pueden ser H_2 , C_nH_m , H_2S y C . Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.
- **Combustión teórica o estequiométrica:** es la combustión realizada con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos, ya que el O_2 aportado a la combustión se consume completamente en la misma.
- **Combustión con exceso de aire:** es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados y es típica la presencia de O_2 en los humos. Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

- **Combustión con defecto de aire:** en esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

2.2.4.3. Parámetros de la Combustión

- **Coefficiente de exceso de aire:** es la relación entre el volumen de aire aplicado a una combustión y el volumen preciso para una combustión estequiométrica. Se representa mediante un número adimensional (n) cuyo valor puede ser:

$n=1$: aire preciso para una combustión estequiométrica.

$n<1$: defecto de aire, se dice que la mezcla es rica y la combustión incompleta.

$n>1$: exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre y la combustión puede ser completa.

Conseguir una mezcla perfecta entre combustible y comburente para obtener una combustión completa con una relación estequiométrica de masas entre ellos es muy difícil, por lo que habitualmente se incorpora un exceso de aire a la combustión. Esto evita la producción de inquemados, en especial el monóxido de carbono, aun cuando este exceso produce una reducción del rendimiento de combustión al tener que calentar un mayor volumen de aire, en especial sus inertes (N_2) que se evacúan con los productos de la combustión.

- **Rendimiento de la combustión:** se define como la relación entre el calor útil obtenido ($Q_{\text{útil}}$) y el calor total que aporta el gas combustible Q_{total} :

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{Total}}} \times 100$$

Es decir, la diferencia entre el calor total y el calor útil será el calor perdido en el proceso de combustión, que está formado por:

- **Pérdidas de calor por radiación en el entorno.** Por ejemplo, las paredes de la caldera aumentan su temperatura, produciendo una emisión de calor por radiación al entorno.
- **Pérdidas de calor sensible en los gases quemados.** Los productos generados en la combustión, así como los gases inertes que no reaccionan, se evacúan a una temperatura superior a la de entrada de combustible y comburente, por lo que en ellos se pierde cierta cantidad de calor en forma de calor sensible.

2.2.5. Propiedades Generales de los Combustibles ⁴

Independientemente del tipo de combustible, éstos se definen por una serie de propiedades genéricas, de las que se indican las siguientes:

a) Poder calorífico

Es la cantidad de energía (calor) desprendida por una unidad de combustible en su combustión completa para unas condiciones determinadas de presión y temperatura de los productos que reaccionan y de los productos resultantes.

Para los combustibles cuyos productos de la combustión (gases quemados) contienen vapor de agua, se debe diferenciar si la cantidad de energía medida incluye la energía correspondiente al calor de vaporización de ese vapor de agua o no.

⁴ Goñi, J. (2010). Máquinas Hidráulicas y Térmicas. Lima, Fondo Editorial Universidad de Lima.

- b) Poder calorífico superior (Hs):** es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0°C a presión atmosférica. En estas condiciones, el vapor de agua ha condensado, cediendo su calor latente de vaporización (en este caso de condensación). Se mide en kWh/kg (combustibles sólidos y líquidos) o en kWh/Nm³ (combustibles gaseosos).
- c) Poder calorífico inferior (Hi):** es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0°C a presión atmosférica, pero sin considerar el calor latente de condensación del vapor de agua producido. Se mide en kWh/kg (combustibles sólidos y líquidos) o en kWh/Nm³ (combustibles gaseosos).

Tabla 2.1. Poderes caloríficos de los combustibles.

Combustible	Unidad	Hi	Hs
Gas natural	(kWh/kg)	13,05	14,43
Propano comercial	(kWh/kg)	12,82	13,92
Butano comercial	(kWh/kg)	12,69	13,74
Gasóleo C	(kWh/kg)	11,56	12,23

Fuente: Guevara, R. (2013). Manual de Diagnósticos Energéticos en Sistemas Térmicos, Bogotá, Editorial EAP de Ingeniería de Energía.

- d) Peso específico de un combustible:** se define como el peso de una unidad de volumen del mismo en condiciones normalizadas de temperatura y presión. Para combustibles líquidos se considera una temperatura de referencia de 15 °C y para combustibles gaseosos es de 0 °C, a presión atmosférica.

En combustibles sólidos y líquidos, la unidad de volumen es el litro (kg/litro) y en combustibles sólidos el metro cúbico en condiciones normales (kg/Nm³).

Tabla 2.2. Pesos específicos de los combustibles.

Combustible	Unidad	Peso Específico
Gas natural	(kg/Nm ³)	0,78
Propano comercial	(kg/litro)	0,502 / 0,535
Butano comercial	(kg/litro)	0,56
Gasóleo C	(kg/litro)	0,82 / 0,88

Fuente: Guevara, R. (2013). Manual de Diagnósticos Energéticos en Sistemas Térmicos, Bogotá, Editorial EAP de Ingeniería de Energía.

- e) **Densidad de un combustible:** se define como la relación entre el peso específico del combustible y el de una sustancia de referencia. Esta unidad es adimensional. En el caso de combustibles líquidos y sólidos la sustancia de referencia es el agua y en el caso de combustibles gaseosos esta referencia es el aire. Las densidades de los combustibles más habituales se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Densidades de los combustibles.

COMBUSTIBLE	DENSIDAD
Gas natural	0,603
Propano comercial	0.502/0,535
Butano comercial	0,56
Gasóleo C	0,82 / 0,88

Fuente: Guevara, R. (2013). Manual de Diagnósticos Energéticos en Sistemas Térmicos, Bogotá, Editorial EAP de Ingeniería de Energía.

2.2.6. Mantenimiento ⁵

El mantenimiento industrial es uno de los ejes fundamentales dentro de la industria, está cuantificado en la cantidad y calidad de la producción; lo mismo que ha

⁵ García, G. (2009). Mantenimiento predictivo e industrial. Madrid. Editorial Renovetec.

estado sujeto a diferentes cambios al paso del tiempo; en la actualidad el mantenimiento se ve como una inversión que ayuda a mantener la calidad en la producción.

El mantenimiento se define como un conjunto de normas y técnicas establecidas para la conservación de la maquinaria e instalaciones de una planta industrial, para que proporcione mejor rendimiento en el mayor tiempo posible.

Los objetivos del mantenimiento son:

- Garantizar el funcionamiento regular de las instalaciones y servicios.
- Evitar el envejecimiento prematuro de los equipos que forman parte de las instalaciones.
- Conseguir ambos objetivos a un costo razonable.

La misión del mantenimiento es implementar y mejorar en forma continua la estrategia de mantenimiento para asegurar el máximo beneficio a nuestros clientes mediante prácticas innovadoras, económicas y seguras.

Actualmente el mantenimiento busca aumentar y confiabilizar la producción; aparece el mantenimiento preventivo, el mantenimiento predictivo, mantenimiento proactivo, la gestión de mantenimiento asistido por computador y el mantenimiento basado en la confiabilidad.

Realizar un correcto mantenimiento de las máquinas y los equipos es fundamental para que funcionen correctamente y evitar así averías que puedan causar paradas en producción, con la correspondiente pérdida que eso provoca, de tiempo y de dinero. Las máquinas deben estar disponibles el máximo tiempo posible.

Cuando hablamos de tipos de mantenimiento en realidad nos estamos refiriendo a la estrategia que se toma en relación a sus tareas de mantenimiento.

2.2.6.1. Tipos de mantenimiento

Los tipos de mantenimiento en función a la naturaleza de sus tareas son: el mantenimiento correctivo, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo.

a) Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo es también conocido como reactivo. Es el método más tradicional que más comúnmente se ha utilizado en las fábricas.

Es un tipo de mantenimiento que se basa en arreglar las averías conforme van surgiendo.

No requiere ninguna planificación sólo requiere ir atendiendo día a día las averías que necesitan ser reparadas dentro del proceso de producción. Para realizarlo casi siempre hay que paralizar la producción generando pérdidas por el tiempo invertido y los gastos generados.

Para minimizar su impacto en el proceso de producción, se necesita que el departamento de mantenimiento esté bien dimensionado contando con los operarios de mantenimiento necesarios para reparar las averías en el mínimo tiempo posible.

Además, también es necesario que la empresa cuente con un alto inventario de recambios, ya que de lo contrario, el tiempo de parada de la máquina se alargará dependiendo del plazo de entrega de la nueva pieza.

Hoy en día, muchas empresas siguen basando su mantenimiento en este método, con el riesgo que ello supone en el cumplimiento de plazos de entrega, sin establecer ninguna relación de causa ni realizando ninguna prevención de estos fallos.

Este mantenimiento es útil para algunas empresas con poca carga de producción y donde no se produzcan tantas averías por la naturaleza del trabajo. En estos casos sería más caro realizar planes de mantenimiento que el beneficio que se obtendría de ellos.

Aun así cualquier organización que aspire a crecer con estabilidad o que ya tenga el suficiente nivel de producción debe abandonar este sistema de mantenimiento pues no es adecuado.

b) Mantenimiento preventivo

Al mantenimiento preventivo, también se le llama mantenimiento planificado.

El mantenimiento preventivo trata de un conjunto de tareas de mantenimiento que tienen como objetivo mantener las instalaciones, anticipándose a las averías.

Su objetivo es seguir consiguiendo las mismas prestaciones de los equipos y máquinas y compensar el desgaste que van sufriendo con el paso del tiempo, pero siempre antes de que surja una avería y de manera preventiva para evitarlos en el futuro.

Tienen un carácter sistemático, es decir que se realizan o bien por horas de funcionamiento de la instalación o por periodos de tiempos. Se tiene un registro del tiempo que tardan los componentes más importantes en averiarse.

Normalmente se aprovechan tiempos con menor carga de trabajo para llevarlo a cabo.

Dentro del mantenimiento preventivo podemos encontrar el mantenimiento conductivo y el mantenimiento rutinario.

El **mantenimiento conductivo** es llevado a cabo por el personal de producción que atiende a la instalación, suelen ser tareas sencillas como son la lectura de parámetros, inspecciones sensoriales, pequeñas tareas de ajustes o configuración, etc.

El **mantenimiento rutinario** es el conjunto de técnicas que sin llegar al desmontaje de los equipos los conserva en el mejor estado posible por medio de engrases, limpiezas, sustituciones periódicas, etc.

El mantenimiento preventivo industrial se basa en las inspecciones. Además de las técnicas que hemos dado de mantenimiento rutinario y conductivo, las inspecciones permiten completar La filosofía de este mantenimiento que es evitar fallos. Son el mejor ejemplo de cómo se realiza este mantenimiento.

Este tipo de mantenimiento es claramente superior al correctivo, para empresas de mayor nivel.

Es muy beneficioso evitar las averías, ya que permite reducir Los costes. Aun así la mayor desventaja que tiene este sistema es el tiempo que consumen las inspecciones, durante las cuales el proceso de producción debe detenerse. Si la instalación tiene tiempos de descanso podrá realizarse durante estos, pero en muchos casos las instalaciones están funcionando todo el día y eso no es posible.

Las inspecciones se deben planificar e incluirlas dentro de las paradas programadas de la producción a la hora de su - planificación, para tenerlas en cuenta en la capacidad productiva.

c) **Mantenimiento predictivo**

Es el más tecnológico de los tres tipos de mantenimiento que estamos viendo.

Se trata de un conjunto de tareas de mantenimiento que relacionan una variable física o química con el estado en que se encuentra La máquina, con el fin de predecir cuándo empieza a fallar una determinada máquina o equipo. Requiere conocer muy bien los equipos, las técnicas y las herramientas que utilizamos para esa tarea.

Hay diferentes tipos de mantenimientos predictivos, diferentes técnicas para desarrollarlo como por termografías, ultrasonidos, análisis de vibraciones, análisis de aceites, humos combustión, etc.

Algunos ejemplos de los parámetros que utiliza el mantenimiento predictivo industrial pueden ser: vibración de los cojinetes, temperatura de las conexiones eléctricas, resistencia del aislamiento de la bobina de un motor...

Este tipo de programas de mantenimiento reporta un gran ahorro de costes ya que además de detectar los fallos de manera precoz permite programar con suficiente antelación el tiempo de reparación, los suministros y mano de obra que requerirá la tarea.

Su principal inconveniente es la dificultad que conlleva obtener una respuesta clara y segura ya que no existe ningún parámetro ni conjunto de parámetros que revele a la perfección el estado del equipo.

2.2.7. Tratamiento de Agua para Calderas

El tratamiento del agua que debe ingresar a la caldera es importante para la vida útil, eficiencia y seguridad en la operación de las calderas industriales.

El tratamiento del agua de una caldera es fundamental para asegurar una larga vida útil libre de problemas operacionales, reparaciones de importancia y accidentes.

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera.

El aseguramiento de la calidad del agua de alimentación y agua de la caldera se consigue cumpliendo con los requerimientos de las normas, que definen los límites recomendados para los parámetros involucrados en el tratamiento del agua.

2.2.7.1. Parámetros de tratamiento de agua

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de una caldera, son los siguientes:

- **pH:** El pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).

- **Dureza:** La dureza de la agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- **Oxígeno:** El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.
- **Hierro y Cobre:** El hierro y el cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se puede utilizar filtros para remover estas sustancias.
- **Dióxido de Carbono:** El dióxido de carbono al igual que el oxígeno favorece la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultados de la corrosión por oxígeno.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El CO_2 se disuelve en agua (condensado) produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

2.2.7.2. Requerimientos Agua Alimentación y Caldera

En base a las recomendaciones de la norma Británica BS-2486, la ABMA (American Boiler Manufacturing Association), el agua de alimentación y agua de una caldera deben cumplir los siguientes parámetros de funcionamiento:

Tabla 2. 4. Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486

Parámetro	Valor Requerido
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25°C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Fuente: Thermal Engineering LTDA.

Tabla 2. 5. Requerimientos agua caldera según BS 2486

Parámetro	Valor Requerido
pH a 25°C	10,5 – 11,8
Alcalinidad Total CaCO ₃	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de oxígeno	
▪ Sulfito de Sodio	30 – 70 ppm
▪ Hidrazina	0,1 – 10 ppm
▪ Taninos	120 – 180 ppm
▪ Dietilhidroxilamina	0,1 – 1,0 ppm (en agua alimentación)
Fosfato Na ₃ PO ₄	30 – 60 mg/l
Hierro	< 3,0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Fuente: Thermal Engineering LTDA.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

En el desarrollo de la tesis para realizar el diagnóstico experimental de la caldera de 150 BHP de potencia marca INTESA de la Tercera Región Militar de Arequipa, se emplearon los siguientes equipos e instrumentos para el trabajo experimental de lectura de datos experimentales en la sala de máquinas.

3.1.1. Equipos

3.1.1.1. Caldera Pirotubular

Características técnicas:

Marca	: INTESA
Modelo	: PT-150
Tipo	: Pirotubular Horizontal
Pases	: 03
Potencia	: 150 BHP
Capacidad calorífica	: 4,184 MBTU/hora
Presión de diseño	: 150 PSIA
Presión de prueba hidrostática	: 250 PSIG
Suministro Eléctrico	: 220 V/30/60Hz
Combustibles a usar	: Propano - Diesel 2

3.1.1.2. Quemador

Quemador de petróleo D-2 y gas propano, 02 etapas llama alta y llama baja, con bomba de petróleo tipo engranajes, sistema de encendido por arco eléctrico de alto voltaje, de tiro forzado por medio de ventilador tipo Sirocco de las siguientes características:

Marca	: Beckett
Procedencia	: USA
Modelo	: CF-3500
Llama alta	: 800-1500 GPH
Llama baja	: 17,00 – 35,00 GPH
Motor	: 2HP/20/220V/60Hz/3450RPM

3.1.1.3. Bomba de petróleo

Marca	: SUNTEC
Tipo	: Engranajes
Combustible	: D-2
Potencia	: 2 HP
Gases	: 20
RPM	: 3450

3.1.1.4. Control de nivel de agua

Marca	: McDonnell & Miller
Modelo	: 157
Presión	: 150 PSI
Switch	: Tubos de mercurio
Procedencia	: USA

3.1.1.5. Electrobomba de agua

Marca	: Aurora
Tipo	: Monoblock
Caudal	: 16,2 GPM
Presión	: 150 PSI
Velocidad	: 1800 RPM
Voltaje	: 220V/3 ϕ /60Hz
Succión	: 1¼" ϕ
Descarga	: 1¼" ϕ
Potencia	: 5 HP
Temperatura	: 90°C

3.1.1.6. Controles de Presión

Manómetro principal

Marca	: Marshall Town
Rango	: 0 – 200 PSI
Diámetro	: 6" ϕ

3.1.1.7. Válvula de salida de vapor

Marca	: Crane Inglesa
Diámetro	: 2½" ϕ
Tipo	: Globo
Presión	: 200 psi

3.1.1.8. Válvula de Seguridad

Marca	: Crane Inglesa
Tipo	: Resorte
Diámetro	: 1½" ϕ
Número	: 2

Figura 3.1. Caldera Pirotubular INTESA 150 BHP



Fuente: Empresa INTESA Lima – Perú

3.1.2. Instrumentos

3.1.2.1. Analizador de Gases

Un analizador de gases de combustión es un equipo que a través de una muestra realiza un escaneo de las sustancias químicas de que conforman los gases de combustión, estos equipos suelen tener una muestra del gas de combustión desde el tubo de escape a través de una sonda de toma, una vez que la muestra se encuentre en el

interior de la cámara del equipo, éste procede con el análisis un ejemplo de lo que un analizador de gases puede detectar es:

- Monóxido de Carbono (%CO): se forma cuando la combustión es incompleta, para una lectura normal los valores deben estar entre 0,5% y 2%.
- Dióxido de Carbono (%CO₂): Este gas es un indicador de la eficiencia del motor, mientras más alto el nivel de CO₂ más eficiente es la combustión, el rango normal está entre el 12% al 15%, por el contrario si sus valores son muy bajos indican fallas en la combustión lo que hace que aumente la presencia de hidrocarburos y monóxido de carbono.
- Oxígeno (%O₂): El oxígeno en las lecturas indica lo que sobra después de que el combustible es quemado en la cámara durante la combustión se mide en porcentaje, su valor normal es menor al 2%.
- Hidrocarburos (H/C): Los hidrocarburos son restos de combustible sin quemar, presentes en los gases de combustión. Este parámetro se mide en partes por millón (ppm) y se considera normal si se encuentra entre 100 y 400 ppm.
- Nitrógeno (%N₂): El porcentaje del nitrógeno para el análisis gases termodinámico se obtiene considerando que el 100% es igual al %CO + %CO₂ + %O₂ + %N₂.

▪ ANALIZADOR DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Los óxidos de nitrógeno: NO, NO₂, NO_x son productos de reacciones endotérmicas en los motores de combustión y son causa significativa de la contaminación del medio ambiente. El NO_x es dañino para el ser humano como tal o como agente para la creación de OZONO o la lluvia ácida. El NO_x es el contaminante más predominante contribuyente a las condiciones asmáticas y al smog fotoquímico encontrado en varias ciudades industrializadas.

Los contaminantes NO, NO₂ y NO_x son encontrados en el aire en medio ambiente así como en las chimeneas. Realizar mediciones de NO_x es un requerimiento para la mayoría de Proyectos de Monitoreo de la Calidad del Aire.

▪ **TIPOS DE ANALIZADORES DE GASES**

- Analizador de gases portátiles.

Son analizadores de pequeño tamaño y diseño resistente que permitan medir una gran variedad de gases simultáneamente (modulares) con una buena precisión, fácil lectura y muy fáciles de manejar.

Este grupo de analizadores se divide fundamentalmente en:

- Analizadores de gases de combustión (NO, NO₂, CO, CO₂, O₂ y SO₂), muy útiles en mediciones puntuales de procesos de combustión para la optimización de los mismos.
- Analizadores de gases para la protección de las personas (O₂, LEL, CO, H₂, SH₂ entre otros) que son los habitualmente empleados en espacios confinados. Este tipo de analizadores dispone habitualmente de alarmas visuales y acústicas.

▪ **ANALIZADORES DE GASES EN CONTINUO**

Son analizadores de gases de elevado coste, complejos, que requieren de un mantenimiento y operación especializados y que aportan una elevada precisión y selectividad en sus mediciones. Se emplean habitualmente en las mediciones en las que existe un requisito de cumplimiento legal o en control de procesos críticos.

Este grupo se divide en:

- **Analizadores de emisiones** (CEMs): Se emplean para la evaluación del cumplimiento de los límites de emisiones de gases en las industrias. Disponen de

un certificado NGC1 que garantizan unas características de funcionamiento en condiciones determinadas. Este cumplimiento de nivel de garantía es evaluado por un laboratorio acreditado UNE-EN ISO/IEC 17025.

- **Analizadores de calidad del aire:** Son analizadores cuyos principios de medida cumplen con las normas de referencia establecidas en los documentos normativos de aplicación. Deben disponer de un informe de ensayo favorable de cumplimiento de la norma de referencia o método equivalente expedido por un laboratorio de ensayo acreditado UNE-EN ISO/IE 17025. A este grupo pertenecen los analizadores que se ubican en las estaciones de medición de la calidad del aire públicas y privadas.
- **Analizadores de procesos (CEMs):** Se emplean en el control, medición y optimización de procesos industriales donde la precisión y fiabilidad de las mediciones son condiciones fundamentales, como en el control de procesos de combustión (centrales térmicas), reducción de emisiones (NOx), entre otros.

▪ **ANALIZADORES DE NUEVA GENERACIÓN**

Son analizadores de gases que se caracterizan por el empleo de las últimas tecnologías disponibles. Se caracterizan por tener un tamaño reducido, de bajo coste, modulares, autónomos, los cuales permiten la medición simultánea de gases y otros parámetros como temperatura, humedad relativa, ruido, radiación solar, etc.

Este tipo de analizadores permiten realizar mediciones y controles tanto en ubicaciones fijas como móviles con transmisión de la información recogida en todos los tipos de comunicaciones existentes. Son ideales para estudios previos y control de grandes extensiones y lugares de difícil acceso.

El analizador de gases utilizado en el desarrollo de la tesis, tiene las siguientes características:

Marca	: MTEST
Procedencia	: EE.UU.
Modelo	: MHC 222
Sensor	: óptico acústico
Accesorios	: teclado, pantalla e impresora.

Figura 3.2. Analizador de gases - MTEST



Elaborado por el equipo de trabajo

3.1.2.2. Termocupla digital

La termocupla se utiliza para medir temperaturas necesarias para realizar el balance energético de la caldera, como la temperatura de los gases de la combustión.

La termocupla tiene las siguientes características técnicas, el instrumento pertenece al Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UNA - Puno.

Marca	: Yokogawa
Tipo	: K
Modelo	: 2455
Rango de medida	: -160°C a 1372°C
Procedencia	: Japón

Figura 3.3. Termocupla digital



Elaborado por el equipo de trabajo

3.1.2.3. Psicrómetro

El psicrómetro es un instrumento de lectura indirecta para la determinación de la humedad relativa de un lugar determinado, para lo cual proporciona las lecturas de la temperatura de bulbo seco (TBS) la que corresponde a la temperatura ambiental y la

temperatura de bulbo húmedo (TBS), con las dos temperaturas en el diagrama psicrométrico se determina la humedad relativa. Las temperaturas se utilizarán también en el balance energético de la caldera. Se realizaron las gestiones pertinentes para su préstamo al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Es un instrumento empleado en meteorología para determinar la humedad del aire atmosférico, se compone de dos termómetros ordinarios, uno de los cuales tiene el bulbo humedecido con agua, y por la comparación de las temperaturas indicadas en ellos se calcula el grado de humedad del aire. La palabra psicrómetro es un neologismo formado a partir de dos lexemas griegos. El húmedo marca menos temperatura que el otro debido a que el agua que empapa la muselina se evapora, pero para hacerlo necesita calor, que obtiene del termómetro, con la temperatura baja. El agua evaporada es reemplazada por la que llega a través de la mecha. Al termómetro le llega exactamente la misma cantidad de agua que se evapora. El descenso de temperatura provocado por la evaporación depende de la velocidad de evaporación. Cuanta menos humedad relativa tiene el aire más rápidamente se evapora, y cuanto más rápido se evapora más baja su temperatura de este termómetro con respecto a la que marca el termómetro seco. La relación entre la diferencia de temperatura que miden los dos termómetros y la humedad relativa no es directa, ya que depende de la temperatura real del aire, y de la presión atmosférica. Y con ayuda del diagrama psicrométrico se determina la humedad relativa.

Características técnicas:

Marca	: Leybold
Procedencia	: Alemania
Año de fabricación	: 2007

Figura 3.4. Psicrómetro

Carolina Martín & Jorge Pina, CSIC 2014

Elaborado por el equipo de trabajo

3.1.2.4. Barómetro

Instrumento que mide la presión atmosférica, considerando que las condiciones ambientales son importantes en una investigación experimental.

Características técnicas:

Marca	: Leybold
Tipo	: Barómetro de sifón
Modelo	: 317-14
Rango	: 350 - 760 mm Hg
Procedencia	: Alemania

Figura 3.5. Barómetro

Elaborado por el equipo de trabajo.

3.1.3. Equipos y materiales para mantenimiento predictivo

3.1.3.1. Para mantenimiento diario

- Aceitera
- Aceite grado SAE-10
- Lentes con protector de UV
- Guantes de cuero
- Regla graduada

3.1.3.2. Para mantenimiento mensual

- Brocas
- Grasea
- Aceitera
- Aceite grado SAE-10
- Franelas de limpieza
- 03 juegos de llaves
- 03 juegos de destornilladores
- Nivel y escuadras
- 02 galones de gasolina
- Cepillo con cerdas de acero
- Guantes de cuero
- Regla graduada
- Equipo MTEST (Analizador de gases de escape, electrónico, modelo MHC 222)

3.1.3.3. Mantenimiento Anual

- Todos los equipos y materiales utilizados para mantenimiento diario y mensual.
- Repuestos, válvulas y empaques.
- Guantes de goma y cuero.
- Botas de goma y jebe.
- Sustancias químicas:
 - Ácido clorhídrico
 - Almidón ´
 - Soda cáustica
 - Sulfito de sodio
- Contenedor para solución ácida (cilindro).

- Nivel de vidrio tipo desechable (para control del nivel de agua del caldero).
- 03 cajas de llave.
- 01 piranómetro digital.

3.1.3.4. Equipos para mantenimiento de calderas

▪ **Expansores para Acampanar Tubos de Calderas**

Los Expansores para acampanar tubos de calderas Serie 900 de Elliott creados específicamente para ser usados en tubos de recalentadores, calderas acuotubulares o evaporadores. En solo una operación, estos expansores rolan los tubos y simultáneamente los acampana proyectando la punta del tubo a 15 grados de la línea central de la herramienta.

Figura 3.6. Expansores para acampanar Tubos de Calderas



Elaborado por el equipo de trabajo.

▪ **Expansor Rebordeador de un Rodillo**

El Expansor rebordeador de un rodillo de la Serie 4480, expande el tubo dentro de la placa mientras forma el rebordeado en la punta del tubo que se requiere en las aplicaciones de calderas piro tubulares.

Figura 3.7. Expansor Rebordeador de un Rodillo



Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Motores de Rolado en Ángulo Recto**

Los poderosos motores del serie 445 son ideales para las aplicaciones resistentes de tubos de calderas. Las cabezas en ángulos rectos son diseñadas para rolar tubos en zonas estrechas y difíciles de alcanzar.

Figura 3.8. Motores de Rolado en Ángulo Recto



Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Super Extractor de Tubos**

Poderoso Sistema Hidráulico Continuo De Extracción De Tubos

El Super Extractor Modelo 80-40200 de Elliott es un poderoso sistema de extracción hidráulica continua, para remover casi sin esfuerzo tubos de cualquier material en calderas y condensadores de superficie.

Figura 3.9. Super Extractor de Tubos



Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Martillo Neumático de Alta Potencia**

El Martillo Neumático De Alta Potencia 430D de Elliott es el recomendado para hacer funcionar las Herramientas Botadoras Jumbo para extraer casquillos en intercambiadores de calor, calderas piro y acuotubulares.

Figura 3.10. Martillo Neumático de Alta Potencia



Elaborado por el equipo de trabajo.

- **Expansores para Acampanar Tubos de Calderas**

Expansores Para Acampanar Tubos De Calderas Serie de Elliott 1500 de avance automático han sido creados especialmente para ser usados en Calderas Piro y Acuotubulares. En una sola operación, estos expansores rolan los tubos y simultáneamente los acampanan proyectando la punta del tubo a 20 grados de la línea central de la herramienta.

Figura 3.11. Expansores para Acampanar Tubos de Calderas



Elaborado por el equipo de trabajo.

▪ Bombas Hidráulicas

Las bombas hidráulicas de Elliott son usadas para accionar el Extractor Estilo Collet, el Extractor Semi Continuo Cyclgrip, el Extractor de Tubos, y el Extractor de Casquillos. El diseño compacto de esta bomba hidráulica, la hace ideal para ser usada en espacios de trabajo confinados.

Figura 3.12. Bombas Hidráulicas



Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2. MÉTODOS

El desarrollo de la tesis “Diagnóstico experimental para la detección de fallas en una caldera pirotubular de 150 BHP para proponer plan de mantenimiento predictivo en la ciudad de Arequipa”, está basado en la aplicación de la teoría de la termodinámica y máquinas térmicas al diagnóstico experimental para la detección de fallas, el cual está basado en el balance energético de la caldera, desde el punto de vista de la eficiencia energética que según la primera ley de la termodinámica, se define como una relación entre la energía que se debe ingresar al sistema (proporcionada por el combustible) y la energía que es útil o por lo cual se opera una caldera, es decir la energía que tiene el vapor producido a las condiciones de presión y temperatura. La eficiencia energética es sensible a muchas variables de funcionamiento de la caldera, desde la carga de operación, tipo de combustible, eficiencia de combustión, adecuado mantenimiento, lo

que implica el buen estado de los componentes del sistema completo de generación de vapor, el aislamiento, sistemas de recuperación de calor y otros.

El balance energético de la caldera está basado en la metodología experimental establecido por The American Society of Mechanical Engineers – Steam Generating Units, Power Test Codes 4.1 (ASME).

Los resultados del balance energético de la caldera se grafican en el diagrama de Sankey el cual debe ser analizado y comparado con el diagrama de Sankey correspondiente al de una caldera funcionando energéticamente en forma óptima; del análisis energético comparativo se diagnostica las fallas de operación de la caldera, para proponer el plan de mantenimiento predictivo.

La metodología experimental es la siguiente:

3.2.1. Determinación de las condiciones ambientales

3.2.1.1. Presión Atmosférica

En el barómetro se medirá la presión atmosférica en mm Hg (milímetros de mercurio).

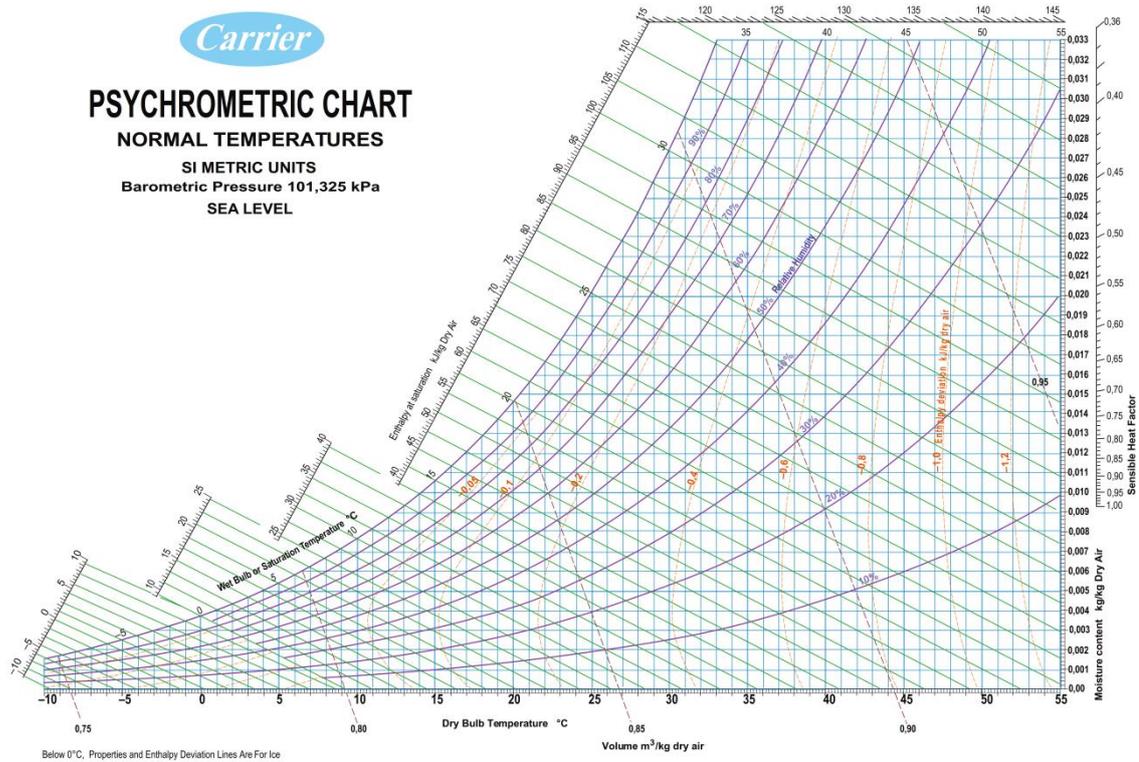
3.2.1.2. Humedad Relativa

En el psicrómetro se procede a la lectura de la:

- Temperatura de bulbo seco (TBS)
- Temperatura de bulbo húmedo (TBH)

Con ambas temperaturas, se determinará la humedad relativa en el diagrama psicrométrico:

Figura 3.13. Diagrama Psicrométrico



Fuente: Empresa CARRIER

3.2.2. Arranque de la Caldera

- a. Controlar el nivel de agua, abrir llaves de prueba de control de nivel para que entre aire al caldero.
- b. Abrir las válvulas de alimentación de combustible y agua.
- c. Conectar la llave de interrupción principal del caldero.
- d. Encienda la caldera.
- e. Se espera empiece subir la presión, se cierra la llave de purga de aire.
- f. Se espera que la presión suba al punto que ha sido regulado.
- g. Abrir válvula de salida de vapor lentamente.

Notas.-

- Una llama buena es de color anaranjado claro y uniforme.

- Si se observa humos negros, es por el exceso de petróleo y se debe abrir más la compuerta de aire.
- Si se observa humo blanco o la llama muy compacta, clara brillante, es debido al exceso de aire por lo tanto deberá cerrarse un poco la compuerta de aire.

3.2.3. Medición de datos experimentales

a) Control de humos

Los datos experimentales del control de humos o gases de combustión se realizará con el analizador de gases electrónico MTEST, para lo cual se colocará la sonda de medida en la abertura de la chimenea cuidadosamente y se esperará que transcurra un tiempo prudencial y luego tomar las lecturas en el equipo. En el análisis de gases se medirá:

% CO₂

% CO

% O₂

b) Medición de temperaturas de funcionamiento de la caldera

- Con el psicrómetro:
 - Temperatura de bulbo seco: TBS
 - Temperatura de bulbo húmedo: TBH
- Con al termocupla:
 - Temperatura del combustible: T_C
 - Temperatura de gases de escape: T_g

c) Mediciones adicionales:

- Presión de salida del vapor: P_v
- Consumo de combustible: mc

3.2.4. Determinación del Flujo de Vapor (\dot{m}_v)

Se aplica un método empírico que consiste en medir el condensado de vapor que se reciba en un recipiente de 5 L, se mide el tiempo en el cual el condensado del vapor llene el recipiente, esta operación de medición se efectúa poniendo el caldero en condiciones nominales de trabajo. La lectura de tiempos se realizó con un cronómetro con una precisión de centésimos.

Por el concepto de densidad del agua (δ):

$$\delta = \frac{m_v}{V_r}$$

La masa del vapor: $m_v = \delta \cdot V_r$

Por consiguiente la masa por unidad de tiempo (t):

$$\dot{m}_v = \frac{\delta \cdot V_r \cdot 3600}{t}$$

Donde: δ : densidad del agua

V_r : volumen del recipiente

t : tiempo de llenado del recipiente

3.2.5. Determinación del Flujo de Combustible (\dot{m}_c)

Para determinar el flujo de combustible, medimos empíricamente utilizando una regla graduada, y midiendo el desnivel (Δh) en el tanque de petróleo que se genera en un intervalo de tiempo, medido con el cronómetro. De la siguiente manera:

El diámetro del tanque de petróleo es de 2,5 m.

La densidad del diesel 2 es:

$$\delta_{\text{diesel 2}} = \frac{m_c}{V_c}$$

Donde: m_c = masa del combustible

V_c = volumen del combustible

Despejando:

$$m_c = \delta_{\text{diesel 2}} \cdot V_c$$

La densidad del diesel 2 por especificaciones técnicas es: $\delta_{\text{diesel 2}} = 54,6 \text{ lb/pe}^3$.

Por consiguiente:

$$\dot{m}_c = \frac{m_c}{t_c}$$

Donde: \dot{m}_c = flujo de combustible (Kg/hora)

m_c = masa de combustible (Kg)

t_c = tiempo de combustible (h)

3.2.6. Análisis de los gases de escape

Los porcentajes de los gases de combustión se medirán con el analizador de gases electrónico MTEST:

% CO₂

% O₂

% CO

Para la determinación del %N₂, debe cumplirse que:

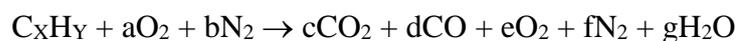
$$\%CO_2 + \%O_2 + \%CO + \%N_2 = 100\%$$

Despejando:

$$\%N_2 = 100\% - [\%CO_2 + \%O_2 + \%CO]$$

a) Determinación de la relación aire combustible ($r_{a/cR}$)

La ecuación de reacción de combustión incompleta o real por el petróleo diesel 2 es:



De las lecturas del analizador de gases:

$$c = \% CO_2; \quad d = \% CO; \quad e = \% O_2; \quad f = b = \% N_2$$

La composición volumétrica del aire es:

Nitrógeno : 79%

Oxígeno : 20,99%

En la ecuación de combustión incompleta:

$$\frac{b}{a} = \frac{79}{20,99} = 3,76$$

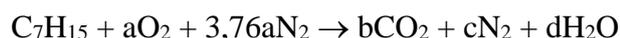
$$a = \frac{b}{3,76}$$

Balanceando la ecuación de combustión incompleta con los coeficientes determinados a través del analizador de gases, se determinará la relación aire combustible real por la expresión:

$$r_{a/c} = \frac{32 \frac{\text{Kg}}{\text{mol O}_2} \left(\text{N}^\circ \text{ moles O}_2 \right) + 28 \frac{\text{Kg}}{\text{mol N}_2} \left(\text{N}^\circ \text{ moles N}_2 \right)}{12 \frac{\text{Kg}}{\text{mol C}} \left(\text{N}^\circ \text{ moles C} \right) + 1 \frac{\text{Kg}}{\text{mol H}} \left(\text{N}^\circ \text{ moles H} \right)} \quad (3.1)$$

b) Determinación de la relación aire combustible teórica ($r_{a/cT}$)

La ecuación de combustión completa o teórica para el petróleo diesel 2 es:



Para la obtención de los coeficientes respectivos para determinar el número de moles que se reemplazará en la expresión (3.1) se balanceará la ecuación de combustión incompleta. La relación aire combustible teórica se determinará también utilizando la expresión (3.1).

c) Determinación del porcentaje de exceso de aire en la combustión

La expresión determinada en termodinámica es:

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{r_{a/cR}}{r_{a/cT}} \times 100 - 100$$

3.2.7. Determinación de la masa de gases de combustión (mg)

En la reacción de combustión:

$$\frac{\text{Kg carbono quemado}}{\text{Kg combustible}} = C - C' \quad (I)$$

Donde: C : Fracción de carbono en el combustible

C' : Lb de carbono no quemado por libra de combustible

También: 1

$$\frac{\text{Kg carbono}}{\text{mol gases escape}} = \frac{(\text{CO}_2 + \text{CO})}{100} \quad (\text{II})$$

Donde: CO_2 : % CO_2 del analizador de gases

CO : % CO del analizador de gases

Dividiendo (I) entre (II) y considerando que C' es despreciable:

$$\frac{\text{mol gases escape}}{\text{Kg de combustible}} \times (\text{Kg gases secos})$$

Entonces:

$$\text{mg} = \frac{100C}{12(\text{CO}_2 + \text{CO})} \times \frac{44\text{CO}_2 + 32\text{O}_2 + 28\text{CO} + 28\text{N}_2}{100}$$

Pero: $28\text{N}_2 = 28(100 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - \text{CO})$

Reemplazando:

$$\text{mg} = \frac{100C}{12(\text{CO}_2 + \text{CO})} \times (2800 + 16\text{CO}_2 + \text{O}_2)$$

Simplificando:

$$\text{mg} = \frac{4\text{CO}_2 + \text{O}_2 + 700}{3(\text{CO}_2 + \text{CO})} \times C \frac{\text{Kg gases}}{\text{Kg combust.}} \quad (3.3)$$

Del analizador de gases:

CO_2 : % CO_2

O_2 : % O_2

CO : % CO

C : Fracción de carbono en el combustible

3.2.8. Método para realizar el Balance Energético

La metodología experimental que se utilizó en la investigación se fundamenta en el código PTC4.1 para calderas de vapor de la ASME. El código establece dos métodos. El método de pérdidas de calor y el de entradas y salidas denominado Directo.

Aplicamos en el desarrollo de la tesis el método de pérdidas de calor denominado Indirecto, dado que la información requerida por el método directo obliga el uso de equipos e instrumentos de difícil disponibilidad y operación.

El balance energético de la caldera es el aspecto fundamental de la tesis en base al cual se diagnosticará las fallas en la caldera relacionadas con la eficiencia energética.

Las conclusiones de los resultados obtenidos en el método del balance energético se pueden esquematizar gráficamente a través del diagrama de Sankey, y mediante un análisis deductivo comparativo de las pérdidas energéticas en la Caldera nos permitirán diagnosticar las fallas que ella tenga y en base a ello, proponer el plan de mantenimiento predictivo, que asegure el funcionamiento eficiente de la caldera.

Los aspectos energéticos que involucran el método son los siguientes:

3.2.8.1. Determinación del Calor ganado por el agua o Calor Útil (Q_u)

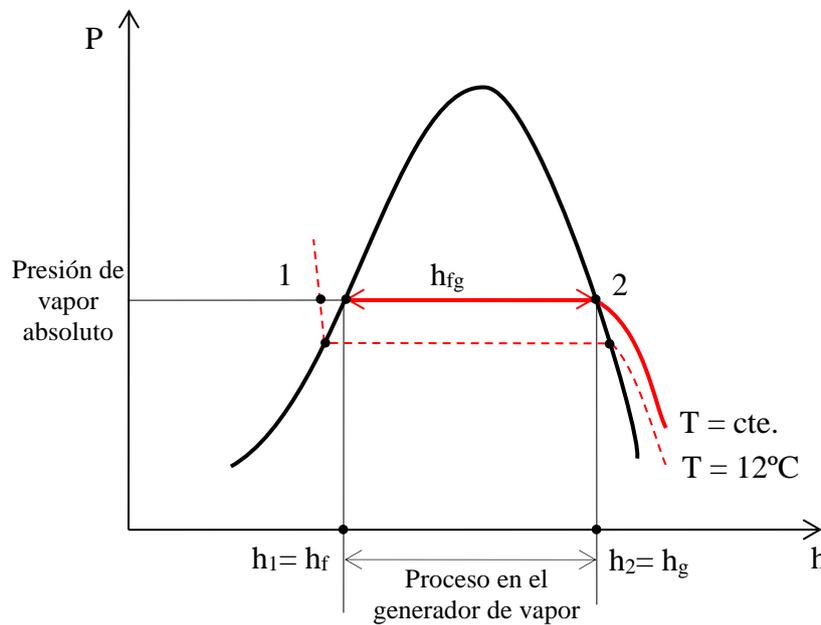
Es el calor ganado por el agua del generador de vapor para evaporar el agua hasta la presión y temperatura necesaria. Se denomina también calor útil y se calcula multiplicando la diferencia de la energía interna del agua a la entrada y la del vapor a la salida por la cantidad de masa de vapor por unidad de combustible consumido. Es decir:

$$Q_u = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c} (h_2 - h_1) \times 2,326 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}} \quad (3.4)$$

- Donde:
- \dot{m}_v : Flujo de vapor (Kg/h)
 - \dot{m}_c : Flujo de combustible en (lb/h)
 - $h_1 = h_f$: Entalpía líquido comprimido (BTU/lb)
 - $h_2 = h_{g_2}$: Entalpía vapor saturado (BTU/lb)

El proceso termodinámico en la caldera lo podemos graficar en el diagrama T-S:

Figura 3.14. Proceso termodinámico en la caldera



Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2.8.2. Calor perdido hacia el exterior por los gases de escape (Q_1)

Es el calor perdido por la emisión de la masa de gases de escape a una temperatura T_g hacia el medio exterior que está a la temperatura ambiente (TBS); este calor perdido por transferencia de calor lo podemos cuantificar por la fórmula de calorimetría:

$$Q_1 = mg \cdot C_{eg} \cdot (T_g - T_a) \times 2,326 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}} \quad (3.5)$$

Donde: mg : Flujo de masa de gases (Kg gases/Kg combustible)

C_{eg} : Calor específico de gases (BTU/lb-°F)

T_g : Temperatura de salida de gases de escape (°F)

T_a : Temperatura del ambiente (°F)

3.2.8.3. Calor perdido por combustión incompleta (Q_2)

Teniendo en cuenta que la combustión real siempre es incompleta así se realice con exceso de aire. En la combustión real se tiene las siguientes reacciones químicas de combustión donde se desprende la energía calorífica del combustible, por métodos analíticos termodinámicos experimentales y químicos se establece en laboratorios que en las reacciones químicas de combustión completas:



Estableciendo una relación de proporcionalidad en función del monóxido de carbono generado y la energía que desprenden, establecemos:

$$Q_2 = \frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO} \times (14150 - 3960) \times 0,85 \times 2,326 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}} \quad (3.6)$$

Donde:

$\frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO}$: Cantidad de CO formado en la combustión por carbono total en el combustible ($CO_2 + CO$)

(14150 – 3960) : Cantidad de calor en BTU/lb al dejar de formarse CO₂ y haberse generado CO en su lugar.

0,85 : Fracción de peso de carbono presente en el diesel 2 (C = 85% y H = 15%).

$\frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO} \times 0,85$: Cantidad de carbono convertido a monóxido de carbono (CO) por lb de combustible.

3.2.8.4. Calor perdido que se lleva el agua formada en el H₂ del combustible (Q₃)

El agua de formación, es el agua que se genera o forma a partir del hidrógeno del combustible en la reacción química de combustión y al estar inmersa en los productos de los gases de escape y por consiguiente a altas temperaturas se evapora en un proceso de transferencia de energía, lo cual lo hace a expensas de la energía del poder calorífico del combustible, por lo que se le considera un calor perdido (Q₃).

En la reacción química de combustión por la presencia del hidrógeno en el combustible se forma agua líquido la cual al estar en los gases de escape se transforma en vapor y el calor para lograr ese cambio de fase se considera pérdida y está constituido por un calor sensible para llevar el agua a 212°F = 100°C, un calor latente de evaporación para producir el cambio de fase de líquido a vapor y por último un calor sensible para llevar el vapor hasta la temperatura de los gases de escape. El fenómeno físico que se produce puede ser cuantificado por la expresión:

$$Q_3 = 9H \left[C_{ca} (212 - T_c) + C_{Lv} + C_{cv} (T_g - 212) \right] \times 2,326 \frac{KJ}{Kg \text{ comb}} \quad (3.7)$$

Donde:

H : fracción de peso del hidrógeno (0,15)

- 9H : Cantidad de peso formada considerando que 1 lb de H₂ es capaz de formar 9 libras de agua.
- C_{ea} : Calor específico del agua líquida (BTU/lb-°F)
- 1(212 – T_c) : Calor sensible para llevar el agua a 212°F (100°C)
- C_{Lv} : Calor latente de vaporización del agua en formación,
- C_{Lv} : 970,3 BTU/lb-°F
- C_{ea} : 1 BTU/lb-°F
- 212°F : Temperatura de ebullición del agua
- T_c : Temperatura del combustible (°F)
- C_{ev} (T_g – 212): Calor para llevar el vapor de agua a la temperatura de salida de los gases
- C_{ev} : 0,46 BTU/lb-°F
- T_g : Temperatura de salida de los gases de escape (°F).

3.2.8.5. Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q₄)

El aire del ambiente tiene humedad, la cual al entrar en contacto con los gases de escape por transferencia de calor ganará calor, pero en nuestro balance energético se considera pérdida. Se cuantifica por la expresión:

$$Q_4 = M_v \cdot C_{ev} (T_g - T_a) \times 2,326 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}} \quad (3.8)$$

Donde:

M_v : Masa de vapor de agua en el aire $\frac{\text{lb vapor}}{\text{lb comb.}}$

$$M_v = W \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb aire}} \cdot r_{a/c} \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}} \quad (3.9)$$

Donde:

W : Relación de humedad o humedad específica, se obtiene con las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en el diagrama psicrométrico.

$r_{a/c}$: Relación aire combustible real

C_{ev} : Calor específico del vapor (0,46 BTU/lb-°F)

T_g : Temperatura de gases de escape (°F).

T_a : Temperatura ambiental (°F).

3.2.8.6. Calor perdido por radiación, convección y otros (Q_5)

Las superficies exteriores de la caldera durante su funcionamiento se calientan, generándose los procesos de transferencia de calor de radiación y convección. Se cuantificará por la expresión:

$$Q_5 = P_c - Q_u - \sum_{i=1}^4 Q_i \quad (3.10)$$

Donde:

P_c : Poder calorífico (KJ/Kcomb)

Q_u : Calor útil (KJ/Kcomb)

$\sum_{i=1}^4 Q_i$: Sumatoria de los calores perdidos (KJ/Kcomb).

3.2.8.7. Diagrama de Sankey

El diagrama de Sankey es un esquema gráfico de los resultados del balance energético de la caldera, se asemeja a un árbol donde el grosor del tronco representa el total de la energía entregada a la caldera y, el grosor de las ramas se dibujan

proporcionalmente al tronco y representan los calores perdidos por diferentes aspectos.

Los calores o energías que representan los resultados del balance energético se expresan en porcentajes en el diagrama de Sankey.

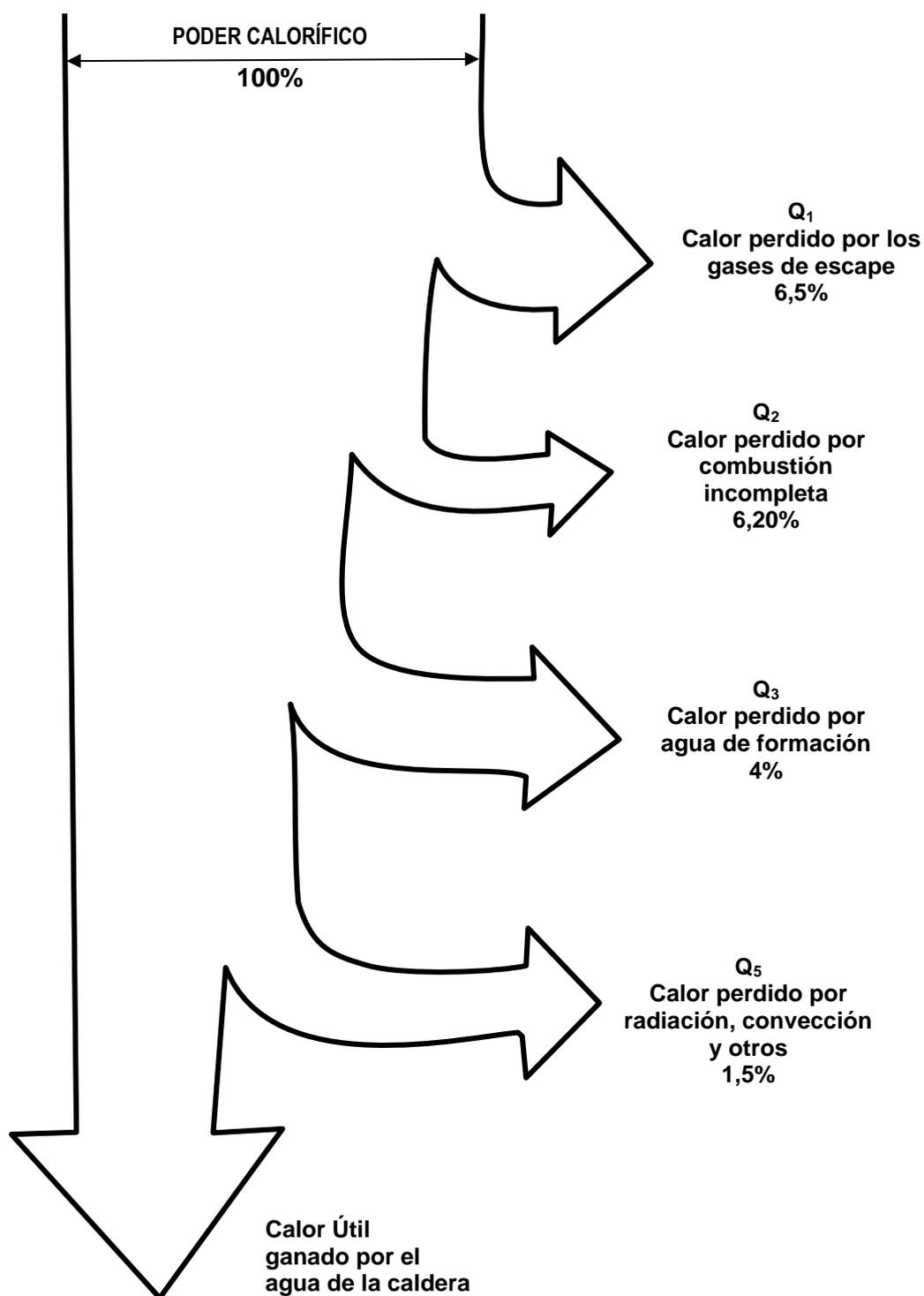
Para el cálculo de los porcentaje, el poder calorífico del diesel 2 representa el 100% de calor ($P_c = 44881,8 \text{ KJ/Kg.comb.}$) en base al cual se calculan los porcentajes de calores útiles o perdidos.

El diagrama de Sankey establecido en base a informaciones técnicas experimentales para una caldera que esté funcionando eficientemente desde el punto de vista energético, es el que se presenta en la figura 3.15, que nos servirá para realizar un análisis comparativo con el diagrama Sankey de la caldera en estudio y en base a los conocimientos de ingeniería determinar a qué se deben las discrepancias técnicas y diagnosticar las fallas de la caldera.

El diagrama de Sankey es el resultado gráfico del balance térmico o energético de la caldera en estudio, el análisis de este diagrama nos permitirá determinar la eficiencia energética de la caldera y por ende mejorar dicha eficiencia al disminuir las pérdidas de energía que están fuera del rango recomendado por el diagrama de Sankey patrón para el funcionamiento eficiente de una caldera.

Por ejemplo la TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (T_C) es importante en el balance térmico de la caldera, si la T_C la aumentamos, entonces el calor perdido que se lleva el agua formada en el H_2 del combustible (Q_3) disminuirá por consiguiente aumentará el calor útil (Q_4) y por ende también aumentará la eficiencia de la caldera. Se aumenta T_C instalando un intercambiador de calor con los gases de escape de la caldera que tienen alta temperatura.

Figura 3.15. Diagrama de Sankey - Para caldera eficiente.



Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2.9. Parámetros indicadores del buen funcionamiento

3.2.9.1. Factor de evaporación (f_e)

Parámetro definido como la relación entre Δh en la caldera y Δh de un HP de caldera, evalúa el calor ganado por el agua en el interior de la caldera en términos de evaporación equivalente.

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{\Delta h_{1\text{HPcaldero}}} \quad (3.11)$$

Donde:

f : adimensional

$h_2 - h_1$: Diferencia de entalpías entre las fases 1 y 2 de la caldera.

$\Delta h_{1\text{HPcaldero}}$: Es el cambio de entalpía necesario para producir un HP de Caldera que es igual a 970,3 BTU/lb.

3.2.9.2. Evaporación equivalente (E_e)

Parámetro utilizado para comparar calderas que trabajan a diferentes presiones, temperaturas y combustibles y, reducirlos a un mismo nivel de comparación. La evaporación equivalente se entiende como las libras de agua que se pueden evaporar desde y hasta 212°F (100°C).

Es decir evaporación equivalente expresa los libros de agua que se pueden evaporar desde y hasta 212°F.

$$E_e = f_e \cdot \dot{m}_v \quad (3.12)$$

Donde: f_e = factor de evaporación

\dot{m}_v =flujo de vapor en Kg/h

3.2.9.3. Producción de Caldera (P_v)

Parámetros importantes que nos permiten analizar comparativamente la cantidad de libras de vapor equivalente por unidad de combustible usado.

$$P_v = \frac{E_e}{\dot{m}_c} \quad (3.13)$$

Donde: E_e = Evaporación equivalente

\dot{m}_c = Flujo de combustible (Kg/h)

3.2.9.4. Eficiencia de la Caldera (η)

Este parámetro indicador del buen funcionamiento de la caldera, desde el punto de vista energético nos define el porcentaje útil de energía calorífica que es utilizada por la caldera respecto a la energía calorífica proporcionada por una libra de combustible.

$$\eta(\%) = \frac{Q_u}{P_c} \times 100 \quad (3.14)$$

Donde: Q_u = Calor útil ganado por el agua

P_c = Poder calorífico del petróleo diesel 2.

La eficiencia de la Caldera se determina a través del balance de energía, donde analizando la definición de la eficiencia, ésta tenderá a ser mayor mientras mayor sea el calor útil (Q_u) que es la energía que utiliza la máquina para vaporizar el agua, considerando que el poder calorífico del petróleo diesel 2 es constante (P_c : 44891,80

KJ/Kg combustible). Esto implica que las diferentes pérdidas de energía que se producen deben ser las menores posibles dentro de los rangos óptimos establecidos para un funcionamiento eficiente de la caldera. Se puede visualizar este proceso en el Diagrama de Sankey.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una caldera o generador de vapor es una máquina térmica cuya función es aprovechar la energía calorífica de un combustible en forma eficiente, para generar vapor de agua a una presión y temperatura determinadas, el cual será utilizado en diferentes procesos industriales. El funcionamiento energético eficiente de la caldera es importante y fundamental para que el funcionamiento mecánico y eléctrico sea óptimo, lo que implicará un mantenimiento normal y mínimo de la máquina.

El uso racional y eficiente de la energía es una problemática de alta relevancia y crecimiento a nivel mundial, aspecto importante en el impacto ambiental negativo presente en el cambio climático de la coyuntura actual.

En la tesis se definió una metodología para el diagnóstico de las fallas de la caldera, basada en la eficiencia energética de las calderas y aplicando los conocimientos de la termodinámica, máquinas térmicas y transferencia de calor fundamentalmente; que es el balance energético o térmico que realizamos con la finalidad de establecer si la energía aprovechada y la pérdida están entre los rangos prefijados para su funcionamiento y de no ser así, analizar energéticamente a que se deben las discrepancias; ver su incidencia en los parámetros indicadores del buen funcionamiento, es decir, su performance y diagnosticar o detectar las fallas de la caldera.

4.1. Datos experimentales medidos en la Sala de Máquinas

Los datos experimentales medidos, los realizamos con el técnico operador de la caldera, los que fueron anotados en el cuaderno de lectura de instrumentos de control diario.

- a) Temperatura de bulbo seco: 15°C
- b) Temperatura de bulbo húmedo: 12,5°C
- c) Temperatura del agua: 12°C
- d) Temperatura de los gases de escape: 530°F
- e) Presión de trabajo nominal: 145 PSIA
- f) Temperatura del combustible: 14,5°F
- g) Presión atmosférica: 580 mm Hg

4.1.1. Datos experimentales del Análisis de Gases de Combustión

El control de humos como también se le llama en la práctica, se efectuó cuando ya la caldera estaba en funcionamiento y produciendo vapor en forma normal. Se utilizó un analizador de gases electrónico MTEST, colocando la sonda respectiva en la abertura de la chimenea cuidadosamente y se esperó que transcurra un tiempo prudencial para tomar las lecturas en el equipo, imprimiéndose tres lecturas.

- Primera lectura:

$$\text{CO\% vol} = 0,30$$

$$\text{CO}_2\% \text{ vol} = 13,10$$

$$\text{O}_2\% \text{ vol} = 4,20$$

$$\text{T}^\circ\text{C} = 272,2$$

- Segunda lectura:

$$\text{CO\% vol} = 0,29$$

$$\text{CO}_2\% \text{ vol} = 13,00$$

$$\text{O}_2\% \text{ vol} = 3,00$$

$$\text{T}^\circ\text{C} = 272,5$$

- Tercera lectura: CO% vol = 0,31

$$\text{CO}_2\% \text{ vol} = 12,80$$

$$\text{O}_2\% \text{ vol} = 3,20$$

$$\text{T}^\circ\text{C} = 272,4$$

De las tres lecturas tomadas, para el balance energético o térmico de la caldera se decidió trabajar con los datos experimentales de la segunda lectura:

$$\% \text{CO} = 0,29\%$$

$$\% \text{CO}_2 = 13,00\%$$

$$\% \text{O}_2 = 3,00\%$$

4.2. Determinación de las condiciones ambientales

Considerando que en cualquier investigación de una máquina es fundamental las condiciones ambientales del lugar en el que se realiza.

Medición de la Humedad Relativa:

Se determinará la humedad relativa utilizando los siguientes datos experimentales medidos con el psicrómetro (figura 3.4) y utilizando el diagrama psicrométrico que se muestra en la figura 4.1:

- Temperatura de bulbo seco, que es también la temperatura ambiental:

$$\text{TBS} = 15^\circ\text{C}$$

- Temperatura de bulbo húmedo:

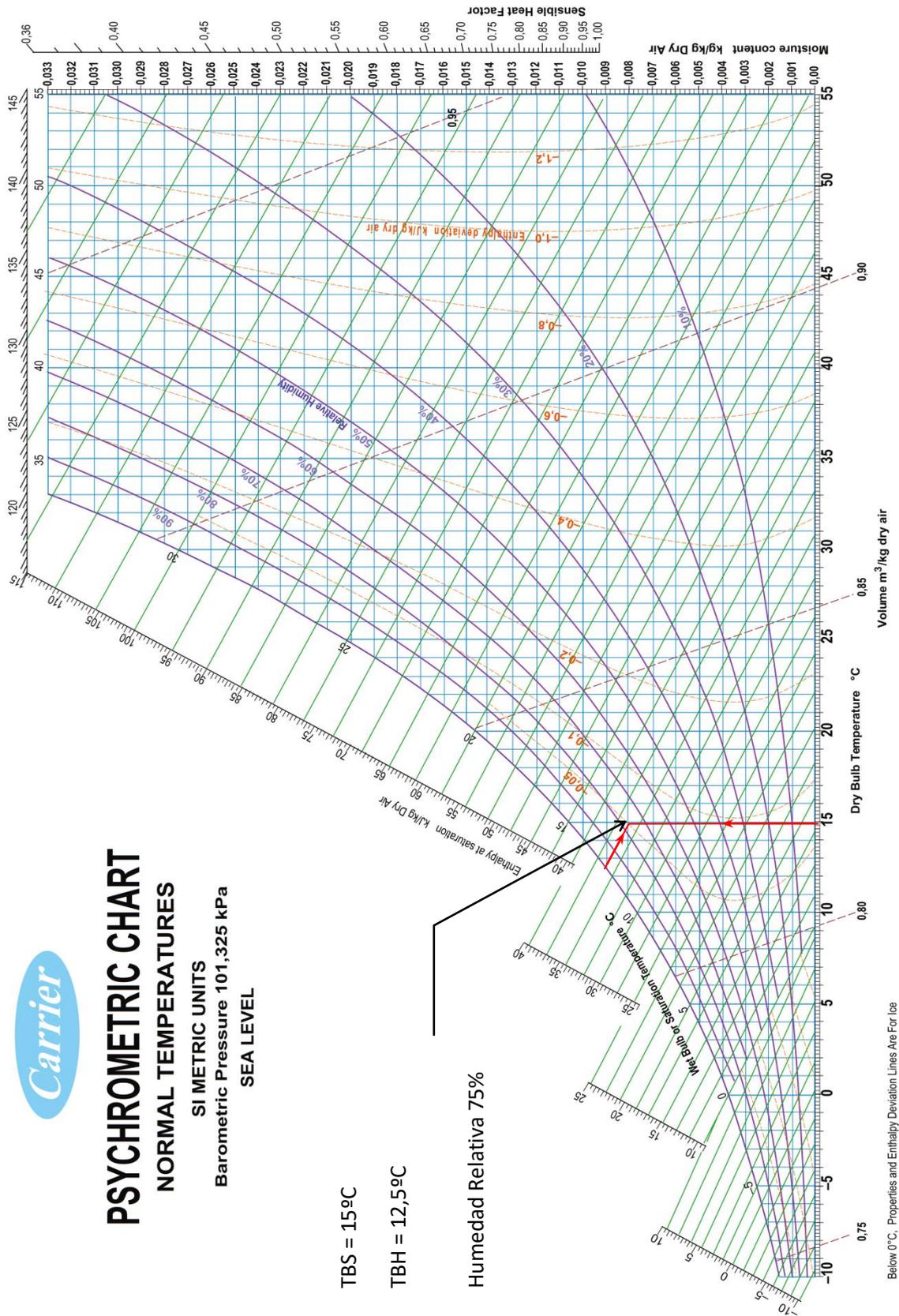
$$\text{TBH} = 12,5^\circ\text{C}$$

La temperatura de bulbo seco (TBS) y temperatura de bulbo húmedo (TBH) fueron graficados en el diagrama psicrométrico obteniéndose una humedad relativa de 75% (ver Figura 4.1).

A través del SENAMHI de Arequipa se obtuvieron también los siguientes parámetros climatológicos:

- Presión atmosférica: 580 mm Hg
- Altitud: 2325 metros sobre el nivel del mar

Figura 4.1. Determinación de la humedad relativa de Arequipa en el diagrama Psicrométrico



Elaborado por el equipo de trabajo.

4.3. Determinación del Flujo de Masa de Vapor (\dot{m}_v)

La caldera pirotubular no cuenta con un medidor de flujo de masa de vapor. Por lo cual lo medimos aplicando un método empírico y práctico; medimos el condensado de vapor en un recipiente de 5 litros, registrando el tiempo en la que el condensado del vapor llene el recipiente. Estas mediciones se efectuaron operando la caldera en condiciones nominales de trabajo normal. El procedimiento se repitió tres veces, siendo los tiempos de llenado del recipiente de 5 litros:

$$t_1 = 9,50 \text{ S}; \quad t_2 = 9,42 \text{ S}; \quad t_3 = 9,40 \text{ S}$$

Considerando el tiempo promedio:

$$\bar{t} = \frac{9,50 + 9,42 + 9,40}{3}$$

$$\bar{t} = 9,44 \text{ S}$$

Por definición de la densidad del agua (45°C)

$$\delta_{45^\circ\text{C}} = \frac{m_v}{V}$$

$$m_v = \delta_{45^\circ\text{C}} \cdot V$$

Donde: $\delta_{45^\circ\text{C}} = 990 \text{ Kg/m}^3$

$$V = 5 \text{ L} = 0,005 \text{ m}^3$$

Reemplazando:

$$m_v = 990 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (0,005 \text{ m}^3) = 4,95 \text{ Kg}$$

Pero la m_v por unidad de tiempo de llenado:

$$\dot{m}_v = \frac{m_v}{t}$$

Donde: $t = 9,44 \text{ S} = 0,0026 \text{ h}$

Por consiguiente:

$$\dot{m}_v = \frac{m_v}{t}$$

Reemplazando valores:

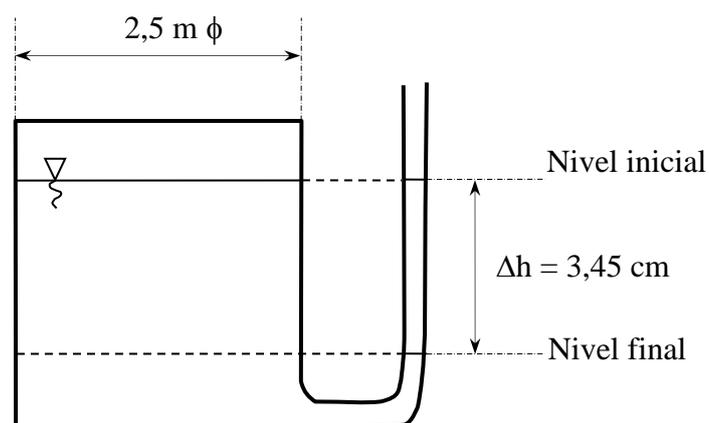
$$\dot{m}_v = \frac{4,95 \text{ Kg}}{0,0026 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_v = 1903,85 \text{ Kg/h}$$

4.4. Determinación del Flujo de Combustible (\dot{m}_c)

En el tanque del combustible del petróleo se midió el consumo en un tiempo de 1 hora:

Figura 4.2. Consumo del Petróleo en el tanque



Elaborado por el equipo de trabajo.

El tiempo de consumo de petróleo de la caldera entre el nivel inicial y final fue de una hora:

$$t_c = 1 \text{ hora}$$

Luego, el volumen de petróleo consumido será:

$$V_c = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta h$$

Donde: $D = 2,5 \text{ m}$

$$\Delta h = 3,45 \text{ cm} = 0,0345 \text{ m}$$

Reemplazando valores:

$$V_c = \frac{\pi (2,5)^2}{4} \cdot 0,0345$$

$$V_c = 0,169 = 0,17 \text{ m}^3$$

Pero la densidad del diesel 2 es:

$$\delta_{\text{diesel 2}} = \frac{m_c}{V_c}$$

$$m_c = \delta_{\text{diesel 2}} \cdot V_c$$

Por características técnicas del diesel 2:

$$\delta_{\text{diesel 2}} = 54,6 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} = 874,62 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Reemplazando valores:

$$m_c = 874,62 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,17 \text{ m}^3$$

$$m_c = 148,69 \text{ Kg}$$

Entonces la masa del consumo de combustible por unidad de tiempo (1h) en la caldera es el flujo de combustible:

$$\dot{m}_c = \frac{m_c}{t_c}$$

$$\dot{m}_c = \frac{148,69 \text{ Kg}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_c = 148,69 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

4.5. Análisis de los gases de combustión o humos

En el análisis de gases de combustión, en los porcentajes de las lecturas del analizador de gases se debe cumplir que:

$$\% \text{CO} + \% \text{CO}_2 + \% \text{O}_2 + \% \text{N}_2 = 100\%$$

Las lecturas del analizador fueron:

$$\% \text{CO} = 0,29\%$$

$$\% \text{CO}_2 = 13,00\%$$

$$\% \text{O}_2 = 3,00\%$$

Por consiguiente:

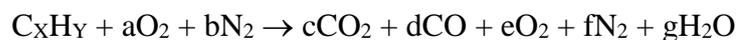
$$0,29\% + 13,00\% + 3,00\% + \text{N}_2\% = 100\%$$

Entonces:

$$\text{N}_2 = 83,71\%$$

4.5.1. Determinación de la relación aire combustible real ($\Gamma_{a/cR}$)

La reacción química de combustión real o incompleta para el petróleo diesel 2 es:



Para balancear la ecuación, consideramos los porcentajes de los gases de combustión, determinados con el analizador de gases electrónico.

$$\%CO = 0,29\% \rightarrow c = 13,00$$

$$\%CO_2 = 13,00\% \rightarrow d = 0,29$$

$$\%O_2 = 3,00\% \rightarrow e = 3,00$$

$$\%N_2 = 83,71\% \rightarrow f = 83,71$$

La composición volumétrica del aire es:

$$\text{Nitrógeno} : 79\%$$

$$\text{Oxígeno} : 20,99\%$$

Por consiguiente en la ecuación de combustión la relación entre el nitrógeno y oxígeno es:

$$\frac{b}{a} = \frac{79}{20,99} = 3,76$$

Por consiguiente el número de moles del oxígeno será:

$$a = \frac{b}{3,76}$$

Pero balanceando la ecuación , el número de moles para el nitrógeno es:

$$b = f = 83,71$$

Reemplazando:

$$a = \frac{83,71}{3,76}$$

$$a = 22,26$$

Balanceando la ecuación de combustión real, para cada elemento químico:

$$C : x = c + d$$

$$x = 13,00 + 0,29$$

$$x = 13,29$$

$$O_2 : 2a = 2c + d + 2e + g$$

$$g = 2a - (2c + d + 2e)$$

$$g = 2(22,26) - [2(13) + 0,29 + 2(3)]$$

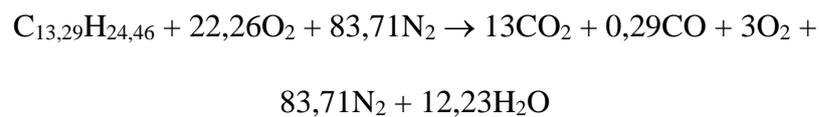
$$g = 12,23$$

$$H_2 : y = 2g$$

$$y = a(12,23)$$

$$y = 24,46$$

La ecuación balanceada es:



Determinamos la relación aire combustible en la expresión (3.1):

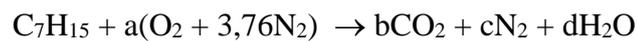
$$r_{a/cR} = \frac{32(22,26) + 28(83,71)}{12(13,29) + 1(24,46)} = \frac{3056,20}{183,91}$$

$$r_{a/cR} = 16,62 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg combust.}}$$

$$r_{a/cR} = 16,62 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb combust.}}$$

4.5.2. Determinación de la relación aire combustible teórica o completa

La reacción química de combustión teórica o completa para el petróleo diesel 2 es:



Considerando el balanceo de la ecuación para cada elemento químico:

$$C : 7 = b$$

$$b = y$$

$$H_2 : 15 = 2d$$

$$d = 7,5$$

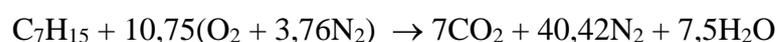
$$O_2 : 2a = 2b + d$$

$$2a = 2(7) + 7,5$$

$$a = \frac{21,5}{2}$$

$$a = 10,75$$

La ecuación de combustión completa, balanceada es:



Determinamos la relación aire combustible, reemplazando el número de moles en la expresión (3.1):

$$r_{a/cT} = \frac{32(10,75) + 28(10,75 \times 3,76)}{12(7) + 1(15)} = \frac{1475,76}{99}$$

$$r_{a/cT} = 14,91 \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg combust.}}$$

$$r_{a/cT} = 14,91 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb combust.}}$$

4.5.3. Determinación del porcentaje de exceso de aire

La caldera así funcione con cierto porcentaje de exceso de aire, siempre trabaja con combustión incompleta. El exceso de aire lo determinamos por la expresión obtenida en termodinámica (3.2).

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{r_{a/cR}}{r_{a/cT}} \times 100 - 100$$

Reemplazando las relaciones aire combustible calculados:

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{16,62}{14,91} \times 100 - 100$$

$$\% \text{ Exceso aire} = 11,47\%$$

4.6. Determinación de la masa de los gases de combustión (mg)

La determinación de la masa de los gases de combustión (mg) es necesaria para calcular el calor perdido o calor que se llevan los gases de combustión. Su determinación es realizada a través de la teoría de la química.

La determinamos en función a los porcentajes de los gases de escape obtenidos con el analizador de gases electrónico y, reemplazando en la expresión (3.3):

$$mg = \frac{4CO_2 + O_2 + 700}{3(CO_2 + CO)} \times C$$

Del analizador de gases:

$$CO_2 = 13,00\%$$

$$CO = 0,29\%$$

$$O_2 = 3,00\%$$

La fracción de carbono (C) en el petróleo diesel 2 es: C = 85% y H = 15%, entonces C = 0,85%.

Reemplazando:

$$mg = \frac{4(13) + 3 + 700}{3(13 + 0,29)} \times 0,85$$

$$mg = 16,10 \frac{\text{Kg gases}}{\text{Kg comb.}}$$

4.7. Cálculos del Balance Energético o Térmico de la Caldera

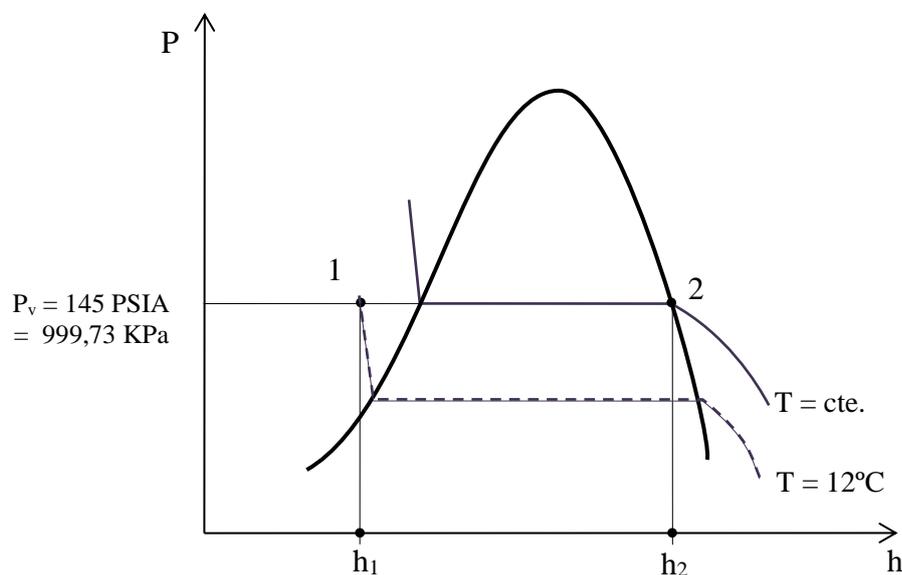
4.7.1. Cálculo del calor ganado por el agua o calor útil (Q_u)

Para la determinación del calor útil que emplea la caldera para evaporar el agua empleamos la expresión (3.4)

$$Q_u = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c} (h_2 - h_1)$$

Representando el proceso en el generador de vapor en el diagrama P-h:

Figura 4.3. Proceso en el Generador de Vapor en el Diagrama P-h.



Elaborado por el equipo de trabajo.

La lectura de la presión del vapor fue de:

$$P_v = 145 \text{ PSIA} = 999,73 \text{ KPa}$$

La presión atmosférica de Arequipa es:

$$P_{at} = 578 \text{ mm Hg} \approx 11 \text{ PSI}$$

Por consiguiente la presión absoluta del vapor es:

$$P_v = \text{Presión manométrica} + \text{Presión atmosférica}$$

$$P_v = 134 + 11 = 145 \text{ PSIA} = 145 \text{ lb/pulg}^2 = 999,73 \text{ KPa}$$

La entalpía h_2 la determinamos de Tablas termodinámicas, vapor saturado a una presión de 145 lb/pulg² (10 bar).

$$h_2 = h_g = 2778,01 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

La entalpía h_1 corresponde a líquido subenfriado comprimido, lo determinamos en tablas termodinámicas, para líquido saturado a la temperatura de 12°C (temperatura del agua de alimentación):

$$h_1 = h_f = 50,40 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Se calcularon:

$$\dot{m}_v = 1903,85 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$m_c = 327,60 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 148,60 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Reemplazando en la expresión (3.4):

$$Q_u = \frac{1903,85 \text{ Kg/h}}{148,60 \text{ Kg/h}} (2778,01 - 50,40) \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_u = 34945,90 \text{ KJ/Kg}$$

4.7.2. Cálculo del calor perdido hacia el exterior por los gases de escape (Q_1)

El calor perdido lo calculamos por la expresión (3.5):

$$Q_1 = m_g \cdot C_{eg} \cdot (T_g - T_a)$$

Donde: $m_g = 16,10 \frac{\text{lb gases}}{\text{lb comb.}}$

$$C_{eg} = 0,24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$T_g = 530^\circ\text{F}$$

$$T_a = TBS = 15^\circ\text{C} = 59^\circ\text{F}$$

Reemplazando:

$$Q_1 = 16,10 \frac{\text{lb gases}}{\text{lb comb.}} \times 0,24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} (530 - 59)^\circ\text{F} \times 2,326$$

$$Q_1 = 4233,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}}$$

Esta pérdida es excesiva, para disminuirla analizando la expresión (3.5), debemos disminuir “mg” la cual está relacionada con una combustión eficiente, al regular la relación aire-combustible a valores establecidos por el manual de la caldera disminuyendo los porcentajes de CO y O₂ que implicarán una disminución de “mg” y, la combustión eficiente influirá también en la disminución de T_g que hará que disminuya el calor perdido Q₁.

4.7.3. Determinación del Calor perdido por combustión incompleta (Q₂)

Para determinar el calor perdido por combustión incompleta empleamos la expresión (3.6):

$$Q_2 = \frac{\% \text{CO}}{\% \text{CO}_2 + \% \text{CO}} \times (14150 - 3960) \times 0,85$$

Donde:

Los porcentajes de los gases de combustión en el analizador de gases son:

$$\%CO = 0,29\%$$

$$\%CO_2 = 13,00\%$$

Reemplazando en la expresión (3.6):

$$Q_2 = \frac{0,29}{13,0 + 0,29} \times (14150 - 3960) \times 0,85 \times 2,326$$

$$Q_2 = 439,61 \frac{KJ}{Kg \text{ comb}}$$

4.7.4. Determinación del calor perdido que se lleva el agua formada en el H₂ del combustible (Q₃)

Para calcular el calor perdido por evaporación del agua de formación emplearemos la expresión (3.7):

$$Q_3 = 9H \left[C_{ea} (212 - T_c) + C_{Lv} + C_{ev} (T_g - 212) \right]$$

Esta ecuación cuantifica el calor perdido para llevar el agua líquida de formación hasta 100°C (212°F) para provocar el cambio de fase a vapor y llevar el vapor hasta la temperatura de los gases de escape.

En la expresión:

$$H = 0,15$$

$$C_{ea} = 1 \frac{BTU}{lb \text{ comb}}$$

$$T_c = 14,5^\circ C = 58,1^\circ F$$

$$C_{Lv} = 970,3 \frac{BTU}{lb}$$

$$C_{ev} = 0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb-}^\circ\text{F}}$$

$$T_g = 530^\circ\text{F}$$

Reemplazando datos:

$$Q_3 = 9(0,15) \left[1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb-}^\circ\text{F}} (212 - 58,1)^\circ\text{F} + 970,3 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} + 0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb-}^\circ\text{F}} (530 - 212) \right] \times 2,326$$

$$Q_3 = 3989,44 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}}$$

Q₃: Se puede disminuir, aumentando la temperatura del combustible (58,1°F), a través de un intercambiador de calor con los gases de escape.

4.7.5. Determinación del calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q₄)

Calculamos el calor perdido por la expresión (3.8):

$$Q_4 = M_v \cdot C_{ev} (T_g - T_a)$$

Donde la masa de vapor de agua en el aire, la determinamos por la expresión (3.9):

$$M_v = W \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb aire}} \cdot r_{a/c} \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}}$$

La relación de humedad o humedad específica la determinamos en el diagrama Psicrométrico, utilizando las lecturas en el Psicrómetro:

Temperatura de bulbo seco: TBS = 15°C

Temperatura de bulbo húmedo: TBH = 12,5°C

La determinación se realiza en la Figura 4.4, donde se obtiene:

$$W = 0,0077 \frac{\text{Kg humedad}}{\text{Kg aire}}$$

Es equivalente:

$$W = 0,0077 \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb aire}}$$

La relación aire combustible real calculada es:

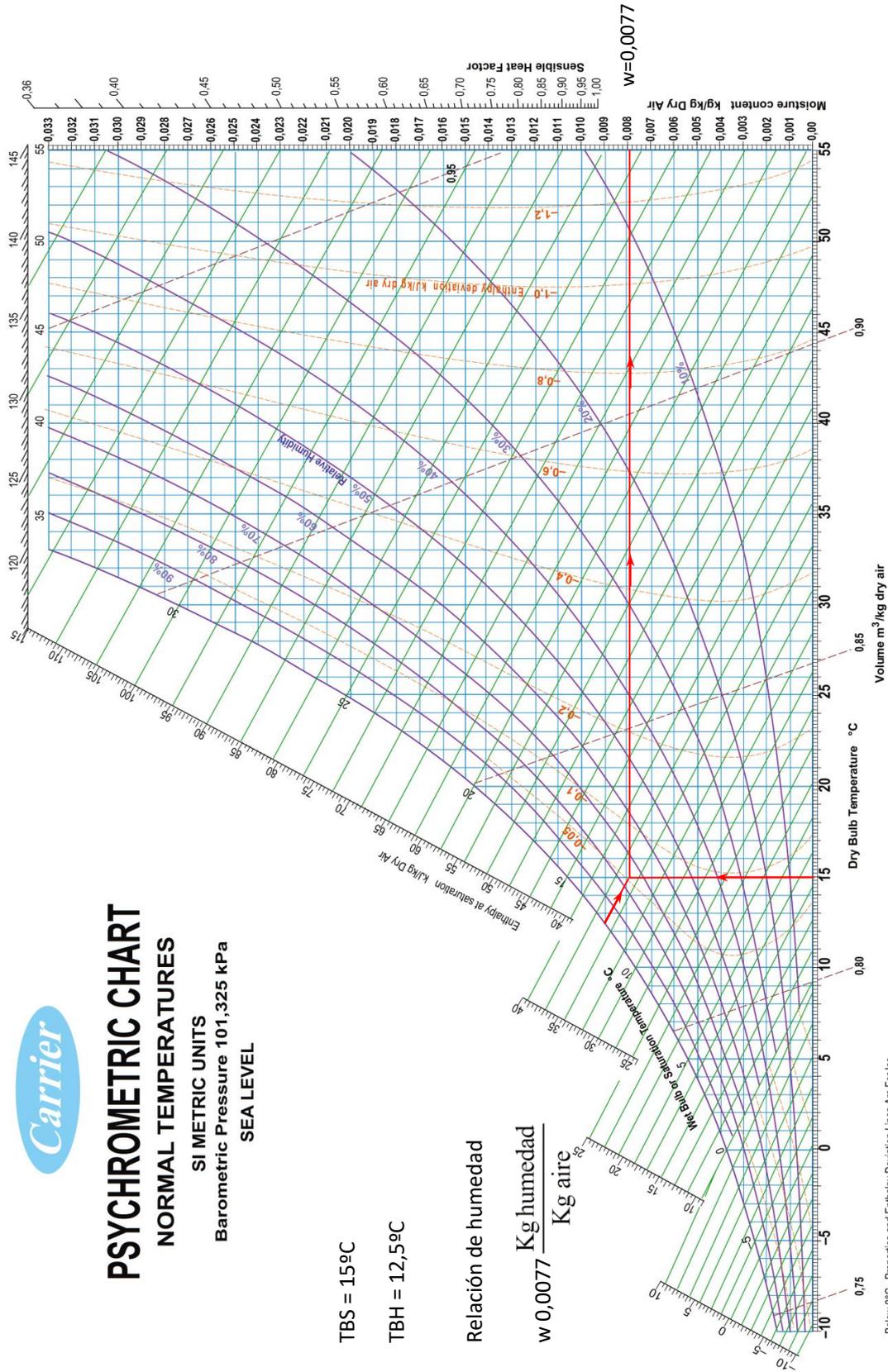
$$r_{a/c} = 16,62 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}}$$

Reemplazando en la expresión (3.9):

$$M_v = 0,0077 \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb aire}} \cdot 16,62 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}}$$

$$M_v = 0,1280 \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb comb.}}$$

Figura 4.4. Determinación de la relación de humedad o humedad específica.



Elaborado por el equipo de trabajo.

En la ecuación (3.8) del calor perdido:

$$C_{ev} = 0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$T_g = 530^\circ\text{F}$$

$$T_a = T_{BS} = 15^\circ\text{C} = 59^\circ\text{F}$$

Reemplazando valores:

$$Q_4 = 0,1280 \frac{\text{lb humedad}}{\text{lb comb.}} \cdot 0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} (530 - 59)^\circ\text{F} \times 2,326$$

$$Q_4 = 53,87 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}}$$

4.7.6. Determinación del Calor perdido por radiación, convección y otros factores

(Q₅)

Para la determinación de este calor perdido empleamos la expresión (3.10):

$$Q_5 = P_c - Q_u - \sum_{i=1}^4 Q_i$$

Entonces:

$$Q_5 = P_c - Q_u - Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4$$

Donde:

$$P_c = 44891,80 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$Q_u = 34945,90 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$Q_1 = 4233,18 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$Q_2 = 439,61 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$Q_3 = 3989,44 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$Q_4 = 53,87 \text{ KJ/Kg comb}$$

Reemplazando valores:

$$Q_5 = 44891,80 - 34945,90 - 4233,18 - 439,61 + 3989,44 + 53,87$$

$$Q_5 = 1229,80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg comb}}$$

4.7.7. Representación de balance energético en el Diagrama de Sankey

Los resultados del balance energético o térmico se representan gráficamente en el diagrama de Sankey, en el cual los calores calculados se expresaron en porcentajes, considerando que el 100% es el calor o energía contenida en un kilogramo de combustible y que es de 44891,80 KJ/Kg.

El calor útil, $Q_u = 34945,90 \text{ KJ/Kg comb}$. expresado en porcentaje, lo calculamos de la siguiente manera:

$$\% Q_u = \frac{34945,90}{44891,80} \times 100$$

$$\% Q_u = 77,85\%$$

Análogamente para el cálculo de los demás porcentajes:

$$\% Q_1 = \frac{4233,18}{44891,80} \times 100 = 9,43\%$$

$$\% Q_2 = \frac{439,61}{44891,80} \times 100 = 0,98\%$$

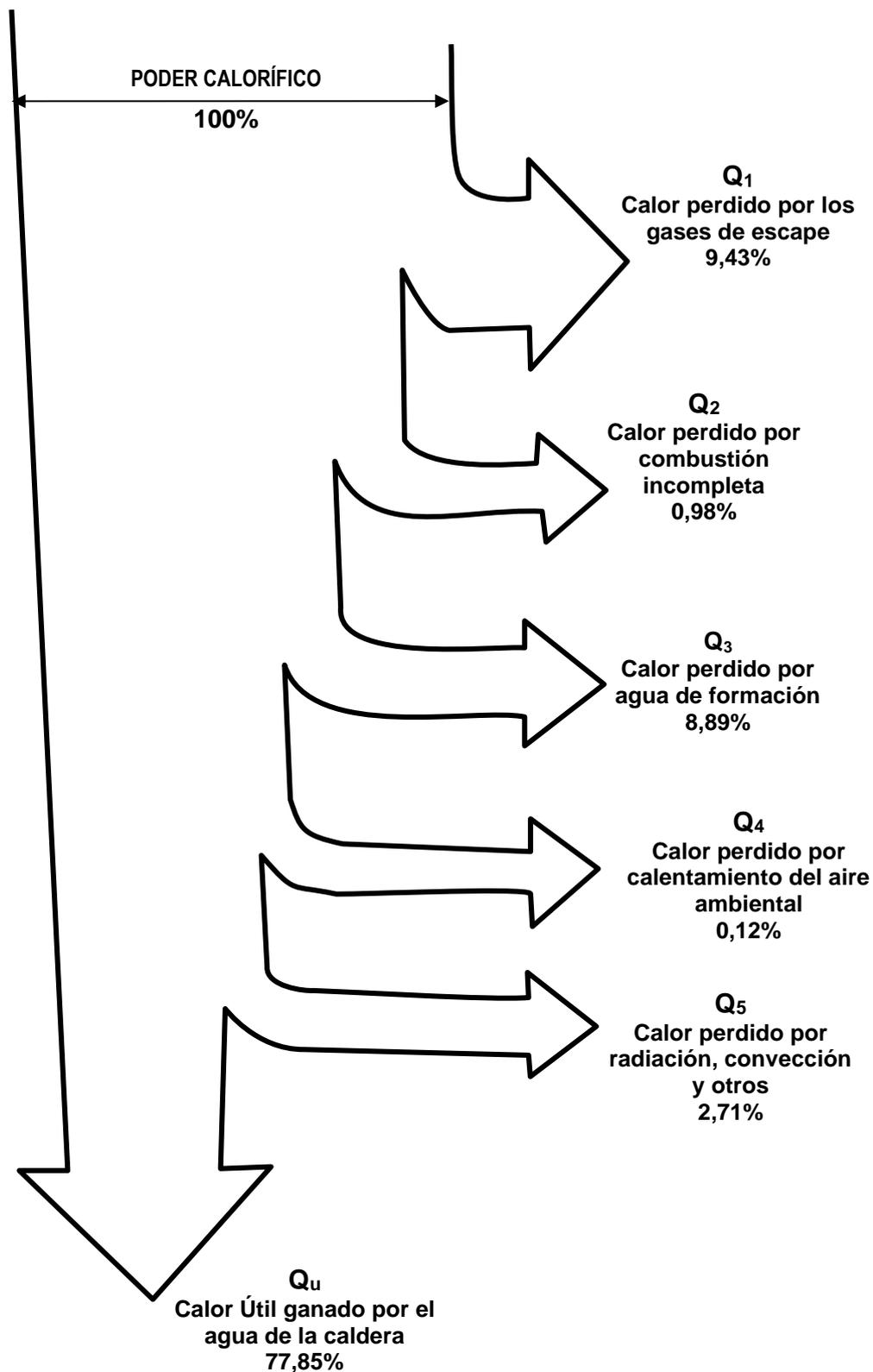
$$\%Q_3 = \frac{3989,44}{44891,80} \times 100 = 8,89\%$$

$$\%Q_4 = \frac{53,87}{44891,80} \times 100 = 0,12\%$$

$$\%Q_1 = \frac{1229,80}{44891,80} \times 100 = 2,71\%$$

Graficando el diagrama de Sankey en la figura 4.5:

Figura 4.5. Diagrama de Sankey - Para trabajo real del caldero.



Elaborado por el equipo de trabajo.

4.8. Determinación de los parámetros indicadores del buen funcionamiento

4.8.1. Determinación del Factor de evaporación (f_e)

Determinamos utilizando la expresión (3.11):

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{\Delta h_{1HPcaldero}}$$

Donde se calcularon:

$$h_1 = 50,40 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_2 = 2778,01 \text{ KJ/Kg}$$

$$\Delta h_{1HPcaldero} = 970,30 \text{ BTU/lb} = 2256,77 \text{ KJ/Kg}$$

Reemplazando datos

$$f_e = \frac{(2778,01 - 50,40) \text{ KJ/Kg}}{2256,77 \text{ KJ/Kg}}$$

$$f_e = 1,21$$

4.8.2. Determinación de la evaporación equivalente (E_e)

Determinamos utilizando la expresión (3.12):

$$E_e = f_e \cdot \dot{m}_v$$

Donde se calcularon:

$$f_e = 1,21$$

$$\dot{m}_v = 1903,85 \text{ Kg/h} = 4197,23 \text{ lb/h}$$

Reemplazando datos:

$$E_e = 1,21 \times 1903,85 \text{ Kg/h}$$

$$E_e = 2303,66 \text{ Kg/h}$$

Es decir la evaporación equivalente es de 2303,66 kilogramos de vapor equivalente por hora.

4.8.3. Determinación de la Producción de Caldera (P_v)

Determinamos utilizando la expresión (3.13):

$$P_v = \frac{E_e}{\dot{m}_c}$$

Donde se calcularon:

$$E_e = 2303,66 \text{ Kg}_{\text{vapor}}/\text{h}$$

$$\dot{m}_c = 148,69 \text{ Kg}_{\text{comb}}/\text{h}$$

Reemplazando:

$$P_v = \frac{2303,66 \text{ Kg}_{\text{vapor}}/\text{h}}{148,69 \text{ Kg}_{\text{comb}}/\text{h}}$$

$$P_v = 15,50 \frac{\text{Kg}_{\text{vapor}}}{\text{Kg}_{\text{comb}}}$$

Es decir la producción de la caldera es de 15,50 kilogramos de vapor equivalente por kilogramo de combustible.

4.8.4. Determinación de la Eficiencia de la Caldera (η)

Determinamos utilizando la expresión (3.14):

$$\eta(\%) = \frac{Q_u}{P_c} \times 100$$

Donde:

$$Q_u = 34945,90 \text{ KJ/Kg comb.}$$

$$P_c = 44891,80 \text{ KJ/Kg comb.}$$

$$\eta(\%) = \frac{34945,90}{44891,80} \times 100$$

$$\eta(\%) = 77,85\%$$

La eficiencia de la caldera nos expresa que de la energía calorífica contenida en una libra de petróleo diesel 2, la caldera utilizó eficientemente el 77,85% para producir el vapor de agua.

Según el diagrama de Sankey para una caldera eficiente que nos sirvió para hacer el análisis comparativo con la caldera de la tesis; las pérdidas constituyen el 18,2% lo cual implica que una caldera eficiente tiene aproximadamente una eficiencia de 81,8%. Por lo tanto la eficiencia calculada es muy aceptable, considerando que la Tercera Región Militar de Arequipa tiene contratada una empresa privada que le hace el mantenimiento constante a la caldera, por los servicios importantes que presta a la Institución.

4.9. Discusión - Diagnóstico de Fallas

A través del desarrollo de la tesis se obtuvieron los resultados del balance energético o térmico de la caldera de la Tercera Región Militar de Arequipa, los cuales se presentaron gráficamente en el diagrama de Sankey, esquema utilizado en los análisis energéticos de balances térmicos de sistemas de máquinas.

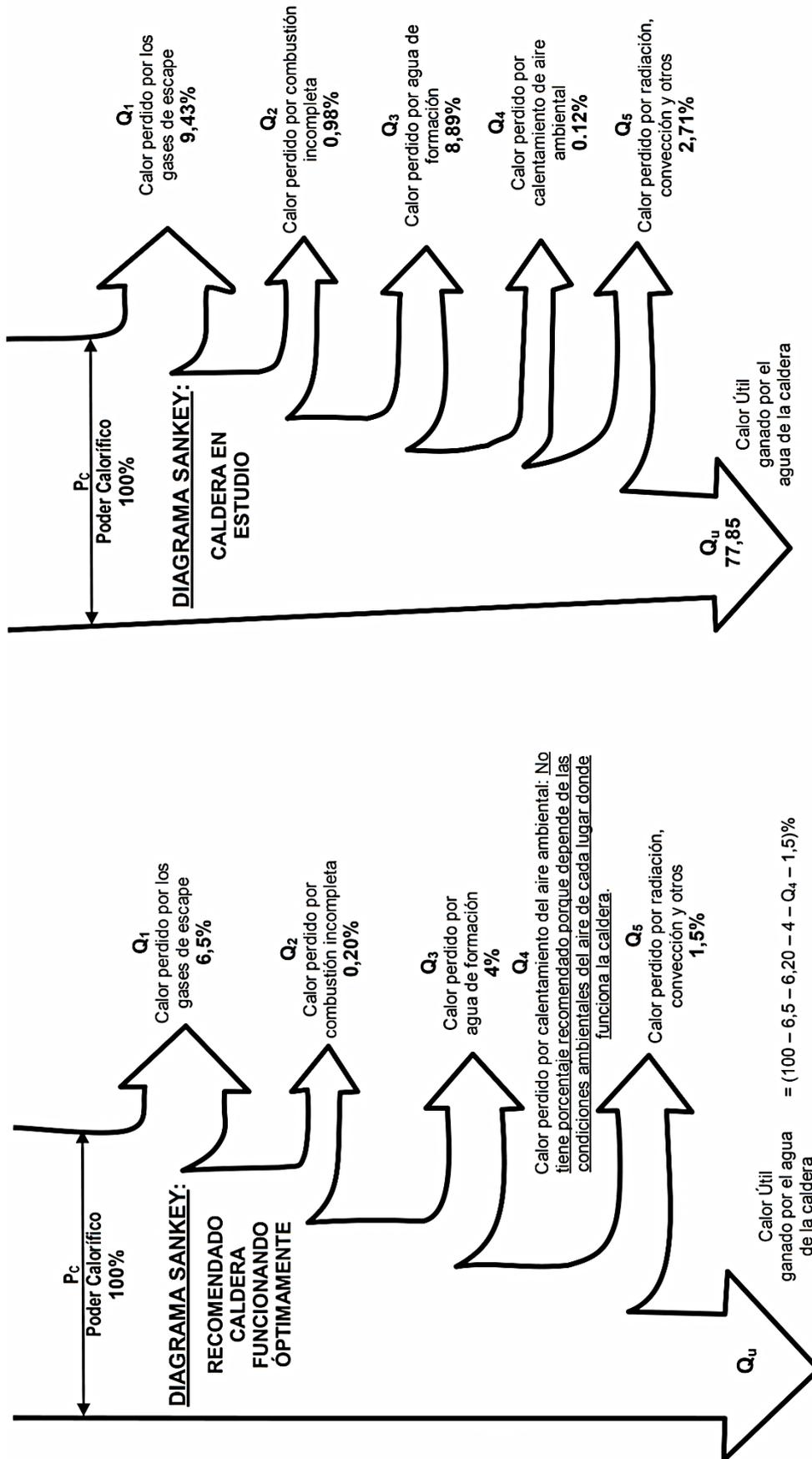
Además por información técnica experimental del funcionamiento de calderas pirotubulares en la industria desde el punto de vista del análisis de eficiencia energética se recomienda que los parámetros de funcionamiento, es decir los calores perdidos por

diferentes aspectos deben estar en rangos porcentuales específicos, de no ser así implica que la caldera debe tener problemas de funcionamiento, es decir fallas en elementos de la caldera que involucren las pérdidas de calor respectivas.

El balance energético o térmico a la caldera se aplicó con el objetivo de establecer si la energía aprovechada o útil y la energía perdida están entre los rangos prefijados por recomendaciones de información técnica para su funcionamiento normal y, de no ser así, analizar y determinar a qué se deben las discrepancias; ver su incidencia en la performance y diagnosticar y detectar las fallas de la caldera.

En el análisis energético para determinar a qué se deben las discrepancias entre el diagrama de Sankey establecido para la caldera y el diagrama de Sankey recomendado por informaciones técnicas, se utilizó conocimientos de termodinámica, transferencia de calor, máquinas térmicas y afines. En base a este análisis energético comparativo de los dos diagramas de Sankey que se muestran en la Figura 4.6 se diagnostican en forma predictiva las fallas de la caldera.

Figura 4.6: Análisis Energético Comparativo para Diagnosticar fallas en la caldera



Elaborado por el equipo de trabajo.

4.9.1. Calor perdido por los gases de escape (Q_1)

En el análisis energético comparativo de los diagramas de Sankey (Figura 4.6) el calor perdido por la caldera de estudio (9,43%) es superior al recomendado (6,5%), respecto a él un 45,08% mayor, lo cual no es recomendable desde el punto de vista de su funcionamiento que implica fallas en su funcionamiento. El calor perdido por gases de escape se calcula por la ecuación:

$$Q_1 = mg \cdot C_{og} \cdot (T_g - T_a)$$

Para disminuir este calor los gases de escape deben salir al mínimo de temperatura (T_g) como indicación de que se extrajo el máximo de energía liberada durante la combustión, para lo cual la caldera debe operar un porcentaje de exceso de aire recomendado por el fabricante que debe ser superior a 11,47% con el que está funcionando, lo que implicará disminuir la masa de los gases de escape, que depende de una buena combustión.

Una temperatura de los gases de escape (T_g) alta, nos indica también que existe problemas en la superficie de transferencia de calor ya sea del lado del agua o del lado fuego, por lo que tendría que inspeccionarse dichos dispositivos para disminuir la T_g y disminuir el calor perdido por gases de escape.

4.9.2. Calor perdido por combustión incompleta (Q_2)

En el análisis energético comparativo de los diagramas de Sankey (Figura 4.6) el calor perdido por combustión por su mínimo porcentaje en el balance térmico de la caldera, no es muy significativo, pero está muy relacionado con la pérdida de calor por los gases de escape.

El porcentaje de pérdida de calor por combustión incompleta de la caldera en estudio es de 0,98% respecto al porcentaje recomendado de 0,20%; considerando que esta pérdida es casi cinco veces la recomendada, es necesario disminuirla con acciones de mantenimiento para mejorar la combustión.

Considerando que el cálculo del calor perdido por combustión incompleta se realiza a través de la ecuación:

$$Q_2 = \frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO} \times (14150 - 3960) \times 0,85$$

Se analiza que mientras el %CO sea lo menor posible este calor será menor, lo que implica una eficiente combustión. El concepto de “exceso de aire” tiene relación con la cantidad de aire para la combustión que debe ser entregado por sobre el estequiométrico, para lograr una buena mezcla aire/combustible y con ello una buena combustión*. La magnitud del exceso de aire requerido por una caldera varía principalmente de acuerdo al tipo de combustible y a la tecnología del quemador; por lo tanto para disminuir la cantidad de calor perdido por combustión incompleta el % de exceso de aire se debe regular de acuerdo a la recomendación del manual del fabricante de la caldera (15% - 35%), porque la caldera en estudio está funcionado con un porcentaje de exceso de aire de 11,47%.

También una mayor temperatura del aire de la combustión permite obtener una combustión más completa⁶, por lo que las acciones de mantenimiento tendrán ese objetivo para disminuir la cantidad de calor perdido por combustión incompleta.

* Thermal Engineering Ltda. (2017) Santiago Chile.

⁶ Thermal Engineering Ltda. (2017). Santiago de Chile.

4.9.3. Calor perdido por radiación, convección y otros factores (Q_5)

En el análisis energético comparativo (Figura 4.6) de los diagramas de Sankey, la pérdida de calor por radiación, convección y otros (Q_5) de la caldera en estudio (2,71%) es casi doble respecto a lo recomendado (1,5%). Lo cual nos indica que hay fallas en la caldera en ciertos dispositivos que requieren mantenimiento.

Las pérdidas de calor por radiación y convección a la atmósfera, son proporcionales al tamaño de las calderas.

El valor de la pérdida de calor por radiación y convección de una caldera es constante independiente de la carga a la que se encuentra operando, sin embargo, su influencia en la eficiencia varía con la carga de la caldera. Por investigaciones de la American Boiler Manufacturing Association se establece que a mayor potencia de la caldera el porcentaje de calor perdido por radiación y convección tiende a disminuir.

Las pérdidas por radiación y convección aumentan al disminuir el régimen de fuego, es decir, deben operar a una carga entre 75 y 100% de acuerdo a las necesidades de vapor de la institución⁷.

Para disminuir la pérdida de calor por radiación y convección debemos dar un buen mantenimiento al refractario y aislamiento de la caldera, para no causar una gran pérdida de su eficiencia.

Como la caldera trabaja a 145 PSI, los equipos, tuberías, accesorios, etc., tienen temperaturas superficiales de 155 a 170°C y se crean gradientes de temperatura que generan pérdidas de energía al ambiente, las cuales deben evitarse con mantenimiento de los aislamientos.

⁷ GREENPYME (2015) Corporación Interamericana de Inversiones – Grupo BID.

También la suciedad de la superficie de transferencia de calor, incrementa la temperatura de la superficie de la caldera, se debe ejercer mantenimiento de la superficie de los tubos del lado del fuego como también a la superficie de los tubos en contacto con el agua, el aumento de la temperatura es debido al efecto aislante de las incrustaciones; una incrustación de 2,5 mm en el lado del agua implica una pérdida de combustible de 15% adicional al necesario.

4.9.4. Calor perdido por agua de formación (Q_3)

En el análisis energético comparativo (Figura 4.6) de los diagramas de Sankey, la pérdida de calor por agua de formación (Q_3) de la caldera en estudio (8,89%) es más que el doble respecto a lo recomendado (4%), analizando porqué la pérdida de calor o energía es excesiva en la expresión que nos permite calcular dicho calor:

$$Q_3 = 9H \left[C_{ea} (212 - T_c) + C_{Lv} + C_{ev} (T_g - 212) \right]$$

Observamos que los calores específicos del agua y vapor son constantes, como también el calor latente de vaporización; por consiguiente las variables que determinan que el calor perdido (Q_3) sea mayor o menor son las temperaturas del combustible (T_c) y de los gases de escape (T_g) y el hidrógeno de formación H . debemos disminuir la temperatura de los gases de escape para disminuir el calor sensible que se pierde, en la caldera el intercambio de calor es inadecuado en las superficies de transferencia de calor, para solucionar este aspecto se debe hacer la limpieza del interior de la caldera para la reducción de la formación de depósitos debido a un mal tratamiento del agua de alimentación a la caldera, lo cual está produciendo el recalentamiento de tubos y posible falla de los mismos. La presión del vapor debe disminuirse a un nivel compatible con

las necesidades de temperatura del usuario porque es la causa de las pérdidas de energía o calor debido a las altas temperaturas del gas de chimenea.

Por el contrario tenemos que aumentar la temperatura del combustible (T_c) para que el calor que se pierde en elevar el agua de formación hasta la temperatura de ebullición o cambio de fase disminuya, para lo cual debemos instalar un intercambiador de calor para aprovechar las altas temperaturas de los gases de escape y al mismo tiempo realizar un buen ajuste de exceso de aire, para lograr una combustión adecuada y monitorear una buena mezcla aire-combustible.

PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Aspecto a Solucionar	Acciones de Mantenimiento
<p>REDUCIR EL CALOR PERDIDO POR LOS GASES DE ESCAPE</p>	<p>Regular el % exceso de aire de acuerdo a manual del fabricante: 15-20%.</p> <p>Limpieza de la superficies de transferencia de calor de los tubos del lado del fuego y de los tubos en contacto con el agua para disminuir T_g.</p> <p>Reducir la presión de vapor para disminuir la temperatura de los gases de combustión T_g.</p> <p>Medir la concentración de oxígeno como indicador del exceso de aire.</p> <p>Vigilancia de la temperatura de gases de la combustión T_g.</p> <p>Verificar el correcto funcionamiento de termómetros, termostatos, manómetros, presostatos.</p> <p>Pruebas de funcionamiento del mando de combinación de la relación aire-combustible.</p> <p>Instalar un economizador para los gases de escape.</p>
<p>REDUCIR EL CALOR PERDIDO POR COMBUSTIÓN INCOMPLETA.</p>	<p>Análisis de gases de combustión y ajuste si es necesario del %CO.</p> <p>Regular el exceso de aire de acuerdo a Manual del fabricante: 15 – 20%.</p> <p>Verificar que la concentración de monóxido de carbono no sea superior a 400 ppm.</p> <p>Medir la concentración del oxígeno como indicador del exceso de aire.</p> <p>Verificar y supervisar la producción de humo como indicador de combustión incompleta.</p> <p>Verificar el tiro natural de la chimenea, de ser necesario implementar tiro artificial.</p> <p>Elevar la temperatura del aire de combustión con intercambiador en gases de escape.</p>

<p>REDUCIR EL CALOR PERDIDO POR RADIACIÓN, CONVECCIÓN Y OTROS.</p>	<p>Operar la caldera en un régimen de carga entre 75 y 100% de acuerdo a necesidades de vapor.</p> <p>Verificar que el aislamiento sea sin piezas de distancia (puentes térmicos) en el cuerpo cilíndrico de la caldera.</p> <p>Aislamiento de la caldera en todas las aberturas de inspección y limpieza en forma compacta y reducida.</p> <p>Comprobar el estado de partes que tienen refractario, como acceso al hogar, boca de acoplamiento del quemador, etc.</p> <p>En los tubos del lado de los gases, realizar una limpieza exhaustiva, eliminando hollines.</p> <p>En los tubos del lado del agua, realizar una limpieza exhaustiva, eliminando incrustaciones.</p> <p>Reducir la presión de vapor a un nivel compatible con las necesidades de temperatura del usuario.</p> <p>Aislar convenientemente las superficies de tuberías, accesorios, equipos, etc.</p>
<p>REDUCIR EL CALOR PERDIDO POR AGUA DE FORMACIÓN</p>	<p>Limpiar las incrustaciones en los tubos y superficies interiores de la caldera.</p> <p>Revisar el estado de los quemadores.</p> <p>Evaluar el tratamiento que se está realizando al agua de alimentación.</p> <p>Revisar la compresión del combustible.</p> <p>Instalar un intercambiador de calor entre combustible – gases de escape.</p> <p>Ajustar el exceso de aire para obtener una buena mezcla aire-combustible.</p> <p>Verificar el aislamiento de caldera, tuberías y accesorios.</p> <p>Reducir la presión del vapor a nivel compatible.</p>

Respecto al calor perdido por calentamiento del aire ambiental no existe porcentaje recomendado, porque esta pérdida de calor depende de las condiciones ambientales respectivas de cada lugar donde opere la caldera.

CONCLUSIONES

En el Proyecto de Investigación desarrollado se estableció una metodología para el diagnóstico de fallas en una caldera basado en su balance energético, considerando que el funcionamiento mecánico óptimo de una caldera se refleja en su eficiencia energética, es decir la razón entre la energía o calor útil absorbido por el agua y la energía liberada en el equipo; la diferencia entre la energía liberada y la energía absorbida corresponde a las pérdidas de calor calculadas de la caldera. En base a esta metodología se realizó una auditoría energética para proponer el plan de mantenimiento predictivo, lo que implicó que los resultados de los objetivos de las tesis fueron óptimos para establecer las siguientes conclusiones:

- Se realizó eficientemente el ensayo técnico experimental de los análisis químicos de los productos de la combustión o humos, utilizándose un analizador de gases portátil para tomar las muestras en la chimenea de la caldera, cuyas lecturas del instrumento nos permitió tener la información sobre el porcentaje del monóxido de carbono (CO), el porcentaje del bióxido de carbono (CO₂) y el porcentaje de oxígeno (O₂); información experimental cuyos valores cuantitativos están entre los rangos técnicos establecidos para una caldera funcionando en Arequipa, y que nos permitieron efectuar el balance energético; junto a la información del combustible que se quema, el petróleo o diesel 2 respecto a su composición química y su poder calorífico.
- El balance energético de la caldera de 150 BHP se realizó convenientemente con la información experimental y técnica del análisis de gases o humos y del combustible, determinándose la energía útil o aprovechada por la caldera y las pérdidas de calor o energía hacia el ambiente; cuyos resultados de los cálculos termodinámicos y de transferencia de calor se presentaron gráficamente en el diagrama de Sankey. El

balance energético de las calderas se hizo utilizando las unidades inglesas porque en la tecnología de las calderas es usual mantener dicho sistema de unidades en la práctica de la ingeniería. Considerando como referencia que una libra de petróleo diesel 2 tiene 19300 BTU de energía calorífica o química (100%) y en base al cual se calcularon los porcentajes de la energía útil (77,85%) aprovechada por la caldera para vaporizar el agua, el calor perdido por los gases de escape (9,43%), calor perdido por combustión incompleta (0,98%), calor perdido por agua de formación (8,89%), calor perdido por calentamiento del aire ambiental (0,12%) y el calor perdido por radiación, convección y otros factores (2,71%); concluyéndose en base al balance energético (diagrama de Sankey) que la eficiencia de la caldera es de 77,85% y que está en el límite del rango prefijado para calderas piro-tubulares de 78-80%.

- Y finalmente el análisis energético entre el diagrama de Sankey de la caldera y el diagrama recomendado por información técnica experimental (Figura 4.6), nos permitieron obtener las conclusiones importantes para la propuesta del plan de mantenimiento predictivo de la caldera; estableciendo en el análisis si la energía aprovechada o útil y los calores perdidos están entre los rangos prefijados (diagrama de Sankey recomendado) para su funcionamiento óptimo y de no ser así, analizamos a qué se debían las discrepancias en los porcentajes de cada uno de los calores perdidos por los diferentes aspectos del balance energético, vimos su incidencia en su performance y diagnosticamos y detectamos las fallas probables en la caldera relacionado a cada aspecto involucrado en el calor o energía perdida y, en base a ello propusimos el plan de mantenimiento predictivo.

RECOMENDACIONES

Los sistemas térmicos son equipos cuya función es la generación de calor a través de la combustión de un combustible con el oxígeno del aire, el equipo térmico más empleado es la caldera y es muy importante en los procesos de producción en la industria y por lo general son los mayores consumidores de energía en la planta, llegando a alcanzar costos superiores al 50% de la demanda energética total; en consideración a lo anterior se recomienda que el presente trabajo de tesis sobre la definición de una metodología de diagnóstico energético en generadores de vapor debe ser aplicado por constituir una herramienta importante para el diagnóstico y detección de fallas en el mantenimiento predictivo, metodología que no se ha encontrado en la revisión bibliográfica que se realizó y, los mantenimientos preventivos que proponen solo están basados en el manual de mantenimiento del fabricante.

Se recomienda que la metodología de diagnóstico energético en calderas desarrollado en la tesis sea tema de investigación en el laboratorio de máquinas térmicas de la Escuela Profesional, para preparar a los estudiantes para el mantenimiento y reparación de las calderas industriales, logrando que constituyan una fuente importante de puestos de trabajo en el área de la Ingeniería Mecánica; y además académicamente se impulsará el desarrollo de la investigación en nuestra Escuela Profesional aspecto fundamental que propugna la Universidad actualmente.

Nuestra Universidad por su localización geográfica a 3827 metros sobre el nivel del mar, lo consideramos un aspecto particular que nos motiva a recomendar que en el tema de nuestra tesis es importante que se continúe la investigación considerando la influencia de la altura en la operación de calderos pirotubulares o acuotubulares. En la altura la capacidad del caldero quedará limitada por la disminución de masa de oxígeno

para la combustión, determinando una disminución de la capacidad real del caldero para generación de vapor; y los fabricantes de equipos pretenden compensar las deficiencias del aire en altura vendiendo equipos de mayor capacidad, obteniendo mayores beneficios económicos.

REFERENCIAS

- Hernández, F. & Luna, R. (2017). Desarrollo de modelo de mantenimiento centrado en la eficiencia energética (Tesis de pregrado inédita). Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Antiguo Cuscatlan, El Salvador.
- Cusme, G. & Valencia, R. (2014). Mejoramiento del sistema de generación de vapor del laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química. (Tesis, de pregrado inédita). Universidad Técnica de Manabí, Puerto Viejo, Ecuador.
- Kohan, A. (2011). Manual de Calderas: Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, segunda, requerimientos y normativas. (pp. 577-630). Madrid. Editorial Mc Graw Hill.
- Sacristan, F. (2014). Manual del Mantenimiento Integral en la Empresa (pp. 43-65). Madrid. Editorial Fundación CONFEMETAL.
- J&C SERMIN S.A. (2005). Programa de mantenimiento (pp. 6-19). Publicación técnica de la empresa J&C SERMIN Sociedad Anónima, Lima, Perú.
- INTESA. (2010). Manual de mantenimiento de calderas. (pp. 69-115). Publicación técnica de la empresa INTESA, Lima, Perú.
- Laboratorio de Ingeniería Mecánica. (2007): Generador de vapor (pp. 20-38), Lima, Editorial Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, J. (2012). Operación de calderas industriales (pp. 27-50). Lima, Editorial COES.
- Casillas, A. (1999). Ingeniería de Mantenimiento. España, Editorial Hispanoamericana.

- Goñi, J. (2010). Máquinas hidráulicas y térmicas (pp. 220-255). Lima, Fondo Editorial Universidad de Lima.
- Guevara, R. (2013). Manual de diagnósticos energéticos en sistemas térmicos (95-125). Bogotá, Editorial EAP de Ingeniería de Energía.
- Montalvo, L. (2009). Evaluación y comparación técnico-económica del rendimiento de la caldera del Comedor de la UNA – Puno para operar con GLP (Tesis de pregrado inédita). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Levenspiel, O. (2011). Fundamentos de Termodinámica (pp. 252-270), México, Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Yunus, A. Afshin, J. (2011). Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y aplicaciones (pp. 64-115). México, Editorial McGraw Hill.
- Moran, M. Shapiro, H. (2012). Termodinámica Técnica (pp. 112-158), Barcelona, Editorial Reverté S.A.
- Calderas Industriales E.I.R.L. (2005). Mantenimiento Industrial, Arequipa - Perú.

ANEXO 1

FOTOGRAFÍAS DE LA SALA DE MÁQUINAS



Vista frontal de la caldera



Placa de la bomba de agua.



Tablero de Encendido



Tanques de ablandamiento



Controles Electrónicos

ANEXO 2

FALLAS PROBABLES

FALLA	CAUSA	SOLUCIÓN
1) Se acciona el selector de ignición y el motor no arranca. Suena la alarma.	- Nivel de agua muy bajo. - Boya perforada. - Resorte final del eje de la boya defectuosa.	- Revisar el control automático de alimentación de agua. - Chequear si llega tensión a la bomba.
2) Se acciona el selector de ignición y el motor arranca al cabo de 30 seg. se bloquea y suena la alarma.	- Falta de petróleo.	- Revisar el tanque diario de petróleo. - Chequear si llega tensión al motor de la bomba. - Chequear si llega tensión al solenoide del petróleo. - Revisar la válvula de ingreso de petróleo a la bomba.
3) Se acciona el selector de ignición y el motor no arranca. No suena la alarma.	- Bloqueo por el presostato.	- La caldera está bien, el presostato de seguridad bloquea porque la caldera a llegado a su límite máx. de presión de trabajo.
4) Aumento excesivo de la temperatura en la chimenea.	- Refractario posterior caído.	- Cambio del refractario.
5) Presión de vapor supera la presión de trabajo se activa la válvula de seguridad.	- Presostato defectuoso.	- Revisar si llega tensión al presostato. - Resorte del presostato rendido o roto. - Revisar la ampolla de mercurio.
6) Se acciona el selector de ignición y el motor arranca al cabo de 30 seg. se bloquea y suena la alarma.	- No se prende el piloto.	- Revisar si llega tensión al transformador. - Revisar si hay alta tensión a la salida del transformador. - Revisar si hay gas en los balones. - Revisar si llega tensión al solenoide de gas.

7) Quemador al momento de arranque que lanza un fognazo.	- Fuga de petróleo. - Toberas desbo...	- Revisar la solenoide (no hermética). - Cambio de toberas.
8) Quemador en funcionamiento se bloquea, suena la ...	- Falta de llama (corte por fotocelda).	- Revisar la existencia de petróleo.
9) Quemador al momento de arranque lanza fognazos seguidos.	- Deficiencia en la salida de los gases.	- Revisar la chapaleta de humos.
10) Pequeño aumento de temperatura en la chimenea.	- Llama muy larga. - Tubos con mucho hollín.	- Regular la combustión (disminuir aire y petróleo). - Limpieza interna de los tubos.
11) Presencia de humo negro a la ...	- Mala combustión. - Exceso de petróleo	- Revisar si llega tensión al modutrol.
12) Presencia de humo blanco a la salida de la chimenea.	- Mala combustión. - Exceso de aire.	- Revisar si llega tensión al modutrol. - Revisar su articulación. - Aumentar la regulación de la bomba de petróleo.
13) Baja en la producción de vapor.	- Mala transferencia de calor al agua. - Presencia de incrustaciones.	- Lavado químico de la caldera. - Limpieza interna de los tubos.
14) Vapor con mucha humedad.	- Nivel de agua muy alto.	- Regular el controla utomático de nivel de agua.
15) Manómetro no registra la presión real existente.	- Manómetro defectuoso. - Obstrucción en la línea (incrustación).	- Revisar manómetro (rotura del pelo, perforación). - Varillar la línea de alimentación.

ANEXO 3

OPERACIÓN DE CALDERAS

Procedimiento diario para la operación de una caldera destinada a la generación de vapor y agua caliente**I. ARRANQUE DIARIO DE UNA CALDERA.**

Para el arranque diario de una caldera se procede de la siguiente forma:

1. Controlar el nivel de agua, abrir llaves de prueba de control de nivel para que entre aire al caldero.
2. Abrir las válvulas de alimentación de combustible y agua.
3. Conectar la llave de interrupción principal del caldero.
4. Ocurre la etapa de encendido:
 - a) Purga: Solamente se enciende el ventilador para barrer de la caldera los gases de combustión que se pudieron quedarse en el momento del apagado.
 - b) Encendido de la llama piloto: Es un pequeño quemador de gas se emplea con el fin de encender la llama principal se mantiene hasta lograr encender la llama principal.
 - c) Arranque de llama principal: Durante el tiempo (corto) en que la llama piloto está encendida se debe abrir la válvula principal de combustible y así permitir el paso de petróleo a las boquillas del quemador y así lograr encender la llama principal.
5. Se espera empiece subir la presión, se cierra la llave de purga de aire. Se espera que la presión suba al punto que ha sido regulado.
6. Abrir válvula de salida de vapor lentamente

NOTA; Una llama buena es de color anaranjado claro y uniforme.

- Si se observa humos negros, es por el exceso de petróleo y se debe abrir más la compuerta de aire.
- Si se observa humo blanco o la llama muy compacta, clara brillante, es debido al exceso de aire por lo tanto deberá cerrarse un poco la compuerta de aire

II. REGULACIÓN DE LA PRESIÓN DE TRABAJO

La presión de arranque del quemador de regulador con el tomillo superior izquierdo de presuretrol. La escala izquierda (marcado por un lado en LBS/plg²) y por otro lado en Kgs/cm² indica la presión de la que arranca el quemador si baja la presión del caldero de 0-15 PSI.

La presión de parada la determina la escala de la derecha marcada de 0-150 PSI y se regula con el tomillo que está encima de la escala.

El quemador parará cuando la presión del caldero suba esta cantidad de PSI por encima de la presión de arranque del quemador.

Ejemplo:

Escala izquierda 10 PSI

Escala derecha 100 PSI

El quemador arranca cuando la presión baja a 90 PSI y parará a las 100 PSI.

III. REGULACIÓN DE LLAMA ALTA

(Esto es solo para quemador de 2 etapas).

La tuerca de la válvula reguladora de presión de petróleo (WEBSTER) sirve para regular la potencia de la llama alta mientras más baja se le regule mayor será la llama alta, también aumentará la presión de retomo.

Esta presión es de 100 PSI en llana baja y en 250 a 300 PSI en llama alta. La regulación se puede obtener con una llave allen de 1/8" ajustando un tapón que se encuentra en la bomba Webites para la llama alta y similarmente regulado la válvula reguladora de presión para la llama baja.

La regulación de la cantidad de aire que entra al caldero se hace con la manija que conecta con el brazo de la compuerta bajando el brazo aumentando la cantidad de aire.

IV. PARADA DIARIA DE UN CALDERO

Se procede de la siguiente forma:

1. Se cierra la válvula de vapor
2. Se cierra la válvula de agua de alimentación.
3. Se desconecta el interruptor de panel principal de mando

4. Se cierra la válvula de combustible

V. PARADA DEL CALDERO POR TIEMPO LARGO

Se procede de la siguiente manera:

1. Se llena el caldero con agua blanda. Si la parada es por meses se recomienda el uso de algún aditivo antioxidante.
2. Desconectar interruptor principal de corriente, saque los fusibles y guarde en lugar adecuado.
3. Cierre las válvulas de vapor, agua y combustible.
4. Proteja los accesorios más importantes del polvo y de la humedad.

VI. ALGUNAS PRECAUCIONES A TOMAR.

1. Si el encendido ha fallado tres veces, antes de seguir probando con el encendido se deberá encontrar la causa de la falla. En cada prueba entra cierta cantidad de petróleo sin quemar dentro del hogar que se ira acumulando.
2. No bloquear ni puntear con alambre los controles de presión y agua.
3. No se debe de someter el caldero a cambios bruscos de temperatura que pueda ocasionar el aflojamiento de los tubos o dilatación.
4. Siempre se debe mantener el caldero, el quemador y el tablero limpio.
5. Revisar siempre el folleto de instrucciones.
6. El cuidado y mantenimiento de un caldero siempre debe estar a cargo de una persona entendida y responsable

ANEXO 4

TRATAMIENTO DE AGUA

El tratamiento de agua es un aspecto muy importante para tomar en cuenta para el buen funcionamiento de la caldera debido a que el agua posee sales de solución que al aumentar la temperatura del agua estas sales se precipitan adhiriéndose a los tubos y demás superficies en contacto con el agua haciendo que la transferencia de calor se reduzca y por lo tanto se necesite un tratamiento especial en el momento de mantenimiento.

Se sabe que el agua sea cual sea la fuente de suministro (en nuestro caso la SEDAPAR) tiene una cantidad de impurezas que para la generación de vapor son perjudiciales.

1. OBJETIVOS IDENTIFICADOS DEL TRATAMIENTO.

Los objetivos principales indicadores se pueden mencionar en los siguientes:

- Prevenir la corrosión por gases o ataque químico en las calderas y el sistema de condensado.
- Prevenir el arrastre de sólidos con el vapor y producir un vapor mucho más limpio.

2. IDENTIFICACIÓN DE IMPUREZAS:

Las impurezas que se pueden identificar ya sean por métodos visuales o de análisis que podemos identificar del agua de toma de reservorio a podemos mencionar así:

- a) **Sólidos suspendidos:** Se trata de materia casi insoluble finalmente dividida que pueden ser tipo orgánico como: fósiles de vegetales, aceites grasas suspendidos y otros, o también de tipo inorgánico como: arcillas, arenisca fina, fosfatos.

Estos sólidos suspendidos son causantes de espumas, producen depósitos y se adhieren a la tubería.

- b) **Alcalinidad.** Se trata de la presencia de carbonatos, bicarbonatos y/o hidróxidos, se expresan como carbonato de calcio se identifican con prueba de tipo químico en donde se miden el grado de PH, esto con lámina indicadora.

Se pueden identificar 3 tipos de alcalinidad a mencionar:

- Alcalinidad M o total: neutraliza ácido hasta un PH de 4,3.
- Alcalinidad P o a la fenolftaleína neutraliza ácido hasta un PH 8,3.

- Alcalinidad al OH corresponde a la fracción de OH, se calcula a partir de valores de P y M, alcalinidad al OH = (P-M) X 2 es este caso se debe de tratar de mantener suficiente alcalinidad en el agua de caldero ya que evita la corrosión.

- c) **Gases Disueltos:** Los gases disueltos más comunes en agua subterránea de la ciudad blanca se pueden identificar al CO₂ libre y oxígeno disuelto causante de corrosión.

El CO₂ será el causante de corrosión formando ácido carbónico en condensador.

- d) **Hierro:** El hierro es uno de los componentes que más se encuentran. En forma de óxido se deposita en la caldera constituyendo en la mayoría de veces el causante de fallas en los tubos.

En el agua de caldero de nuestro caso según estudios de SEDAPAR 05-07-98:

HIERRO = 0,098 ppm

OXÍGENO = 0,0067 ppm

SÍLICE = 110 ppm

PH = 0,9

Alcalinidad total = 550 ppm Ca H CO₂ ← carbonato de calcio.

3. AGENTES QUÍMICOS USADOS Y ELIMINADOS.

En el proceso de ablandamiento de agua se hacen presentes las siguientes concentraciones eliminadora y eliminados.

Carbonato de calcio (Ca (HCO₃)₂) → a eliminar

Carbonato de magnesio Mg (HCO₃)₂ → a eliminar

Sulfato de calcio CaSO₄ → a eliminar

Sulfato de Magnesio MgSO₄ → a eliminar

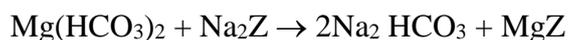
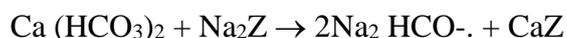
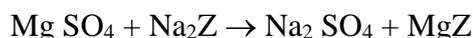
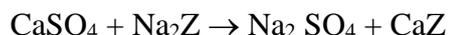
Solución de agua con sal NaCl → regeneradora de Zeolite

Zeolite (ablandador) Na₂ (Al₂ Sb OB) = Na₂Z → eliminador

4. PROCEDIMIENTO:

Se sabe que algunos compuestos intercambian iones con otros; este fenómeno químico se aplica para el tratamiento con zeolite, si consideramos que el agua

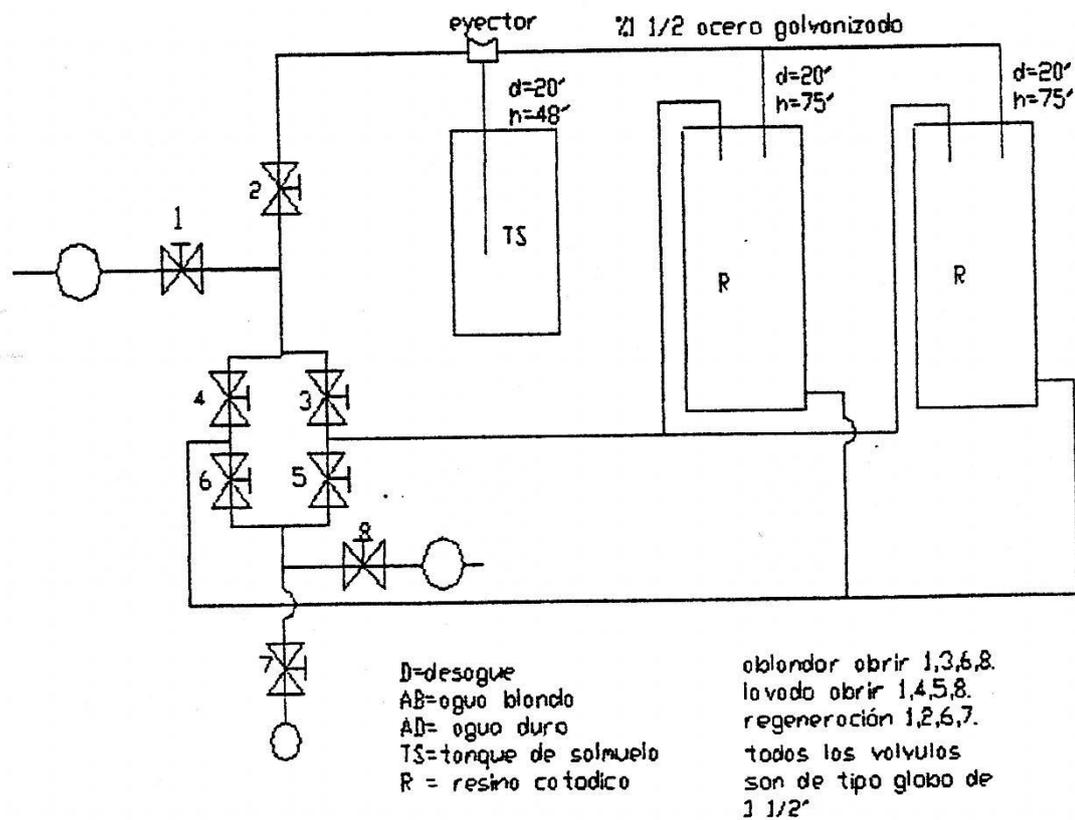
circula en sentido de las flechas de ablandamiento en el esquema anterior entonces en el tanque a se producen las reacciones siguientes:



En este proceso la Zeolite pierde o cede Na ganando Ca y Mg cumpliendo de esta manera su misión ablandadora, debido a la saturación de la Zeolite es necesario regenerarla su misión ablandadora, debido a la saturación de la Zeolite es necesario regenerarla con una solución de agua más sal.

El proceso de ablandamiento ocurre en todo momento casi las 24 horas acumulándose agua así en el reservorio de agua ablandada desde donde serán impulsadas hacia la caldera, el proceso de regeneración ocurre en un total de 1 hr. Por cada turno para los diferentes procesos se maniobran válvulas de la siguiente forma:

- Para el proceso de ablandamiento de agua se abren las válvulas 1, 3, 6, 8, para permitir la libre circulación del agua hacia el tanque A, dirigiéndose hacia el tanque de acumulación de agua.
- En el caso del proceso de regeneración se abren las válvulas 1, 2, 6, 7 circulando el agua al tanque de salmuera, en el cual el eyector la impulsa hacia el tanque A para la regeneración de la zeolite. Y el agua que atraviesa el tanque ablandador pasará al circuito de desagüe.
- El otro circuito que es posible usar es el proceso que sigue el agua en el lavado de las tuberías la cual se hace cada semana (1 vez) abriendo las válvulas 1, 4, 5, 7 el agua circula al desagüe.



Sistema de Tratamiento de Agua