

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



**OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GENERADOR DE
VAPOR (CALDERA) DEL COMEDOR UNIVERSITARIO DE
LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO
CON CAPACIDAD DE 150 KG DE VAPOR/HORA**

TESIS

PRESENTADA POR:

Carlos Miguel Mamani Montesinos

Frey Wilson Ramos Velez

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

**“OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL GENERADOR DE VAPOR (CALDERA)
DEL COMEDOR UNIVERSITARIO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL
ALTIPLANO DE PUNO CON CAPACIDAD DE 150 KG DE VAPOR/HORA”**

TESIS PRESENTADA POR:

CARLOS MIGUEL MAMANI MONTESINOS

FREY WILSON RAMOS VELEZ

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 18-jun-2018

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE:



M. Sc. MARIO MAMANI PAMPA

PRIMER MIEMBRO:



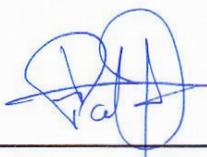
Ing. LEONEL MARINO CASTILLO ENRIQUEZ

SEGUNDO MIEMBRO:



M. Sc. MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO

DIRECTOR / ASESOR:



M. Sc. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

ÁREA: Mecánica.
TEMA: Calderas.

DEDICATORIA

Este proyecto de tesis está dedicado en primer lugar a Dios, por haber permitido que concretemos esta meta, a nuestros padres que siempre velan por nuestro bienestar y nos dan apoyo incondicional, a los Ingenieros de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, ya que ellos asentaron las bases de nuestro desarrollo profesional.

.....*Gracias Totales*

AGRADECIMIENTOS

Estamos agradecidos con Dios, quien nos dio la oportunidad de vivir y nos dio la fuerza necesaria para poder continuar durante nuestra vida.

Agradecemos a la Universidad Nacional del Altiplano por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente.

Agradecemos cordialmente a nuestros padres y familiares que nos apoyaron en nuestra formación profesional.

A nuestros amigos que nos dieron el apoyo emocional para redactar esta tesis.

A todos los docentes de la UNA, quienes día a día brindan y comparten parte de sus conocimientos.

A los docentes de la Escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, quienes nos brindaron sus conocimientos y lo necesario para crecer en forma profesional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
CAPÍTULO I	14
INTRODUCCIÓN	14
1.1 Planteamiento del problema de investigación.....	16
1.2 Formulación del problema	17
1.2.1 Problema general.....	17
1.2.2 Problemas específicos	17
1.3 Justificación del problema	17
1.4 Objetivo de la investigación.....	18
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO II	19
REVISIÓN DE LITERATURA	19
2.1 Antecedentes:.....	19
2.2 Marco Conceptual.....	20
2.2.3 Generador de vapor	20
2.2.4 Partes de la caldera.....	21
2.2.5 Tipos de Calderas	23
2.2.5.1 Calderas de tubo de fuego o Pirotubulares	25
2.2.5.2 Calderas Acuotubulares.....	28
2.3 El vapor: Principios de transformación.....	32
2.3.1 Leyes de la transformación del agua en vapor	33
CAPÍTULO III	45
MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1 Equipos	45
3.1.1 Caldera pirotubular.....	45
3.2 Instrumentos.....	46
3.2.1 Termocupla digital	46
3.2.2 Psicrómetro.....	47
3.3 Métodos.....	48
3.3.1 Procedimiento a seguir	49

3.3.2	Datos experimentales a obtener.....	49
3.4	Metodología Sistematizada para realizar el Balance Energético de la Caldera.....	49
3.4.1	Determinación del Flujo de Vapor (\dot{m}_v).....	49
3.4.2	Determinación del Flujo de Combustible (\dot{m}_c)	50
3.4.3	Análisis de los gases de escape.....	51
3.4.4	Determinación de la relación aire combustible real	51
3.4.5	Determinación de la relación aire combustible teórica	52
3.4.6	Cálculo del porcentaje de Exceso de aire en la combustión.....	52
3.4.7	Cálculo del calor útil (Q_1).....	53
3.4.8	Calor perdido en gases de escape (Q_2)	53
3.4.9	Calor perdido por evaporación del agua de formación (Q_3).....	55
3.4.10	Calor perdido por combustión incompleta (Q_4)	55
3.4.11	Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q_5). 57	
3.4.12	Calor perdido por radiación, convección y otras pérdidas (Q_6)	57
3.4.13	Cálculo del HP de caldera (HP_C).....	58
3.4.14	Cálculo del Factor de Evaporación (f_e)	58
3.4.15	Cálculo de la evaporación equivalente (E_e).....	59
3.4.16	Producción de caldero (P_v)	59
3.4.17	Rating (%R).....	60
3.4.18	Cálculo de la eficiencia de la Caldera (η)	60
3.5	Metodología para Resumir los Cálculos del Balance Térmico en el Diagrama de Sankey	61
3.5.1	Metodología de cálculo de la performance	62
3.5.1.1	Cálculo del HP de caldera (HP_C).....	62
3.5.1.2	Cálculo del factor de evaporación (f_e).....	63
3.5.1.3	Evaporación equivalente (E_e)	63
3.5.1.4	Producción de Caldero (P_v)	64
3.5.1.5	Rating (%R).....	64
3.5.1.6	Eficiencia del Generador (η)	65
3.5.1.7	Determinación del pH.....	65
3.6	Ensayo técnico experimental	65
CAPÍTULO IV.....		67
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		67
4.1	Resultados de los cálculos del balance energético de la caldera	68

4.1.1	Cálculo del flujo de vapor (\dot{m}_v).....	68
4.1.2	Cálculo del flujo de Combustible (\dot{m}_c)	69
4.1.3	Cálculo para el análisis de gases.....	70
4.1.4	Cálculo de la relación aire combustible real ($(r_{a/c})_{real}$).....	70
4.1.5	Cálculo de la relación aire combustible teórico ($(r_{a/c})_{teórico}$)	72
4.1.6	Cálculo del exceso de aire	73
4.1.7	Cálculo del calor útil (Q_1).....	73
4.1.8	Calor perdido en gases de escape (Q_2)	75
4.1.9	Cálculo del calor perdido por evaporación del agua de formación (Q_3) ..	76
4.1.10	Cálculo del calor perdido por Combustión incompleta (Q_4).....	77
4.1.11	Cálculo del calor perdido por calentamiento de la humedad del aire (Q_5)77	
4.1.12	Cálculo del calor perdido por radiación, convección y otros (Q_6)	79
4.1.13	Cálculo del HP de Caldera (HP_c).....	80
4.1.14	Cálculo del factor de evaporación (f_e).....	80
4.1.15	Cálculo de la evaporación equivalente (E_e).....	81
4.1.16	Cálculo de la producción de vapor (P_v).....	81
4.1.17	Cálculo del Rating (%R).....	82
4.1.18	Calculo de la eficiencia de la caldera (η)	83
4.2	Resultados del balance térmico en el diagrama de SANKEY	83
4.3	Valores Técnicos recomendados para el funcionamiento eficiente de una caldera	85
	CONCLUSIONES	94
	RECOMENDACIONES	97
	ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Caldera o generador de vapor	21
Figura 2.2 Caldera pirotubular de dos pasos	26
Figura 2.3 Caldera Pirotubular de 3 pasos.....	26
Figura 2.4 Caldera Pirotubular de 4 pasos.....	27
Figura 2.5 Caldera acuotubular "Tipo A"	31
Figura 2.6 Caldera acuotubular "Tipo D"	31
Figura 2.7 Caldera acuotubular "Tipo O"	32
Figura 2.8 Flujo de calor de las tuberías hacia el agua.....	37
Figura 2.9 Calor fluye a través de la pared de los tubos hacia el aire	38
Figura 2.10 Entalpia de 1 kg. de vapor a presión atmosférica.....	38
Figura 2.11 Calor necesario a una presión de 10 Bar.	39
Figura 2.12 Formación de 1 kg. de vapor a presión atmosférica.....	40
Figura 3.1 Caldera pirotubular 250 BHP UNA Puno	46
Figura 3.2 Termocupla digital	47
Figura 3.3 Psicrómetro	48
Figura 3.4 Diagrama de Sankey	62
Figura 4.1 Diagrama T-S	73
Figura 4.2 Tabla Psicrométrica.....	78
Figura 4.3 Resultados en Diagrama de Sankey	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Comparación de los calores/kilogramos de agua en fase líquido-vapor.....	34
Tabla 2.2: Conductividad del agua de calderas ASME	43
Tabla 2.3: Límites de impurezas recomendados para el agua de alimentación y agua de calderas a diferentes presiones de trabajo.	44
Tabla 3.1 Reacciones químicas de combustión.....	56
Tabla 4.1: Calores calculados en el Balance Térmico en porcentaje	84
Tabla 4.2: Calor útil y calores perdidos del diagrama de Sankey.....	86
Tabla 4.3: Porcentaje de los calores por recomendaciones técnicas para funcionamiento óptimo de calderas	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Características técnicas de los equipos en el presente estudio.....	99
Anexo 2: Operación y mantenimiento de la caldera pirotubular serie PTH.....	101
Anexo 3: Fallas más comunes en calderas pirotubulares	106

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

BHP:	Brake Horse Power (unidad de potencia)
BTU:	British Thermal Unit (unidad de energía)
C:	Carbono
Cal:	Caloría (unidad de energía)
h:	Entalpia
H:	Hidrógeno
HP:	Horse Power (unidad de potencia)
Kg:	Kilo-gramos
kJ:	Kilo-Joules
Mg:	Magnesio
N:	Nitrógeno
O:	Oxígeno
°C:	Grados Celsius
P:	Presión
pH:	Coefficiente de acidez o basicidad
psi:	Pounds-force per square inch (unidad de presión)
s:	Entropía
T:	Temperatura

RESUMEN

Actualmente en el Perú, a medida que el costo de combustible aumenta progresivamente mientras que los combustibles fósiles son limitados, la conservación de energía es una necesidad. Para que la industria conserve energía sin disminuir la producción, debe encontrar formas de usar la energía con mayor eficiencia. Considerando la gran cantidad de calderos que existen en la industria, una optimización de un 1% en la mejora en su eficiencia de operación significará un ahorro significativo en la economía del país. En ese contexto se realizó el balance térmico de la caldera marca “INTESA” de 250 HP de potencia en la caldera del comedor universitario, cuyo ensayo teórico y experimental se realizó a finales del mes de diciembre del 2016 con el objetivo de realizar la optimización energética de la caldera pirotubular de la Universidad Nacional del Altiplano. La metodología experimental utilizada es la establecida en el código ASME (The American Society of Mechanical Engineer, Steam Generating Units Power Test Codes 4.1). a través del cual se midieron parámetros de funcionamiento de la caldera en condiciones de estado estable en base a los cuales se realizaron los cálculos necesarios para cuantificar la distribución de la energía del combustible que se libera por la combustión y establecer si la energía útil o aprovechada y la pérdida están entre los rangos técnicos prefijados para su funcionamiento eficiente y de no ser así, analizar a qué se deben las discrepancias, ver su incidencia en la performance y diagnosticar las fallas de la caldera. Se calculó una eficiencia de la caldera de 66,99%, concluyéndose que es aceptable considerando que la caldera no opera a plena carga ($\eta = 72\%$) y la optimización energética de la caldera se realizará en base al análisis del diagrama Sankey para diagnosticar y recomendar las posibilidades de optimización en el lado de los gases de escape, posibilidades de optimización en combustión y optimización de pérdidas de convección y radiación, medidas que elevaron el calor útil (Q_1) o calor aprovechado por la caldera con la consiguiente optimización o aumento de la eficiencia de la caldera.

Palabras clave: Caldera pirotubular, optimización, balance energético, calor y eficiencia.

ABSTRACT

Currently in Peru, as the cost of fuel increases progressively while fossil fuels are limited, energy conservation is a necessity. In order for the industry to conserve energy without decreasing production, it must find ways to use energy more efficiently. Considering the large number of cauldrons in the industry, an optimization of 1% improvement in its operating efficiency will mean a significant saving in the country's economy. In this context, the thermal balance of the boiler "INTESA" of 250 HP of the university dining room boiler was carried out. The experimental theoretical test was carried out at the end of December 2016 with the objective of performing the energy optimization of the Universidad Nacional del Altiplano's pyrotubular boiler. The experimental methodology used is established in the ASME code (The American Society of Mechanical Engineer, Steam Generating Units Power Test Codes 4.1). through which boiler operating parameters were measured under steady-state conditions on the basis of which the necessary calculations were made to quantify the energy distribution of the fuel released by the combustion and to establish whether the useful or exploited energy and loss are among the technical ranges preset for its efficient operation and if not, analyze what the discrepancies are due, see their impact on the performance and diagnose the boiler faults. A boiler efficiency of 66.99% was calculated and concluded that it is acceptable considering that the boiler does not operate at full load ($\eta = 72\%$) and the boiler energy optimization will be performed based on the analysis of the Sankey diagram to diagnose and recommend optimization possibilities on the exhaust gases, optimization possibilities in combustion and optimization of convection and radiation losses, measures that increased the useful heat (Q_1) or heat used by the boiler with the consequent optimization or increase of the efficiency of the boiler.

Keywords: Pirotubular boiler, optimization, energy balance, heat and efficiency.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El uso de calderas en el ámbito industrial, es de gran importancia debido a que la generación de vapor es una de las formas mas utilizadas de transferencia de energía, en este caso en concreto, el calor. Se utiliza el vapor saturado o también el vapor sobrecalentado para lograr el cometido, el uso de este equipo se da por lo general en hospitales, industrias alimentarias, industria petrolera, lavanderías, industrias de generación eléctrica, industrias textiles, etc.

En este proyecto se toma en cuenta la operación de la caldera que se encuentra operando en el comedor de la Universidad Nacional del Altiplano en Puno debido a que este equipo es utilizado con el fin de preparar los alimentos para los estudiantes de dicha casa de estudios, el equipo también es utilizado para limpiar los cubiertos utilizados por los estudiantes.

Aunque una caldera pueda utilizarse en forma variada, ya sea calefacción, generación energética, etc. En el caso de la Universidad Nacional del Altiplano, se utiliza para la cocción de alimentos y para la limpieza de cubiertos generalmente.

Hay dos tipos de calderas comúnmente utilizadas en la industria; las calderas pirotubulares y las calderas acuotubulares, en el caso de la Universidad Nacional del Altiplano se tiene una caldera pirotubular de 3 pasos que opera con el combustible denominado diesel 2 que es proveniente de la refinación del crudo de petróleo en cuyo caso es un recurso no renovable.

La demanda en el mercado nacional del combustible utilizado por la caldera del comedor es elevada, lo que ocasiona que el costo aumente progresivamente, esto hace que sea necesario realizar una optimización energética para incrementar la eficiencia del equipo objeto de este estudio.

Este presente documento se estructura de la siguiente manera:

CAPÍTULO I: El contenido de este capítulo, está enfocado en mostrar (de manera breve) el objeto del estudio, el problema que se encuentra, una formulación del problema, la justificación y también los objetivos generales y específicos sobre los cuales trata la presente investigación.

CAPÍTULO II: El contenido de este capítulo está enfocado en la revisión literaria que describe; el equipo objeto del presente estudio, los antecedentes y los instrumentos utilizados para realizar la toma de datos durante la operación de la caldera.

CAPÍTULO III: En este capítulo se describen los materiales, procedimientos y los métodos utilizados para el desarrollo de esta investigación.

CAPÍTULO IV: El contenido de este capítulo está orientado a la demostración de los resultados y a la justificación y discusión de estos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES: Estos son los capítulos finales en cuyo contenido se puede encontrar las conclusiones generales de la investigación y también las recomendaciones basadas en los resultados.

1.1 Planteamiento del problema de investigación

En el mundo de hoy, a medida que el costo de combustible aumenta progresivamente mientras que los combustibles fósiles son limitados, la conservación de energía es una necesidad. Para que la industria conserve energía sin disminuir la producción, deben encontrarse formas de usar la energía con mayor eficiencia.

Se estima que más del 50% de la energía consumida por la industria se emplea para generar vapor en calderas. Aumentando la eficiencia de estas calderas, se tendría un impacto significativo en la conservación de la energía.

El generador de vapor (caldera) es una máquina importante para el funcionamiento del comedor universitario, para cocer los alimentos y lavar los utensilios. La operación óptima de la caldera es una necesidad evidente de la universidad, debido a las presiones y temperaturas elevadas a las que trabaja ya que constituyen la causa principal de peligros por riesgo de explosiones. Considerando el aspecto económico, las calderas tienen elevados costos de operación (grandes cantidades de combustibles quemados) y de mantenimiento.

En las industrias, los generadores de vapor son los mayores consumidores de energía, llegando a totalizar costos superiores al 50% del costo total. Por lo tanto, elevar la eficiencia energética de la caldera significará un ahorro económico significativo para la

Universidad. Debido a las razones formuladas, realizar la optimización energética experimental del sistema de generación de vapor es una de las necesidades prioritarias, porque el mantenerlo trabajando en condiciones óptimas conllevará beneficios importantes: como el aumento de la seguridad del personal y del equipo; Lo más importante, el aumento de la eficiencia en la generación de vapor que conllevará ahorros económicos.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la optimización energética desarrollada en la caldera pirotubular marca “INTESA” de 250 BHP del comedor universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el balance energético experimental de la caldera del comedor?
- ¿Cómo expresar los resultados obtenidos del balance en un diagrama Sankey?
- ¿Cuáles son las fallas en el funcionamiento de la caldera y como corregirlas para la optimización de la eficiencia energética?

1.3 Justificación del problema

La justificación energética, considerando la coyuntura actual respecto al calentamiento global de la tierra, es que la optimización energética a desarrollarse implicará el ahorro y uso eficiente de la energía que permitirá obtener ahorros económicos sustanciales a la Universidad, reduciendo las emisiones de gases invernadero (dióxido de carbono) a la atmósfera.

Realizar un balance energético de la caldera requiere la toma de datos mediante el uso de equipos de medición específicos y la operación de forma desbalanceada conlleva a un déficit de la eficiencia de operación.

Un diagrama Sankey nos permite ver en forma resumida el flujo que tiene el calor y la ausencia de este diagrama conlleva a un desconocimiento del aprovechamiento o pérdidas del calor que es generado por la caldera.

Desconocer las fallas y el cómo corregirlas podría generar la inoperatividad del equipo lo que conllevaría a un costo mayor por mantenimiento correctivo y la ausencia del servicio en la universidad.

Además, académicamente la iniciación y capacitación en investigación es un aspecto fundamental en la formación de un ingeniero mecánico electricista, teniendo en cuenta que el diseño, construcción y mantenimiento es una especialidad en la ingeniería donde se pueden desenvolver profesionalmente en un futuro próximo.

1.4 Objetivo de la investigación

1.4.1 Objetivo General

Realizar la optimización energética de la caldera pirotubular marca “INTESA” de 250 BHP del comedor universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el balance energético experimental de la caldera.
- Resumir los cálculos de ingeniería del balance energético en el diagrama de Sankey.
- Diagnosticar las fallas en el funcionamiento de la caldera y corregirlas para la optimización de la eficiencia energética.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes:

(*Vilca & Llanque, 2005*) El objetivo general de la tesis es instalar y evaluar el generador de vapor tipo vertical de dos pasos 10 BHP para uso de laboratorio y ensayos de producción. En sus conclusiones manifiestan que el funcionamiento y mantenimiento del generador de vapor permite desarrollar las prácticas de laboratorio en sus capacidades con referencia a los cursos estudiados en la EPIME y ramas afines; en la parte experimental se ha realizado mantenimiento constante debido a la presión del generador de vapor. Este módulo permite realizar prácticas de ensayos de producción tales como preparado de alimentos. Actualmente está caldera necesita reparación y mantenimiento y no tiene instrumentos necesarios para realizar ensayos.

(*Mancebo & Uribazo, 2006*) Diagnóstico energético en sistemas de generación de vapor de agua. En su resumen dice que el vapor de agua es uno de los medios de

transmisión de calor de mayor efectividad y su fácil generación y manejo, lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria. Mencionan también que han encontrado, en los diagnósticos efectuados para el ahorro de energía, grandes potenciales en la generación y distribución de vapor, que van desde 5% hasta 20% del consumo de combustible. Se establecen los cálculos necesarios para determinar con exactitud los resultados referidos a la eficiencia de la combustión y energía, producción específica, pérdidas de calor por aislamientos, superficies y otros parámetros que se determinan en el balance energético realizado en el sistema de generación y distribución de vapor.

(Kohan, 2007) Describe la monitorización de la eficiencia energética o rendimiento de la caldera que puede revelar una degradación por caída, que si es detenida y corregida puede incrementar la eficiencia de la misma en direcciones técnicas y financieras, quizás por reducción de costos de combustible. Se describen e ilustran dos métodos para calcular la eficiencia de caldera por monitorización del rendimiento.

2.2 Marco Conceptual

2.2.3 Generador de vapor

(Shield, 2009) Los generadores de vapor de agua o comúnmente llamadas calderas son aparatos cuya función es transportar calor contenido en el agua en forma de calor sensible y de calor latente de vaporización, calor entregado al agua a través de la superficie calentada de la caldera, con el que el agua se transforma en vapor saturado, el que a su vez puede ser calentado en un aparato llamado sobrecalentador, saliendo de él como vapor sobrecalentado.

El vapor saturado se usa normalmente para procesos industriales y el calor que transporta se emplea directamente como calor en el proceso; en el vapor sobrecalentado el calor que se transporta se transforma normalmente en trabajo mecánico entregado a un transformador de energía recíproca (máquina a vapor) o rotativo (turbina a vapor).

Los generadores de vapor que producen vapor saturado se les denomina ordinariamente calderas industriales y a las que producen vapor sobrecalentado, calderas de potencia, sin embargo, como en todo, no se puede decir que hay una línea de separación inconfundible entre las calderas industriales y de potencia.

Figura 2.1: Caldera o generador de vapor.



Fuente: <https://www.google.com/search?q=calderas>

2.2.4 Partes de la caldera

Las calderas industriales, como las de potencia pueden empezar a estudiarse o conocerse a partir de aceptar que se componen de tres partes fundamentales:

- a) Partes a presión

- b) Cámara de combustión
- c) Accesorios: Estructuras, botabas, ventiladores, válvulas, instrumentos indicadores de registro o de control, aislamiento térmico, chimenea, etc.

Para fines de esta presentación se referirá especialmente a las partes a presión y a la cámara de combustión.

a) Las Partes a Presión:

Básicamente están formadas por recipientes cilíndricos de acero y tubos de acero, incorporados a los recipientes, ya sea dentro del recipiente o fuera de él.

Si los tubos van dentro del recipiente, entonces el agua se deposita dentro del recipiente mojando la superficie exterior de los tubos quedando la superficie interior de los tubos expuesta a los gases de combustión calientes y por ello se dice que las calderas son pirotubulares, en tanto que, si los tubos van fuera del recipiente, el agua se deposita dentro del recipiente y moja la superficie interior de los tubos y por eso se les denomina como calderas de tubos de agua o acuotubulares.

Es decir, dependiendo que la superficie interior de los tubos sea expuesta a los gases calientes o al agua la caldera se denominará pirotubular o acuotubular respectivamente.

b) La Cámara de Combustión:

Es un espacio libre, dentro o fuera de las partes a presión, donde la presencia de aire, combustible y una temperatura suficientemente alta, mantiene las reacciones químicas del Carbono e Hidrogeno del combustible, con el oxígeno del aire provocando un gran desprendimiento de calor que este, a la vez se transfiere, en parte, al agua contenida en las partes a presión, mediante Radiación, Convección y Conducción, transformándola en vapor.

La parte de calor que no se transfiere al agua se va: con los gases de combustión que salen por la chimenea y por radiación al medio ambiente donde se instala y opera la caldera.

De lo expresado se puede concluir entonces que las Calderas Industriales pueden ser pirotubulares y acuotubulares, debiendo señalar que uno y otro tipo corresponden ordinariamente al tamaño de la caldera y a la presión del vapor, así las pirotubulares se encuentran en la región de hasta 10 toneladas de vapor por hora de vapor y presiones hasta 10 bares, en tanto que las acuotubulares están en la región de 10 a 70 toneladas de vapor por hora y entre 10 bares y 20 bares de presión, no siendo esta una división o clasificación estrictamente exacta.

2.2.5 Tipos de Calderas

(Kohan, 2007) Dos tipos básicos de calderas suministran la mayor parte del vapor que se usa para procesos y calentamiento industriales. Los calderos de tubos de fuego se encuentran disponibles en tamaños hasta de 30 000 lbs/hora de vapor y presiones hasta aproximadamente 300 psi, mientras que los calderos de tubos de agua tienen generalmente una capacidad sobre las 10 000 libras/hora de vapor y suministran este a presiones más altas.

La diferencia es simple. Los Calderos de tubos de fuego calientan el agua almacenada dentro de un casco a presión, pasando los gases calientes a través de una serie de tubos sumergidos en el agua. Los calderos de tubos de agua realizan este proceso al revés, ya que tienen el agua dentro de los tubos y los gases calientes afuera.

Transmisión de calor:

Se logra transmitir el calor de los gases calientes al agua mediante una combinación de tres diferentes métodos de transmisión de calor.

LA CONDUCCIÓN del calor a través de los tubos, lleva dicho calor de los gases al agua. El calor siempre se mueve desde las zonas calientes hacia las frías, por lo que la conducción transmitirá el calor al material adyacente a los tubos calentados. Esto transmite la energía de calor en forma análoga a como cuando un balde de agua se pasa de mano en mano por una fila de hombres, sin que ninguno se mueva de su sitio.

LA CONVECCIÓN, transmite la materia caliente de un lugar a otro. Conforme el agua se calienta, se vuelve menos densa y se eleva, estableciendo una corriente de convección. La mezcla de esta agua caliente con el agua fría produce la transmisión del calor dentro del agua.

LA RADIACIÓN, elimina la necesidad de materia en el mecanismo transmisor del calor. Tal como la radiante energía calorífica del sol, la radiación producida al quemar combustible viaja en ondas en una forma muy parecida a la luz. En consecuencia, la radiación calienta los objetos que se encuentran en línea directa a la fuente de radiación. Por ejemplo, en una caldera de tubos de agua, aquellos tubos en línea directa con los quemadores serán calentados por la energía radiante, así como por los gases calientes que hay dentro del horno.

La especial combinación de las características de diseño que se usan en un cierto caldero, determinará exactamente cuánto del total de la transferencia del calor se lleva a cabo por cada uno de estos tres métodos de transmisión calorífica.

Obviamente, si la conducción del calor a través del tubo aumenta, el mismo tamaño de tubo suministrará mayor transferencia de calor. Esta es la razón por la cual algunos diseñadores usan diversas técnicas (aletas, puntas) para incrementar el área de la superficie de calefacción, en términos generales, cuanto mayor es el área que la superficie metálica, mayor cantidad de calor será transferida.

De igual forma, una cámara de combustión bien diseñada en una caldera de tubos de fuego, será capaz de absorber la mayor cantidad posible de energía radiante de la llama del quemador. Los modernos fabricantes de calderos compactos adaptan cuidadosamente el diseño de su cámara de combustión con el quemador, con el fin de lograr usar al máximo la energía calorífica radiada.

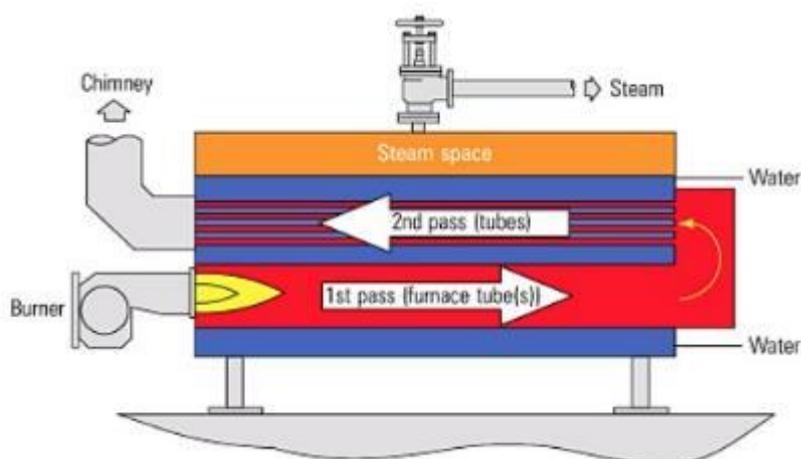
2.2.5.1 Calderas de tubo de fuego o Piro tubulares

Los diagramas muestran vistas simplificadas de lo que pasa en una caldera de tubos de fuego. A continuación, se representan las calderas de tubos de fuego en diseño de DOS PASOS, TRES PASOS y CUATRO PASOS.

Para comprender las diferencias entre estos diseños, hay que considerar los tubos a través de los cuales fluyen los gases en una caldera de tubos de fuego como un solo tubo largo y continuo. Los gases calientes entran por un extremo proveniente de la cámara de combustión, y los gases ya fríos se expelen hacia la chimenea por el otro extremo. La cantidad de calor extraída éntrelos los puntos es transmitido al agua en el caldero, produciendo vapor.

Esta caldera de un solo tubo, es obviamente poco práctica, por lo que se usan varios tubos más cortos en paralelo, que dan en total la misma área del tubo. Esta es la caldera básica de tubos de fuego, de Dos Pasos. Los gases calientes bajan del horno hacia la parte posterior de la unidad, y luego son regresados hacia la chimenea en la parte frontal a través del paquete de tubos en paralelo. Las calderas de tubos de fuego de Dos Pasos requieren de un mayor número de tubos de diámetro pequeño, con un horno (cámara de combustión) grande para lograr altos rendimientos de transferencia del calor. El casco de gran diámetro y un nivel de agua relativamente bajo hacen que la unidad de dos pasos sea particularmente adecuada para cumplir con demandas súbitas de vapor.

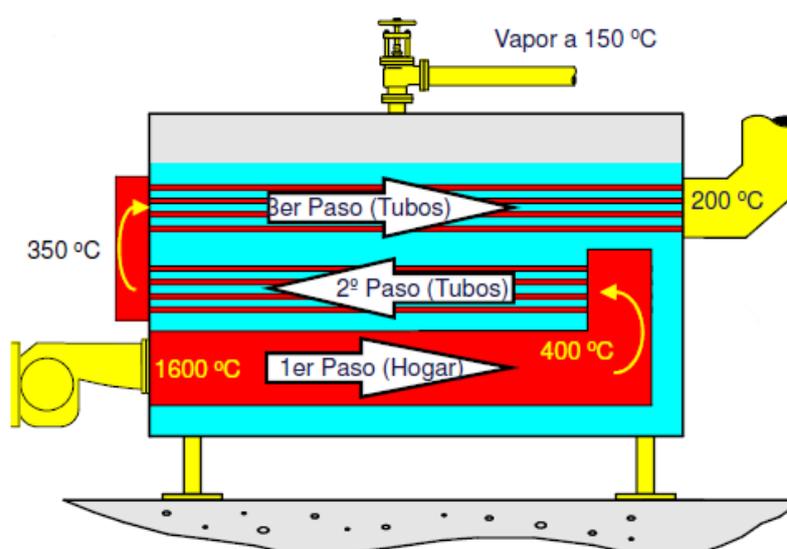
Figura 2.2: Caldera pirotubular de dos pasos.



Fuente: <https://www.google.com/search?qcalderaspirotubulares>.

Las Calderas de Tres Pasos poseen otro juego de tubos y un arreglo divisorio para retornar los gases a la chimenea ubicada en la parte posterior. Los tubos en el segundo paso pueden ser algunas veces más grandes que en la caldera de dos pasos; los tubos del tercer paso pueden ser reducidos en número o diámetro para mantener la velocidad de los gases que sé expelen en este punto.

Figura 2.3: Caldera Pirotubular de 3 pasos.



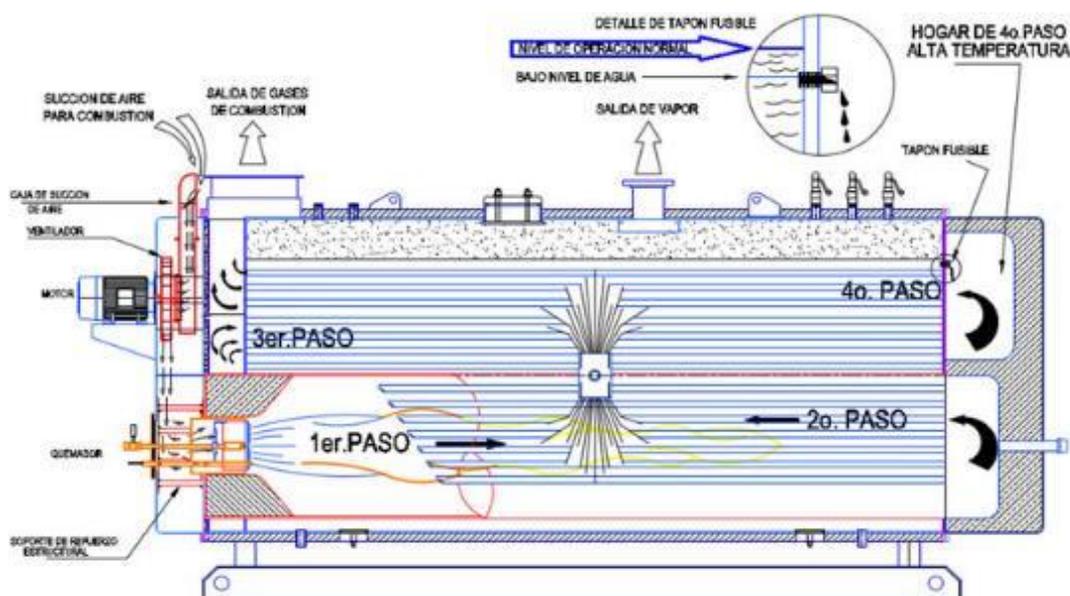
Fuente: <https://www.google.com/search?qcalderaspirotubulares+tres+pasos>.

Las unidades de tres pasos, de tipo compacto, ofrecen alta eficiencia y altas velocidades del gas dentro de la cámara y tubos, pero requieren el uso de un ventilador más potente para suministrar la corriente necesaria para vencer el tercer paso.

Las calderas de tubos de fuego de Cuatro Pasos añaden otra reversión de la dirección del gas e incrementan el área del recorrido del gas. En efecto, la unidad de cuatro pasos duplica los tubos que se requieren para la unidad de dos pasos, aumentando en esta forma el área de calefacción para lograr un diseño más compacto. A mayor cantidad de pasos de gases, aumentan las pérdidas por fricción, requiriéndose por consiguiente de mayor potencia en el ventilador que las unidades de tres pasos.

Las calderas de espalda húmeda son aquellas en las cuales, la cámara posterior que está dentro del casco tiene cierto espacio, cubierto con agua, reduciendo así la cantidad de refractarios. Estos modelos están en desuso. Los diseños de espalda seca tienen esta área, lo mismo que la parte posterior de la cámara de combustión, cubiertas con materiales refractarios; estos tipos son los más conocidos y prácticos para el servicio de los tubos.

Figura 2.4: Caldera Pirotubular de 4 pasos.



Fuente: <https://www.google.com/search?q=calderaspirotubulares+cuatro+pasos>.

Tiro de chimenea: el tiro se logra ya sea por ventiladores de tiro forzado o de tiro inducido. Las unidades de tiro forzado alimentan el aire frío de la sala de calderas a la cámara de combustión, a una temperatura constante.

2.2.5.2 Calderas Acuotubulares

Una vez más, las calderas significan un desarrollo importante con el incremento de los generadores de vapor acuotubulares estacionarios. Ellos difieren de las unidades convencionales en que están diseñados en tal forma que el agua deja los tubos en forma de vapor, en vez de una mezcla de agua y vapor. Se han eliminado los tambores de vapor, pero se requiere una circulación forzada del agua.

El arranque presenta algunos problemas de operación, en vista de que toda el agua no se convierte en vapor en un solo paso, aun cuando se arranque en caliente. Se requiere un sistema de doble paso (by-pass) para volver a pasar por la turbina y recircular el agua a través de las paredes del horno durante el atranque.

Las unidades son diseñadas ya sea para operaciones sub-críticas o super-críticas.

Las calderas de circulación natural dependen de la circulación natural creada cuando el agua caliente se expende y es desplazada a través del agua fría.

Las calderas de circulación forzada proporcionan una circulación positiva aún a presiones extremadamente altas y condiciones hidráulicas desfavorables. Esto se logra con el costo adicional de añadir bombas de circulación al sistema.

Las unidades de ciclo combinado, combinan una caldera operando ya sea a presiones sub-críticas o super-críticas con una turbina de gas. Se utilizan dos acercamientos básicos en las unidades de ciclo combinado.

El ciclo Velox utiliza el gas del tubo de la caldera para mover la turbina, la cual opera un compresor que suministra aire de combustión al petróleo de alta presión o a los quemadores de gas. Se utilizan los gases calientes de escape de la turbina para pre-calentar el agua de alimentación. En efecto, esto sobrecarga la unidad, reduciendo la cantidad de superficie de calentamiento requerida en la caldera.

La segunda forma realiza este ciclo al revés, y alimenta desde el escape a una turbina de gas funcionando separadamente, hacia la caldera. Esto permite que la caldera recobre el calor del escape de la turbina como parte de su ciclo regular. Desde que la turbina opera al generador, este tipo de operación es particularmente adaptable para grandes unidades.

La caldera y/o la turbina pueden ser usadas separadamente; sin embargo, cuando se usan juntas, incrementan considerablemente su rendimiento sobre el total de las unidades funcionando en forma separada.

Los fabricantes de los calderos acuatubulares han desarrollado los clásicos tipos de calderos “A”, “D” y “O” teniendo presente las altas presiones a desarrollar y los volúmenes de vapor a producir.

En nuestro medio la Caldera del modelo “A” es poco conocida, en cambio el modelo “D” tuvo gran aceptación en el mercado, especialmente en la Industria Pesquera por los grandes volúmenes de producción de vapor que maneja y las presiones de diseño que alcanzan los 250 psi; actualmente este modelo ha sido reemplazado por el modelo “O” debido a que por tener una forma asimétrica presentaba problemas en el transporte.

La caldera actual modelo “O” se está imponiendo en nuestro mercado ya que su centro de gravedad en el punto céntrico de figura geométrica facilitaba y economizaba en transporte, así como por tener una cámara de combustión perfectamente simétrica con

paredes de tubos de agua escalonados la distribución de calor es más uniforme y la transferencia de calor más efectiva.

Los tres tipos de calderos indicados pueden ser construidos con tubos aleteados o tubos tangenciales, siendo estos últimos los que han tenido mayor aceptación, ya que representan una verdadera pared de agua y una mayor absorción efectiva de calor. Así mismo el recambio de tubos se simplifica enormemente.

Las calderas con tubos aleteados presentan un problema, las aletas están dispuestas al fuego directo y pueden ser quemadas por falta de una efectiva refrigeración interna del tubo.

Las calderas acuotubulares, pueden ser suministradas con sistemas de operación automática y semi-automática.

Las Calderas de Operación Automática incluyen en su secuencia de operación: la ignición, la modulación de fuego o también fuego en posición alta y baja que a su vez tiene protección contra falla de flama y contra sobrepresión de vapor.

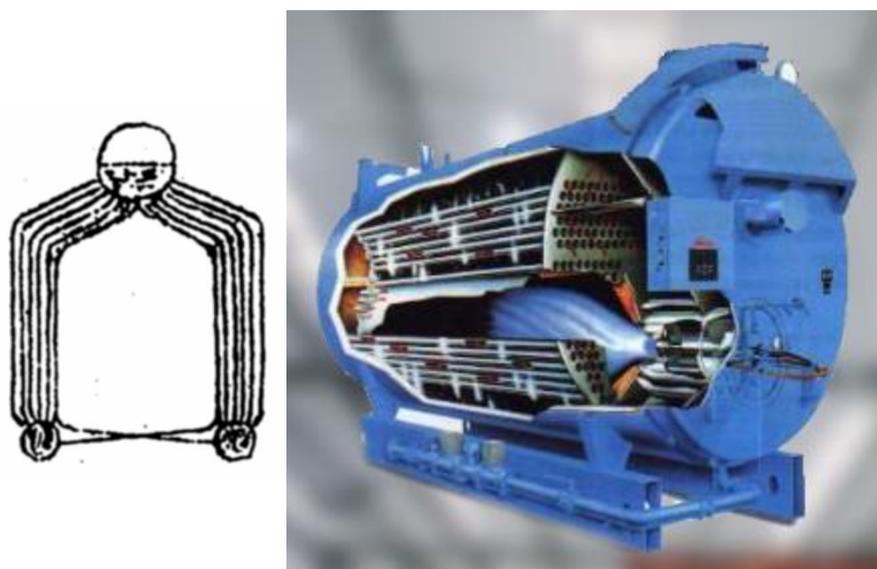
Las calderas semi-automáticas, poseen todos los controles anteriores a excepción de la ignición o encendido de la caldera.

Los calderos modernos acuotubulares y de tipo paquete de tiro forzado y sus controles principales se encuentran integrando la caldera. En algunos casos y bajo pedido especial los controles pueden ser ubicados en paneles o gabinetes exteriores a la unidad. Se puede decir que en 1940 se inició la producción masiva de los calderos acuotubulares y su aplicación.

Estos tres diseños corresponden a los tres tipos más comunes de calderas compactas acuotubulares. La caldera tipo "A" requiere de dos pequeños tambores bajos o cabezales

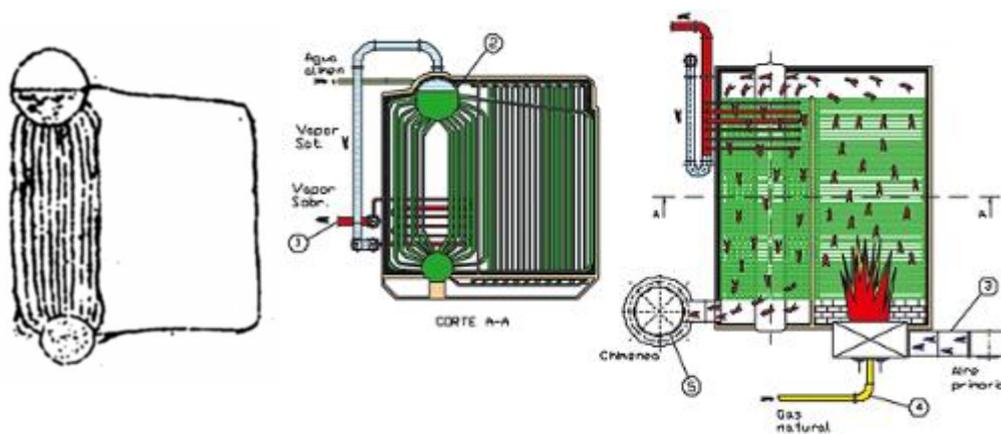
con un tambor grande de vapor arriba para separar el vapor y el agua. Las calderas del tipo "D" requieren solamente de un tambor de agua o cabezal abajo, con un tambor de vapor en la parte superior. La Caldera tipo "O" usa solamente un tambor en la parte inferior con un tambor de vapor encima, pero ambos están colocados en el centro de la unidad en vez de estar a un costado, como en el tipo de la caldera D.

Figura 2.5: Caldera acuotubular "Tipo A".



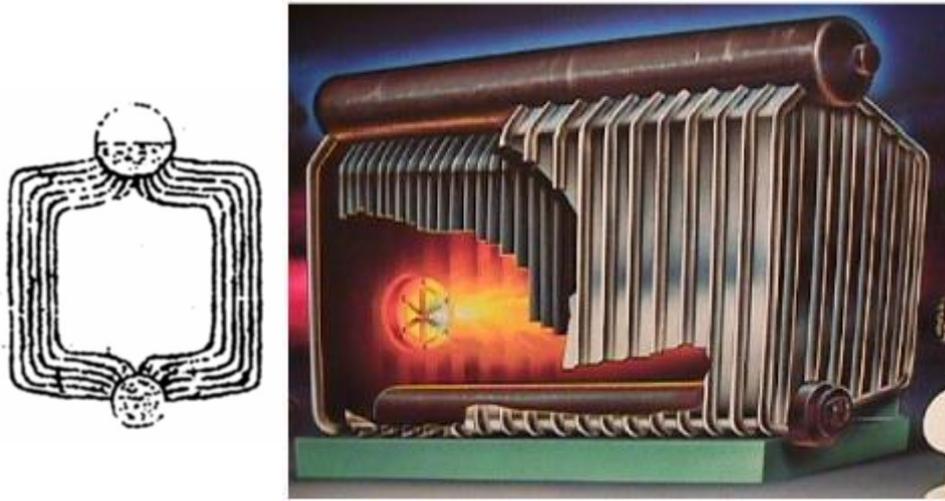
Fuente: https://www.google.com/search?q=calderasacuotubulares_A

Figura 2.6 Caldera acuotubular "Tipo D".



Fuente: https://www.google.com/search?q=calderasacuotubulares_D

Figura 2.7: Caldera acuotubular "Tipo O".



Fuente: https://www.google.com/search?qcalderasacuotubulares_O

2.3 El vapor: Principios de transformación

(Gordillo Andia, 2013) En las Instalaciones Industriales el vapor de agua se destina a tres fines, que en muchos casos pueden darse simultáneamente:

- Como materia prima para el proceso.
- Como fuente de energía térmica en los procesos, servicios o para confort.
- Como fuente de energía mecánica para producir trabajo directamente o bien como transformación previa a energía eléctrica.

¿Cuáles son las razones del uso preferente del agua sobre otros fluidos?

- La abundancia del agua.
- Su reducido coste comparativo.
- Sus buenas propiedades termodinámicas; alto calor específico, alto calor latente en el rango normal de temperaturas de utilización, una conductividad térmica relativamente elevada, una viscosidad relativamente baja, su temperatura crítica

es razonablemente alta y permite su empleo en ciclos térmicos con bajas exigencias relativas de energía para la compresión o el bombeo.

¿Cuándo se debe considerar la utilización de otro fluido distinto al agua?

- Cuando la transmisión de calor se realiza a temperaturas menores o iguales a 0°C.
- Cuando las temperaturas superan los 374°C (temperatura crítica).
- Cuando hay temperaturas elevadas sin altas presiones.

2.3.1 Leyes de la transformación del agua en vapor

¿Cuáles son las características que distinguen la fase líquida del vapor?

Un líquido se caracteriza por:

- Ser prácticamente incompresible, es decir que su volumen específico varía muy poco con la presión.
- Tener un volumen determinado y adaptar su forma a la del recipiente que lo contiene.

Por su parte, un gas se caracteriza:

- Ser altamente compresible, es decir, su volumen específico varía notablemente con la presión.
- Expandirse o difundirse indefinidamente con las únicas limitaciones de las fuerzas gravitatorias (peso) o de las paredes del recipiente que los contiene.

¿Por qué se utiliza la palabra vapor?

En el sentido estricto, los vapores tienen unas características similares a los gases cuando son secos y sobrecalentados, pero normalmente están en una situación muy cercana a la coexistencia de líquido y gas, es decir, cerca de la condensación.

Por esa razón, se dice que un vapor es tanto más gas cuanto más sobrecalentado se encuentre (más cerca de la temperatura y presión crítica).

¿Por qué se emplea el agua en fase vapor en preferencia a la fase líquida?

Hay varias razones, las más importantes son:

La igualdad de masa, temperatura y presión, el contenido energético del vapor es notablemente mayor al líquido.

En el siguiente cuadro se comparan los calores totales contenidos en un kilogramo de agua, tanto en fase líquida como vapor a diferentes presiones y temperaturas.

Tabla 2.1: Comparación de los calores/kilogramo de agua en fase líquido-vapor.

P (kgf (cm ² abs.))	T (°C)	Contenido Calorífico (kcal/kg)		h _{fg} (kcal/kg)	Rel. Calor Vapor-líquido
		Líquido	Vapor		
1	99,09	99,12	638,5	539,38	6,44
20	211,38	215,2	668,5	453,38	3,11
50	262,70	274,2	667,3	393,10	2,43
70	284,48	300,9	662,1	361,20	2,33
100	309,53	334,0	651,1	317,10	1,95
200	364,08	431,5	582,3	150,80	1,35
225,65	374,15	501,5	501,5	0	1

Fuente: (Kohan, 2000) Manual de Calderas.

De los datos reflejados en el cuadro se obtienen las siguientes conclusiones:

Primero:

El calor contenido por el vapor es siempre superior al del líquido y la relación entre uno y otro varía con la presión y la temperatura, disminuyendo cuando aumentan aquellas hasta unas condiciones denominadas críticas ($p_c = 225,65 \text{ kg/cm}^2$ y $T_c = 374,15^\circ\text{C}$) en que el contenido calorífico del líquido y vapor se igualan.

Segundo:

La diferencia entre el calor contenido en el vapor disminuye cuando aumenta la temperatura. Por esa razón cuando el vapor se utiliza para suministrar calor en un proceso, interesa trabajar con vapor a la menor presión posible, compatible con las exigencias del proceso donde se emplea vapor y con los requisitos de presión y sobrecalentamiento para el transporte del vapor por las redes de distribución.

Tercero:

Entre las redes de distribución de un líquido y un vapor existe un detalle que las diferencia, relacionado con la exigencia de equipos mecánicos. Excepto en casos muy singulares, para transportar la energía térmica mediante un líquido es necesario aportar energía mecánica mediante bombeo para asegurar la circulación en el sentido deseado, mientras que cuando se trabaja con vapor no es necesario un equipo mecánico específico para promover la circulación de vapor, puesto que el vapor se "autotransporta", aunque a base de consumir parte de la energía aportada por el combustible. "El agente motor es la diferencia de presión en la red".

Cuarto:

En la mayoría de instalaciones se requiere suministrar energía térmica al proceso en diferentes condiciones de presión y temperatura. Esto es más fácil de realizar con el vapor que con el líquido, a lo que hay que añadir la posibilidad de un mejor aprovechamiento del calor aportado al agua en el generador, pues con el vapor se puede escalonar con características cada vez más degradadas.

Quinto:

Cuando el fin que se persigue es la producción de energía mecánica, bien sea directamente o con paso intermedio por energía eléctrica, ya no se trata de comparar aspectos energéticos sino posibilidades teóricas prácticas; la ventaja en este caso es mayor a favor del vapor.

El uso del vapor(Moran & Shapiro, 2011):

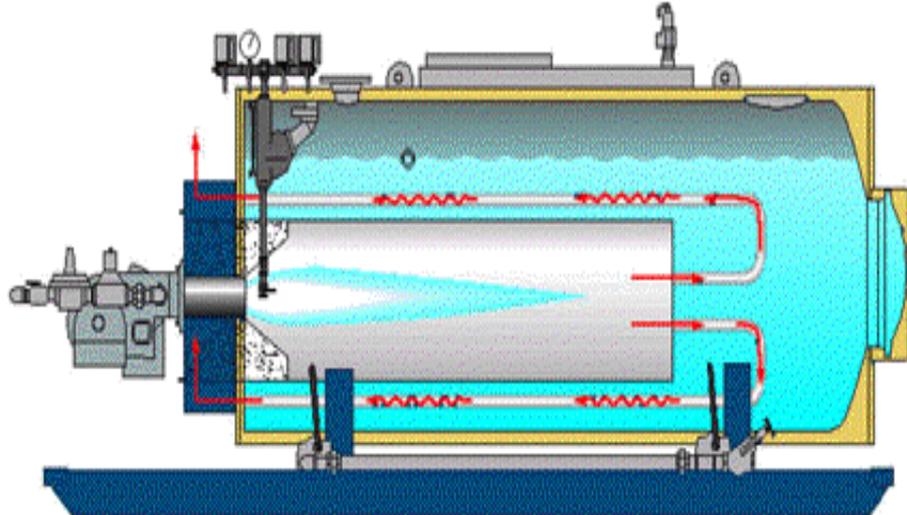
¿Qué es el vapor de agua?

- Vapor es el estado del agua generado al añadirle energía calorífica en un generador de vapor.
- Se necesita añadir suficiente energía para que se eleve la temperatura del agua hasta su punto de ebullición. Después de ello, cualquier energía adicional transforma el agua en vapor, sin un incremento en la temperatura.
- El vapor de agua es un vehículo para transferir calor en forma eficiente y fácil de controlar.
- Es usado frecuentemente para transportar energía desde un punto central (caldera) hasta varios lugares en la planta o centro de consumo donde se utiliza para calentar aire, agua o para diversos usos en procesos.
- A la cantidad de calor que se requiere para transformar agua hirviendo a vapor se le llama calor latente de vaporización.
- La cantidad requerida es diferente para cada combinación de presión-temperatura, tal como se indica en las Tablas de Vapor.

¿Cómo es utilizado el calor del vapor?

1. La transferencia de calor empieza en la cámara de combustión de la caldera, el calor fluye a través de la pared de los tubos de la caldera hasta el agua.

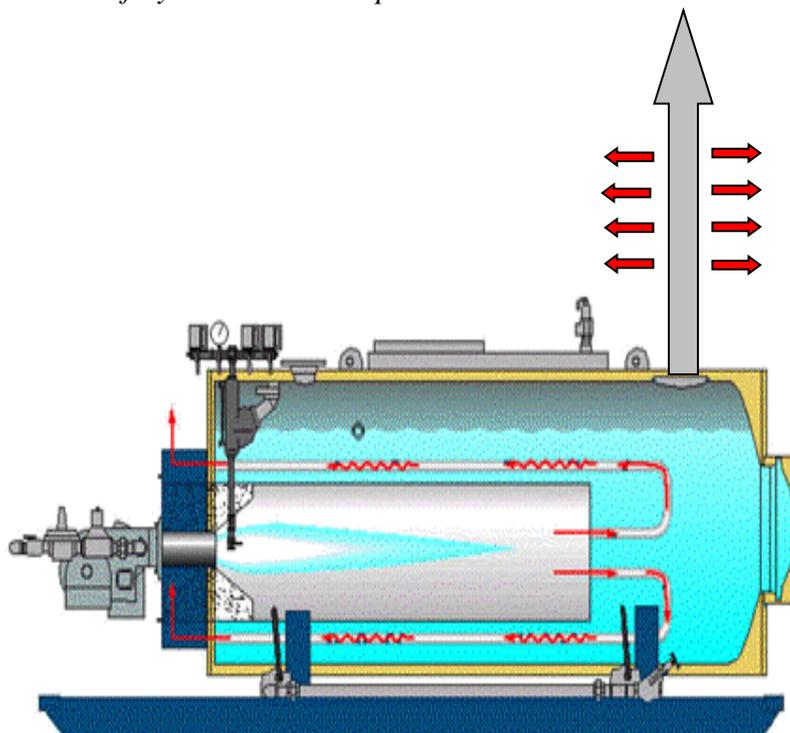
Figura 2.8: Flujo de calor de las tuberías hacia el agua.



Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicación.*

2. Cuando la presión más alta de la caldera empuja el vapor hacia fuera de la caldera, los tubos de distribución se calientan; entonces el calor fluye, a través de la pared de los tubos, hacia el aire a temperatura menor alrededor de la tubería. Esta transferencia de calor transforma una cierta cantidad del vapor en agua nuevamente.

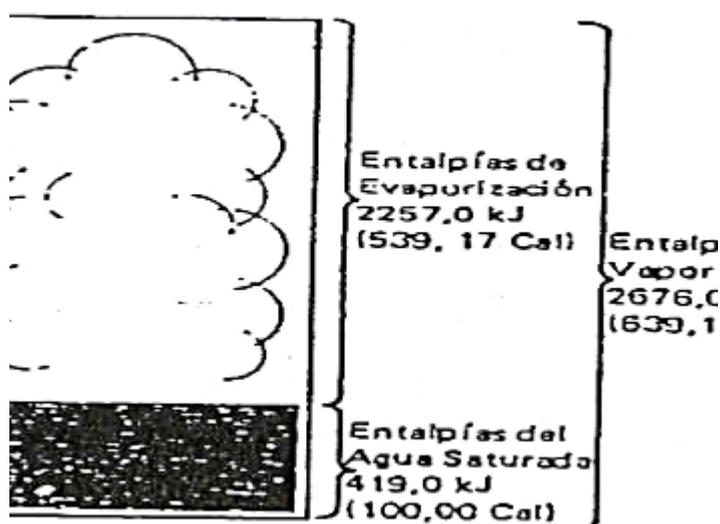
Figura 2.9: Calor fluye a través de la pared de los tubos hacia el aire.



Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicación.*

- La situación es diferente cuando el calor llega a los intercambiadores de calor del sistema; en este caso se desea la transferencia de calor del vapor.

Figura 2.10: Entalpía de 1 kg. de vapor a presión atmosférica.

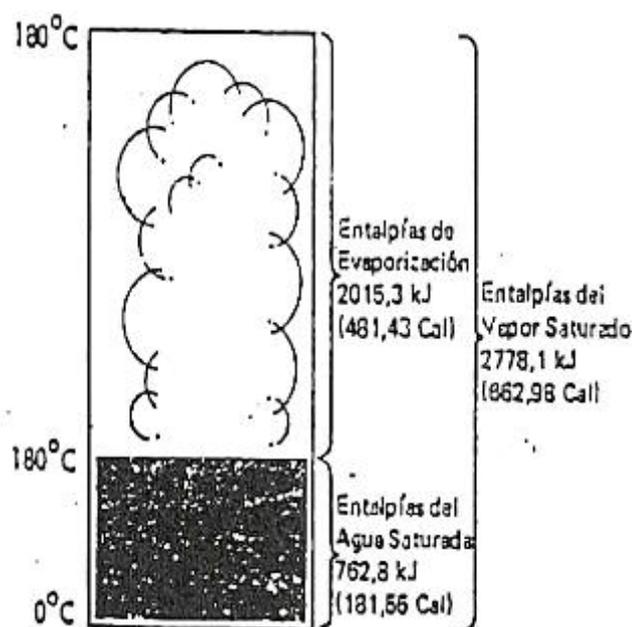


Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicación.*

Se necesita aproximadamente 4,19 kJ por cada °C de incremento en la temperatura hasta el punto de ebullición; pero es necesario más kJ para convertir agua a 100°C en vapor a 100°C.

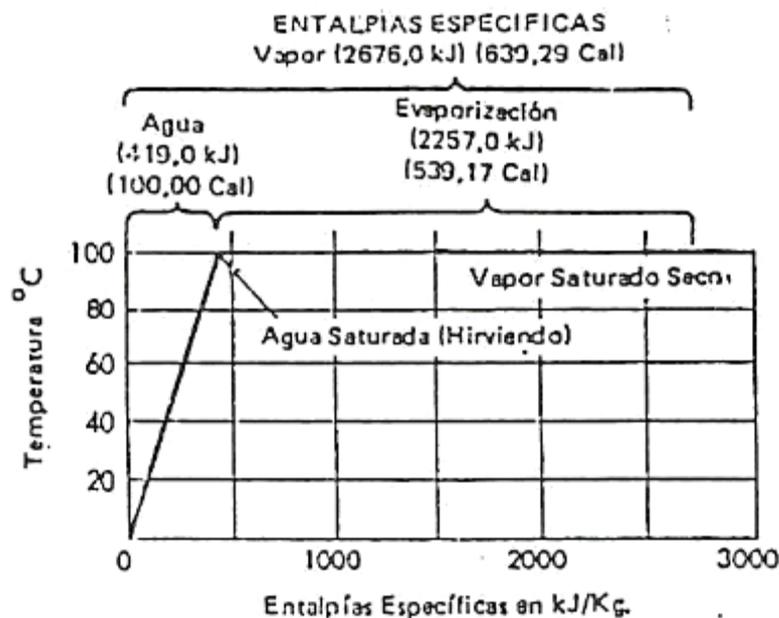
En el segundo caso se tiene una presión de 10 bares nótese que se necesita más calor y una mayor temperatura para poder hervir el agua a esta presión: pero también ahora se requiere de menor cantidad de calor para el cambio de fase.

Figura 2.11: Calor necesario a una presión de 10 Bares.



Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicación.*

Figura 2.12: Formación de 1 kg. de vapor a presión atmosférica.



Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicación.*

Tratamiento químico del agua de calderas (SERMIN S.A., 2014):

El tratamiento químico del agua en la generación de vapor es un área tecnológicamente actualizada y especializada, con mucho desarrollo y surge ante la necesidad de obtener un agua químicamente pura para tal fin.

El agua, sea cual sea su fuente, tiene una gran cantidad de impurezas con contaminantes que desarrollan un efecto negativo en la generación de vapor. La cantidad y clase de estas impurezas depende de la fuente de agua; el objetivo de todo tratamiento químico es reducirlas o transformarlas en compuestos pasivos o manejables que puedan ser desalojados de los sistemas de vapor.

Los valores a que los contaminantes deben ser reducidos están determinados por la presión y temperatura de operación de los generadores de vapor; es decir, que estas variables determinan la calidad requerida en el agua.

La clase de tratamiento a seguir depende del tipo y concentración de los contaminantes y de la calidad deseada del vapor producto.

Objetivos del tratamiento:

Independiente del propósito del vapor producido en una caldera, los mayores objetivos del tratamiento del agua son:

- Prevenir la formación de incrustaciones y depósitos en general.
- Prevenir la corrosión por gases o ataque químico en las calderas y en el sistema de condensado.
- Prevenir el arrastre de sólidos con el vapor y producir un vapor más limpio (ensuciamiento y espumeo).

Impurezas en el agua

Las impurezas más comunes y que mayor influencia tiene en la generación de vapor son:

Sólidos suspendidos: consisten en materia insoluble finamente dividida, bien de tipo inorgánico, tales como arcillas, precipitaciones de fosfato tricálcico. floc de $Al(OH)_3$, o bien orgánicos, tales como aceite o grasas suspendidas. Los sólidos suspendidos tapan tuberías producen depósitos y causan espumas.

Sólidos disueltos: tienen importancia por la influencia que tiene en el arrastre de impurezas en el vapor; deben controlarse porque causan espumas.

Dureza: mide el contenido de sales de calcio y magnesio en términos de carbonato de calcio. Estas sales forman incrustaciones en la superficie caliente de la caldera.

Alcalinidad: corresponde a la presencia de carbonatos, bicarbonatos y/o hidróxidos, expresados como carbonato de calcio; existen 3 tipos de alcalinidad

- Alcalinidad “M” o total; neutraliza ácido hasta un pH de 4,3
- Alcalinidad “P” o a la fenolftaleína; neutraliza ácido hasta un pH de 8,3
- Alcalinidad al OH; corresponde a la fracción de OH, se calcula a partir de valores de P y M; alcalinidad al OH = $2 * P - M$

Debe mantenerse suficiente alcalinidad en el agua de calderas para prevenir la corrosión (pH de 10 - 11.5), igualmente suficiente cáustica libre para precipitar el magnesio como $Mg(OH)_2$ y mantener la sílice en forma soluble. La alta alcalinidad cáustica produce espuma y arrastre en la caldera y es causa de corrosión cáustica (caustic embrittlement). El carbonato y bicarbonato producen CO_2 con el vapor, fuente de corrosión en condensados.

Sílice: se presenta en forma soluble o en su forma suspendida; produce incrustaciones en la caldera: a altas temperaturas se vaporiza y forma depósitos insoluble y muy adherente en los alabes de las turbinas.

Materia Orgánica: se presenta en forma de color en el agua, sólidos suspendidos finos, cantidades pequeñas de microorganismos o grasas y aceites, producen espumeo en calderas, ocasionando arrastres de impurezas con el vapor.

Gases disueltos: dentro de los más comúnmente presentes y causantes de corrosión, están el CO_2 libre y el oxígeno disuelto. El oxígeno disuelto corroe economizadores, sobrecalentadores y sistemas de retorno de condensados, haciéndolos altamente corrosivos.

Hierro: el hierro, en la forma de óxido, se deposita en la caldera, constituyéndose en una de las mayores causas de las fallas en los tubos de la caldera.

Calidad del agua de calderas

La cantidad del agua de alimentación en la caldera es función de la presión de vapor, la ratio de generación y los usos de vapor.

Los límites sugeridos por la ASME (American Society Mechanical Engineers) en general para agua de calderas es:

Tabla 2.2: Conductividad del agua de calderas ASME.

Presión caldera (psig)	Sílice ppm SiO₂	Alcalinidad total ppm CaCO₃	Conductividad específica Umho/cm
0 - 300	150	700	7000
301 - 450	90	600	6000
451 - 600	40	500	5000
601 - 750	30	400	4000
751 - 900	20	300	3000
901 - 1000	8	200	2000
1001 - 1500	1	0(2)	150
1501 - 2000	1	0(2)	100

Fuente: Empresas SERMIN S.A., Lima.

La eficiencia de una caldera está dada por su capacidad de transferir el calor generado en su hogar al agua dentro de ella y depende de su área de transferencia térmica y del estado de limpieza de ésta. Los contaminantes en el agua de calderas causan una grave alteración en la superficie interna de los tubos, que disminuye la eficiencia de la caldera y ocasiona serios daños, no sólo en el generador de vapor sino en los equipos en donde éste es usado y en los sistemas de condensación del vapor.

Tabla 2.3: Límites de impurezas recomendados para el agua de alimentación y agua de calderas a diferentes presiones de trabajo.

AGUA DE CALDERA				AGUA DE AUMENTACIÓN			
Presión de caldera	Sólidos totales, ppm ¹	Alcalinidad total, ppm como CaCO ₃ ¹	Sílice, ppm como SiO ₂ ²	Dureza, ppm como CaCO ₃	Hierro, ppm como Fe	Cobre, ppm como Cu	Oxígeno, ppm como O ₂
0-300	3.500	700	75-50	0-1 Máx.	0,10	0,05	0,007
301-450	3.000	600	50-40	0-1 Máx.	0,10	0,05	0,007
451-600	2.500	500	45-35	0-1 Máx.	0,10	0,05	0,007
601-750	2.000	400	35-25	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
751-900	1.500	300	208	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
901-1.000	1.250	250	10-5	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
1.001-1.500	1.000	200	5-2	0	0,01	0,005	0,007
1.501-2.000	750	150	3-0,8	0	0,01	0,005	0,007
2.001-2.500	500 ⁴	100 ⁴	0,4-0,2	0	0,01	0,005	0,007
2.501-3.000	500 ⁴	100 ⁴	0,2-0,1	0	0,01	0,005	0,007

La materia orgánica del agua de alimentación debería ser cero y el pH, en el rango de 8,0 a 9,5³.
Referencias y notas:
1. American Boiler Manufacturers Assoc. Manual de 1958.
2. Por encima de 600 psig, el nivel de sílice seleccionado para producir vapor con 0,02 ppm de SiO₂,
3. Publicaciones Babcock & Wilcox: (a) Tratamiento de agua para calderas industriales, BR-884, 8-68; y (b) J. A. Lux, «Control de calidad del agua de calderas en la planta de vapor de alta presión», 9/62.
4, J, A. Lux, 3(b), recomienda niveles tan bajos como 15 ppm de sólidos totales disueltos por encima de 2,000 psig.

Fuente: (Kohan, 2000).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la optimización energética de la caldera del Comedor Universitario de la UNA de Puno, se realizó un trabajo de investigación experimental para cumplir los objetivos específicos trazados.

Se emplearán los siguientes materiales:

3.1 Equipos

3.1.1 Caldera pirotubular

Características técnicas:

Marca : INTESA

Tipo : Pirotubular de 3 pasos

Capacidad : 150 Kg vapor/hora

Potencia : 250 BHP

Vida útil : 40 años

Año de adquisición : 2005, Año de Fabricación: 2006

La caldera se encuentra en la Sala de Máquinas del Comedor Universitario de la UNA–
Puno.

Figura 3.1 Caldera pirotubular 250 BHP UNA Puno.



Elaboración: Propia.

3.2 Instrumentos

3.2.1 Termocupla digital

Instrumento que se utilizó para medir las temperaturas necesarias para el balance térmico de la caldera.

Las características técnicas de la termocupla son:

Marca : Yokogawa

Modelo : 2455

Tipo : K

Rango de medida : -160°C a 1372°C

Fabricación : Japón

La termocupla digital pertenece al Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UNA.

Figura 3.2: Termocupla digital.



Elaboración: Propia.

3.2.2 Psicrómetro

Instrumento utilizado para medir la temperatura de bulbo seco (TBS) o ambiental y la temperatura de bulbo húmedo (TBH), para los cálculos del balance térmico.

Características técnicas:

Marca : Leybold

Fabricación : Alemana

Año de Fabricación : 2005

El psicrómetro empleado es prestado por el Servicio de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Figura 3.3: Psicrómetro.



Elaboración: Propia.

3.3 Métodos

La metodología experimental que se emplea para el desarrollo de la Tesis “Optimización Energética del Generador de Vapor (Caldera) del Comedor Universitario de la Universitario de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno con Capacidad de 150 Kg de Vapor/Hora” es lo establecido por The American Society of Mechanical Engineers – Steam Generating Units, Power Test Codes 4.1 (ASME) para la evaluación de la eficiencia energética de una caldera o generados de vapor, la cual se fundamenta en la realización experimental de un balance térmico de la caldera, así como hacer un estudio de su performance considerando la importancia de esta máquina en el sector industrial y plantas generadoras de energía eléctrica, teniendo en cuenta que del diagnóstico dependen

las medidas a tomar con miras hacia un buen y eficiente funcionamiento de la unidad.

La metodología experimental esta sistematizada en los siguientes aspectos:

3.3.1 Procedimiento a seguir

- Verificar el nivel de agua en el tanque de depósito.
- Verificar el nivel de combustible en su tanque de depósito.
- Verificar el nivel de agua en el interior del caldero.
- Purga mecánica del generador de vapor con válvula respectiva.
- Accionar interruptor de arranque, en tablero de controles.
- Esperar que el caldero alcance el régimen de funcionamiento.

3.3.2 Datos experimentales a obtener

- Temperatura de bulbo seco ambiental: TBS.
- Temperatura de bulbo húmedo ambiental: TBH.
- Temperatura de agua de alimentación: T_a .
- Temperatura del combustible: T_c .
- Temperatura de gases de escape: T_g .
- Presión de salida de vapor: P_v .
- Consumo de combustible: m_c .
- Con análisis de gases:

% CO_2

% CO

% O_2

3.4 Metodología Sistematizada para realizar el Balance Energético de la Caldera

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

Teniendo en cuenta que la instalación cuenta con un medidor de caudal del tipo orificio; es que podemos determinar el flujo de vapor que nos entrega el caldero. El flujo de vapor se medirá en lbs/hora.

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

Teniendo en cuenta que la densidad del combustible, Diesel 2:

$$\delta_{\text{diesel 2}} = \frac{m_c}{V_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.1})$$

Ecuación 3.1: Densidad del combustible.

Donde: m_c = masa del combustible

V_c = volumen del combustible

Entonces:

$$m_c = \delta_{\text{diesel 2}} \cdot V_c \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.2})$$

Ecuación 3.2: Masa del combustible.

Por especificaciones técnicas del petróleo Diesel 2:

$$\delta_{\text{diesel 2}} = 54,6 \text{ lb/pie}^3$$

Y el flujo de combustible será:

$$\dot{m}_c = \frac{m_c}{t_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.3})$$

Ecuación 3.3: Flujo del combustible.

Dónde: \dot{m}_c = flujo de combustible en lbs/hora

m_c = masa de combustible en lb

t_c = tiempo de combustible en horas

3.4.3 Análisis de los gases de escape

Los datos que se obtendrán con el análisis de gases serán:

% CO₂

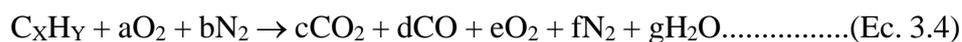
% O₂

% CO

% N₂

3.4.4 Determinación de la relación aire combustible real

Considerando la siguiente ecuación para una combustión incompleta o real:



Ecuación 3.4: Reacciones de una combustión incompleta.

Del analizador de gases:

$$c = \% \text{ CO}_2 \quad ; \quad d = \% \text{ CO} \quad ; \quad e = \% \text{ O}_2 \quad ; \quad f = b = \% \text{ N}_2$$

También por la composición volumétrica del aire:

Nitrógeno: 79%

Oxígeno: 20,99%

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

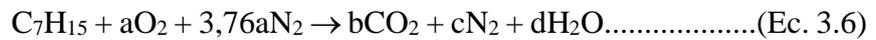
Con dicha información se balanceará la ecuación para una combustión incompleta y con los coeficientes respectivos del número de moles, se determinará la relación aire combustible real y teórica a través de la siguiente expresión:

$$r_{a/c} = \frac{32 \frac{\text{lb}}{\text{mol O}_2} \left(\frac{\text{N}^\circ}{\text{moles O}_2} \right) + 28 \frac{\text{lb}}{\text{mol N}_2} \left(\frac{\text{N}^\circ}{\text{moles N}_2} \right)}{12 \frac{\text{lb}}{\text{mol C}} \left(\frac{\text{N}^\circ}{\text{moles C}} \right) + 1 \frac{\text{lb}}{\text{mol H}} \left(\frac{\text{N}^\circ}{\text{moles H}} \right)} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.5})$$

Ecuación 3.5: Relación aire combustible

3.4.5 Determinación de la relación aire combustible teórica

Considerando la siguiente ecuación para una combustión teórica:



Ecuación 3.6: Reacciones de una combustión teórica.

Balanceando la ecuación, obtenemos los coeficientes respectivos para determinar el número de moles de la ecuación (3) para el cálculo de la relación aire combustible teórica.

3.4.6 Cálculo del porcentaje de Exceso de aire en la combustión

Se calculará a través de la siguiente expresión:

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{(r_{a/c})_{\text{real}}}{(r_{a/c})_{\text{teórica}}} \times 100 - 100 \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.7})$$

Ecuación 3.7: Porcentaje de exceso de aire en la combustión.

3.4.7 Cálculo del calor útil (Q₁)

Es el calor útil que el generador de vapor emplea para evaporar el agua hasta la presión y temperatura respectiva.

$$Q_1 = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.8})$$

Ecuación 3.8: Calor útil del generador de vapor.

- Donde:
- \dot{m}_v : Flujo de vapor en lb/h
 - \dot{m}_c : flujo de combustible en lb/h
 - $h_1; h_2$: Entalpías que se hallaron en tablas termodinámicas de vapor
 - h_1 : Líquido subenfriado o comprimido en BTU/lb
 - $h_2 = h_g$: Vapor saturado em BTU/lb

3.4.8 Calor perdido en gases de escape (Q₂)

El calor que se llevan los gases de escape por transferencia de calor con el ambiente:

$$Q_2 = m_g \cdot C_{pg} \cdot (T_g - T_{BS}) \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.9})$$

Ecuación 3.9: Calor perdido en gases de escape.

- Dónde:
- m_g : Flujo de masa de gases $\left(\frac{\text{Lb}_{\text{gases}}}{\text{Lb}_{\text{combustible}}} \right)$
 - C_{pg} : Calor específico de los gases: $0,24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$
 - T_g : Temperatura de salida de los gases
 - T_{BS} : Temperatura del ambiente

Para el flujo de masa de gases, se considerará los productos de la combustión:

$$\%CO_2 + \%CO + \%O_2 + \%H_2O + \%N$$

Teniendo en cuenta solamente los humos o gases presentes de dichos productos: mg

$$mg = 44(\%CO_2) + 28(\%CO) + 28(\%O_2) + 28(\%N) + 32(\%H_2O) \dots \dots \dots (Ec. 3.10)$$

Ecuación 3.10: Porcentajes de los gases de combustión.

$$mg = 44(\%CO_2) + 28(\%CO) + 28(\%O_2) + 28(100\% - \%CO_2 - \%CO - \%O_2) + 32(\%H_2O)$$

De donde se obtiene:

$$mg = [16(\%CO_2) + 4(\%O_2) + 28\%] \text{ lb de gases}$$

Así mismo, la cantidad de “C” presente en estos gases es:

$$C = 12(\%CO_2 + \%CO) \text{ lbs de C}$$

También se sabe que la composición del combustible en peso es:

85% C

15% H

Finalmente, la masa de gases por libra de combustible será:

$$mg = \frac{16(\%CO_2) + 4(\%O_2) + 2800 \text{ lb de gases}}{12(\%CO_2 + \%CO) \text{ lb de C}} \times 0,85 \frac{\text{lb C}}{\text{lb comb.}}$$

$$mg = \frac{4(\%CO_2) + (\%O_2) + 700}{3(\%CO_2 + \%CO)} \times 0,85 \frac{\text{lb gases}}{\text{lb combustible}} \dots \dots \dots (Ec. 3.11)$$

Ecuación 3.11: Flujo de masa de gases.

3.4.9 Calor perdido por evaporación del agua de formación (Q_3)

$$Q_3 = 9H \left[C_{pa} (212 - T_c) + C_L + C_{pv} (T_g - 212) \right] \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}} \right) \dots (\text{Ec. 3.12})$$

Ecuación 3.12: Calor perdido por evaporación.

Donde:

$$C_{pa} (212 - T_c) \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = \text{Elevación de temperatura del agua en formación hasta } 212^\circ\text{F (100}^\circ\text{C)}$$

$$C_L = 970,3 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = \text{Calor latente de vaporización del agua en formación.}$$

$$C_{pv} (T_g - 212) \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} = \text{elevación de temperatura del agua en formación desde } 212^\circ\text{F hasta la temperatura de los gases}$$

$$H = \% \text{ en peso de hidrógeno / lb combustible (0,15)}$$

$9H =$ Cantidad de agua formada en fracción ponderal considerando que 1 lb de hidrógeno es capaz de formar 9 libras de agua.

$T_c =$ temperatura del combustible

$T_g =$ temperatura de salida de los gases de escape.

$$C_{pa} = \text{Calor específico del agua } \left(1 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} \right)$$

$$C_{pv} = \text{Calor específico del vapor de agua } \left(0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} \right)$$

3.4.10 Calor perdido por combustión incompleta (Q_4)

Teniendo en cuenta las siguientes reacciones químicas de combustión:

Tabla 3.1 Reacciones químicas de combustión.

Reacción	Calor de combustión (BTU/lb-combust.)
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	3960
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	14150

Elaboración: propia.

Entonces:

$$Q_4 = \frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO} \cdot (14150 - 3960) \times 0,85 \frac{BTU}{lb.comb} \dots\dots\dots(Ec. 3.13)$$

Ecuación 3.13: Calor perdido por combustión incompleta.

Donde:

$\frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO}$ = Cantidad porcentual de CO en los gases de escape en reacciones químicas de combustión de “C” y “O”,

$(14150 - 3960)$ = Cantidad de calor en BTU/lb al dejar de tener reacciones químicas a CO_2 y haber obtenido en su lugar reacciones químicas a CO.

0,85 = Porcentaje en peso de “C” presente en el combustible.

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

3.4.11 Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q₅)

$$Q_5 = M \cdot C_{pv} (T_g - TBS) \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.14})$$

Ecuación 3.14: Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire.

Donde:

M_v = Vapor de agua ambiental / lb de comb.

$$M_v = W \frac{\text{lb de humedad}}{\text{lb de aire}} \cdot (r_{a/c})_{\text{real}} \frac{\text{lb de aire}}{\text{lb comb.}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.15})$$

Ecuación 3.15: Vapor de agua ambiental.

Donde:

W = relación de humedad, que se determinará con TBS y TBH en la carta psicrométrica.

C_{pv} = Calor específico del vapor (0,46 $\frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$)

T_g = Temperatura de gases de escape en °F.

TBS = Temperatura de bulbo seco o del ambiente en °F.

3.4.12 Calor perdido por radiación, convección y otras pérdidas (Q₆)

$$Q_6 = Q_T - \sum_{i=1}^5 Q_i \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.16})$$

Ecuación 3.16: Calor perdido por radiación, convección y otros.

Donde:

Q_T = Poder calorífico alto (19300 BTU/lb.comb.)

$\sum_{i=1}^5 Q_i$ = sumatoria de los cinco calores calculados anteriormente.

3.4.13 Cálculo del HP de caldera (HP_c)

Esta definición es de carácter hipotético definida como una masa de vapor de 15,6 Kg/h (34,5 lb/h) que desde y hasta 100°C (212°F) cuyo valor latente de vaporización 538,9 Kcal/Kg (970,3 BTU/lb) a una presión de 14,7 PSI permite obtener una cantidad de calor de 8437 Kcal/h (33500 BTU/h) con una superficie de calentamiento de 0,929 m² (10 pies²) el cual en una máquina de vapor produce un 1 HP.

$$HP_c = \frac{Q_1 \times \dot{m}_c}{33500 \text{ BTU/h-HP}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.17})$$

Ecuación 3.17: HP de la caldera.

Donde:

Q₁ = calor útil en BTU/lb combustible.

\dot{m}_c = Flujo de combustible en lb combustible/h.

HP_c= HP de la caldera (adimensional).

3.4.14 Cálculo del Factor de Evaporación (f_e)

Factor definido como la relación entre Δh en el caldero y el Δh de un HP de caldera, permite evaluar el calor ganado por el agua en el interior del caldero en términos de evaporación equivalente. Se calcula por la siguiente ecuación:

$$f_e = \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta h_{1HP_{caldero}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.18})$$

Ecuación 3.18: Factor de evaporación.

Donde:

h₂, h₁: Entalpías en el proceso de evaporación en el caldero.

3.4.15 Cálculo de la evaporación equivalente (E_e)

La evaporación equivalente sirve para fines de comparación de generadores de vapor que trabajan a diferentes presiones, temperaturas y combustibles, lo más conveniente es reducirlas a un mismo nivel de comparación, esto es expresar su relación con las definiciones hipotéticas de caballo de caldera.

Es decir, evaporación equivalente expresa las libras de agua que se pueden evaporar desde y hasta 212°F.

Se calcula por la ecuación:

$$E_e = f_e \cdot \dot{m}_v \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.19})$$

Ecuación 3.19: Evaporación equivalente.

Donde:

f_e = Factor de evaporación

\dot{m}_v = Flujo de vapor

3.4.16 Producción de caldero (P_v)

Concepto importante también para fines de comparación que nos permite comparar las libras de vapor equivalente por unidad de combustible usado.

Se calcula por la ecuación:

$$P_v = \frac{E_e}{\dot{m}_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.20})$$

Ecuación 3.20: Producción de caldero.

Donde: E_e = evaporación equivalente

\dot{m}_c = flujo de combustible

3.4.17 Rating (%R)

Debido a que los generadores de vapor cada vez alcanzaban mayores capacidades, surgió este concepto que compara su régimen de funcionamiento con los definidos por el caballo de caldera.

$$\%R = \frac{\frac{Q_1}{33500 \text{ BTU/h-HP}}}{\frac{S_c}{10 \text{ pie}^2/\text{HP}}} \times 100 \dots\dots\dots (\text{Ec. 3.21})$$

Ecuación 3.21: Rating.

Donde:

Q_1 = calor útil ganado por el agua

S_c = superficie de calentamiento del generador de vapor

3.4.18 Cálculo de la eficiencia de la Caldera (η)

$$\eta (\%) = \frac{Q_1}{P_c} \times 100 \dots\dots\dots (\text{Ec. 3.22})$$

Ecuación 3.22: Eficiencia de la caldera.

Donde:

Q_1 = calor útil ganado por el agua

P_c = poder calorífico del combustible Diesel 2 ($19300 \frac{\text{BTU}}{\text{lb combustible}}$)

3.5 Metodología para Resumir los Cálculos del Balance Térmico en el Diagrama de Sankey

El diagrama de Sankey lleva el nombre del Capitán Irlandés Matthew Sankey, quien utilizó por primera vez en 1898 para resumir gráficamente balances de procesos energéticos, se asemeja a un árbol donde el grosor de cada rama es proporcional a su valor energético cuantitativo en porcentaje.

Para el cálculo de cada calor en porcentaje establecemos la siguiente regla de tres simple, por ejemplo para la determinación del % Q_1 : ($Q_T = 19300 \frac{BTU}{lb\ comb.}$) :

$$\begin{array}{l}
 Q_T \quad \longrightarrow \quad 100\% \\
 \\
 Q_1 \quad \longrightarrow \quad X\%
 \end{array}$$

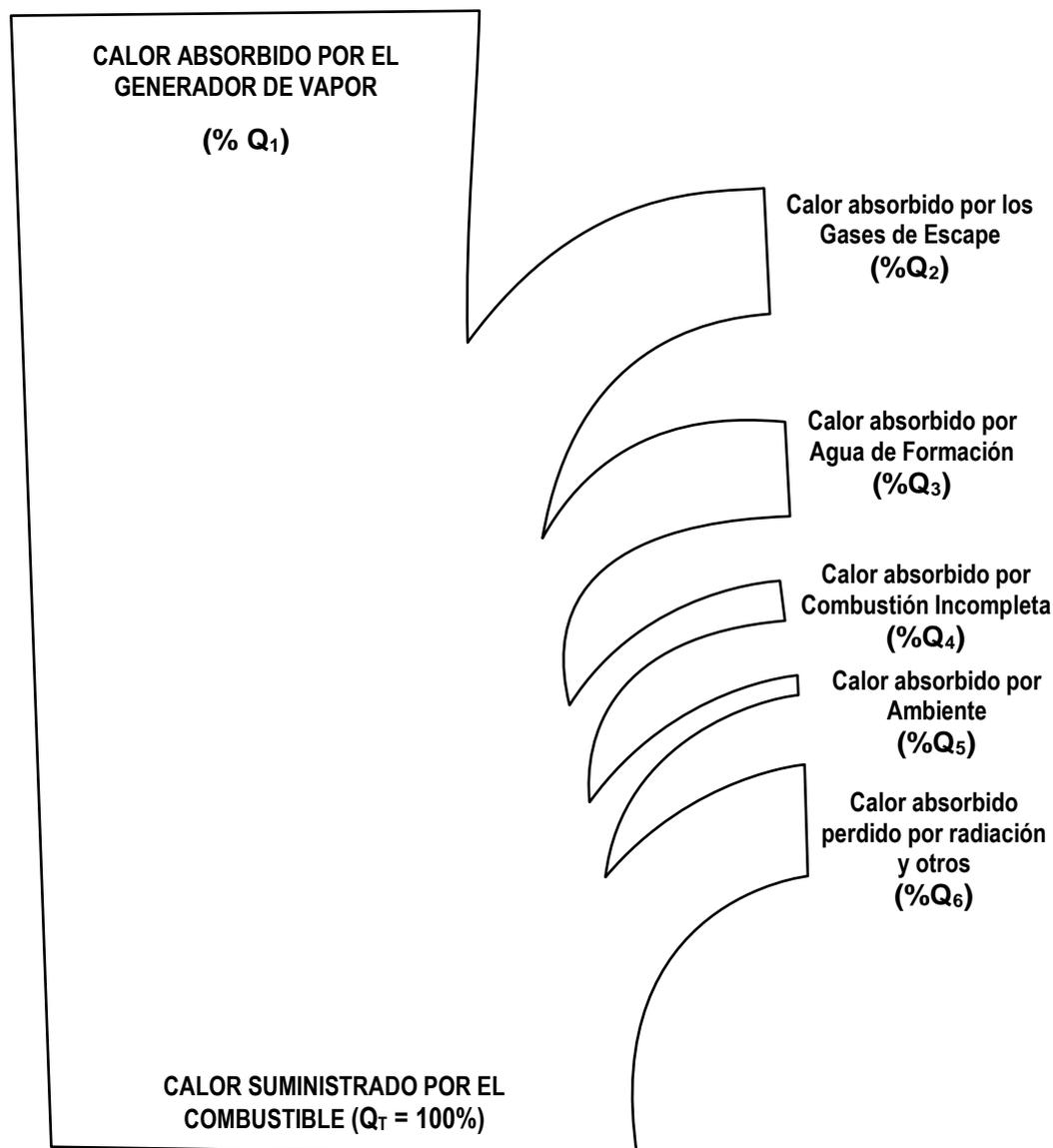
Entonces:

$$X\% = \%Q_1 = \frac{Q_1 \times 100}{19300} \dots\dots\dots(Ec.3.23)$$

Ecuación 3.23 Porcentaje de calores.

Análogamente se determinarán los porcentajes de los demás calores del balance térmico de la caldera.

Figura 3.4: Diagrama de Sankey que corresponde al funcionamiento de la caldera del Comedor.



Elaboración: Propia.

3.5.1 Metodología de cálculo de la performance

3.5.1.1 Cálculo del HP de caldera (HP_C)

Definición de carácter hipotético definido como una masa de vapor de 15,6 Kg (h) o 34,5 lb/h que se calienta desde y hasta 100°C (212°F) cuyo calor latente de vaporización 538,9 Kcal/Kg (970,3 BTU/lb o 14,7 PSI) permite obtener una cantidad de calor de 8437

Kcal/h (33500 BTU/h) con una superficie de calentamiento de 0,929 m² (10 pies²) el cual en una máquina de vapor produce 1 HP.

Cabe hacer mención que estas definiciones nacieron cuando los generadores de vapor eran solamente simples recipientes hervidores de agua, y solamente sirven para fines de comparación entre los diferentes generadores de vapor existentes.

$$HP_C = 27,14 \text{ (adimensional)}$$

3.5.1.2 Cálculo del factor de evaporación (f_e)

Se define como la relación entre Δh en el caldero y Δh de un HP de caldera, permite evaluar el calor ganado por el agua en el interior del caldero en términos de evaporación equivalente. El factor de evaporación es adimensional.

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{\Delta h_{1HPcaldero}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.24})$$

Ecuación 3.24: Factor de evaporación.

3.5.1.3 Evaporación equivalente (E_e)

Se utiliza para fines de comparación de generadores de vapor que trabajan a diferentes presiones, temperaturas y con distintos tipos de combustibles, lo más conveniente es reducirlos a un mismo nivel de comparación, esto es expresar su relación con las definiciones hipotéticas de caballo de caldera.

Es decir, la evaporación equivalente expresa las libras de agua que se pueden evaporar desde y hasta 212°F.

$$E_e = f_e \cdot \dot{m}_v \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.25})$$

Ecuación 3.25: Evaporación equivalente.

Dónde: \dot{m}_v =flujo de vapor en lb/h

f_e = factor de evaporación

3.5.1.4 Producción de Caldero (P_v)

Concepto importante también para fines de comparación que nos permite comparar las libras de vapor equivalente por unidad de combustible usado.

$$P_v = \frac{E_e}{\dot{m}_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.26})$$

Ecuación 3.26: Producción de caldero.

Dónde: E_e = evaporación equivalente

\dot{m}_c = flujo de combustible

3.5.1.5 Rating (%R)

Se calcula debido a que los generadores de vapor cada vez alcanzan mayores capacidades, este concepto compara su régimen de funcionamiento con los definidos por el caballo de caldera.

$$\%R = \frac{Q_1 / 33500 \frac{\text{BTU}}{\text{h-HP}}}{S_c / 10 \frac{\text{pie}^2}{\text{HP}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 3.27})$$

Ecuación 3.27: Rating.

Dónde: Q_1 = calor útil ganado por el agua

S_c = superficie de calentamiento del generador de vapor

3.5.1.6 Eficiencia del Generador (η)

$$\eta (\%) = \frac{Q_1}{P_c} \dots\dots\dots (Ec. 3.28)$$

Ecuación 3.28: Eficiencia del generador.

Dónde: Q_1 = calor útil ganado por el agua

P_c = poder calorífico del Diesel 2

3.5.1.7 Determinación del pH

Lo importante de esta medición es predecir el efecto corrosivo del agua de alimentación. Mediante el uso del papel de tornasol o lámina indicadora de pH, introducida la laminilla, especial de una muestra del agua de alimentación del generador de vapor durante 5 segundos hasta que tome una coloración determinada para determinar su pH respectivo.

3.6 Ensayo técnico experimental

Los datos experimentales medidos en la sala de máquinas de la caldera fueron:

- Temperatura de bulbo seco: TBS = 22°C
- Temperatura de bulbo húmedo: TBH = 18°C
- Temperatura de agua de alimentación: T_a = 19°C
- Temperatura del Combustible: T_c = 23°C
- Temperatura de gases de escape: T_g = 344°C
- Presión de salida de vapor: P_v = 120 PSI
- Consumo de combustible (Diesel 2):

$$V_c = 125 \text{ galones}$$

$$t_c = 11 \text{ horas}$$

- Análisis de gases:

$$\%CO_2 = 12,8$$

$$\%CO = 0,3$$

$$\%O_2 = 3,4$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos que se midieron en la sala de máquinas de la caldera fueron los siguientes:

- a) Temperatura de bulbo seco ambiental:

$$TBS = 20^{\circ}\text{C}$$

- b) Temperatura de bulbo húmedo ambiental:

$$TBH = 17,8^{\circ}\text{C}$$

- c) Temperatura de agua de alimentación:

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

- d) Temperatura del combustible:

$$T_c = 20,6^{\circ}\text{C}$$

- e) Temperatura de gases de escape:

$$T_g = 350^{\circ}\text{C}$$

f) Presión de salida de vapor:

$$P_v = 110,5 \text{ PSI}$$

g) Consumo de combustible:

$$V_c = 106 \text{ galones} \quad \text{en}$$

$$t_c = 11 \text{ horas}$$

h) Análisis de gases:

$$\% \text{ CO}_2 = 12,8$$

$$\% \text{ CO} = 0,3$$

$$\% \text{ O}_2 = 3,4$$

4.1 Resultados de los cálculos del balance energético de la caldera

Todos los cálculos se realizaron en unidades del sistema inglés, porque a pesar de que el sistema de unidades internacional está imperando en nuestro país, en esta especialidad respecto a los generadores de vapor o calderas, se mantiene el sistema inglés habitualmente.

4.1.1 Cálculo del flujo de vapor (\dot{m}_v)

La caldera pirotubular del comedor en su instalación tiene un medidor de caudal del tipo de orificio para medir el flujo de vapor, el cual es de lectura directa; obteniéndose la siguiente medida:

$$\dot{m}_v = 1 \text{ 068 lbs/h}$$

4.1.2 Cálculo del flujo de Combustible (\dot{m}_c)

El consumo de combustible Diesel 2 de la caldera del comedor está en el orden de 90 – 110 galones de combustible, consumido en 11 horas diarias de 6 a.m. a 2 p.m. y de 4 p.m. a 7 p.m. El día que se midió fue el 29 de diciembre del 2016, la caldera consumió 106 galones en las 11 horas.

Entonces:

$$V_c = 106 \text{ galones}$$

$$t_c = 11 \text{ horas}$$

$$V_c = 106 \text{ galones} \times 0,13368 = 14,17 \text{ pies}^3$$

Sabemos que:
$$\delta_{\text{diesel 2}} = \frac{m_c}{V_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.1})$$

Entonces:
$$m_c = V_c \cdot \delta_{\text{diesel 2}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.2})$$

Pero:
$$\delta_{\text{diesel 2}} = 54,6 \text{ lb/pie}^3$$

Por consiguiente:
$$m_c = 14,17 \text{ pie}^3 \cdot \left(54,6 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \right)$$

$$m_c = 773,68 \text{ lb}$$

Entonces el flujo de combustible \dot{m}_c será igual a:

$$\dot{m}_c = \frac{m_c}{t_c} = \frac{773,68 \text{ lb}}{11 \text{ h}} = 70,33 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

4.1.3 Cálculo para el análisis de gases

Los porcentajes que se obtuvieron del analizador de gases fueron:

$$\% \text{CO}_2 = 12,8$$

$$\% \text{O}_2 = 3,4$$

$$\% \text{CO} = 0,3$$

Considerando que:

$$\% \text{CO}_2 + \% \text{O}_2 + \% \text{CO} + \% \text{N}_2 = 100\% \dots\dots\dots (\text{Ec. 4.3})$$

Entonces:

$$12,8\% + 3,4\% + 0,3\% + \% \text{N}_2 = 100\%$$

$$\% \text{N}_2 = 83,5$$

4.1.4 Cálculo de la relación aire combustible real ($r_{a/c}$)_{real}

Para una combustión incompleta o real la ecuación es igual a:



Del análisis de gases obtenemos que:

$$c = 12,8 \% \text{ de } \text{CO}_2$$

$$d = 0,3 \% \text{ de } \text{CO}$$

$$e = 3,4 \% \text{ de } \text{O}_2$$

$$f = b = 83,5 \% \text{ de } \text{N}_2$$

Además, considerando la composición volumétrica del aire:

$$\text{Nitrógeno} \quad : 79\%$$

$$\text{Oxígeno} \quad : 20,99\%$$

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

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

$$a = \frac{83,5}{3,76} = 22,21$$

Efectuando el balance de la ecuación de combustión:

C : $x = c + d$

$$x = 12,8 + 0,3$$

$$x = 13,1$$

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

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

$$g = 2(22,21) - [2(12,8) + 0,3 + 2(3,4)]$$

$$g = 11,72$$

H : $y = 2g$

$$y = 2 (11,72)$$

$$y = 23,44$$

Calculamos la relación aire combustible real:

$$(r_{a/c})_{real} = \frac{32 \frac{lb}{mol} O_2 \left(\frac{N^\circ}{moles} O_2 \right) + 28 \frac{lb}{mol} N_2 \left(\frac{N^\circ}{moles} N_2 \right)}{12 \frac{lb}{mol} C \left(\frac{N^\circ}{moles} C \right) + 1 \frac{lb}{mol} H \left(\frac{N^\circ}{moles} H \right)} \dots\dots\dots (Ec. 4.5)$$

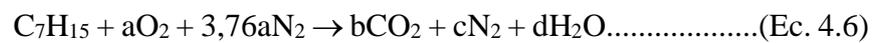
Reemplazando los números de moles, calculados en el balance de la ecuación de combustión:

$$(r_{a/c})_{\text{real}} = \frac{32(22,21) + 28(83,5)}{12(13,1) + 1(23,44)}$$

$$(r_{a/c})_{\text{real}} = 16,88 \frac{\text{lb}_{\text{aire}}}{\text{lb}_{\text{comb.}}}$$

4.1.5 Cálculo de la relación aire combustible teórico $(r_{a/c})_{\text{teórico}}$

Para una combustión completa o teórica la ecuación es igual a:



Balanceando:

$$\text{C} : 7 = b$$

$$b = 7$$

$$\text{H} : 15 = 2d$$

$$d = 7,5$$

$$\text{O} : 2a = 2b + d$$

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

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

$$a = 10,75$$

Entonces reemplazando los números de moles en la ecuación 3:

$$(r_{a/c})_{\text{teórica}} = \frac{32(10,75) + 3,76(10,75)28}{12(7) + 1(15)}$$

$$(r_{a/c})_{\text{teórica}} = 14,91 \frac{\text{lb}_{\text{aire}}}{\text{lb}_{\text{comb.}}}$$

4.1.6 Cálculo del exceso de aire

El porcentaje de exceso de aire lo calculamos con la ecuación 4:

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{(r_{a/c})_{\text{real}}}{(r_{a/c})_{\text{teórica}}} \times 100 - 100 \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.7})$$

$$\% \text{ Exceso aire} = \frac{16,88}{14,91} \times 100 - 100$$

$$\% \text{ Exceso aire} = 13,21\%$$

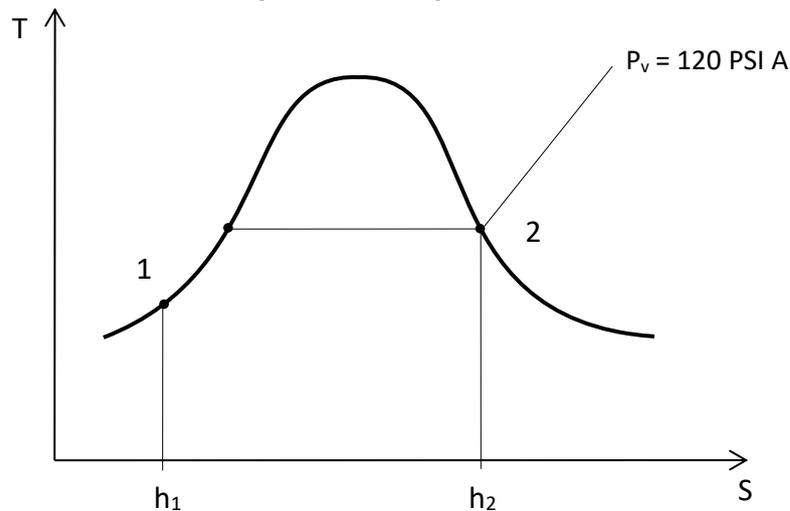
4.1.7 Cálculo del calor útil (Q₁)

Se calculó con la ecuación 3.8:

$$Q_1 = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.8})$$

El proceso en el generador de vapor lo graficamos en el diagrama T-S.

Figura 4.1: Diagrama T-S.



Elaboración: propia.

La prueba de salida del vapor (P_v) medida fue de 110,5 PSI en el manómetro de la caldera, pero en el diagrama T-S debe ser presión absoluta, por lo tanto:

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

La presión atmosférica de Puno, medida en el laboratorio de la Escuela Profesional de Físico Matemática fue de 490 mm Hg, la cual expresada en PSI (lb/pulg²) es igual a:

$$P_{\text{atmosférica}} = 490(0,01934) = 9,48 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

Entonces la presión de salida del vapor es igual a:

$$P_v = 110,5 + 9,48 = 119,98 \text{ lb/pulg}^2.$$

De tablas termodinámicas de vapor, considerando $P_v = 120 \text{ PSIA}$ (lb/pulg² absolutas) aproximando 2 céntimos, no se cometen errores significativos.

$$h_2 = \text{vapor saturado} = h_{g120\text{PSIA}}$$

$$h_2 = 2043,437 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 878,50 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$h_1 = \text{líquido subenfriado.}$$

Aunque las propiedades del líquido subenfriado o comprimido podrían tabularse de una manera similar a las del vapor sobrecalentado, las propiedades del líquido subenfriado no difieren esencialmente de las del líquido saturado a la misma temperatura.

$$h_1 = h_f \text{ a } 15^\circ\text{C} = 62,99 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 27,08 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

También:

$$\dot{m}_v = 1068 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_c = 70,33 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Reemplazando en la ecuación 4.8:

$$Q_1 = \frac{1068 \text{ lb/h}}{70,33 \text{ lb/h}} (878,50 - 27,08) \text{ BTU/lb}$$

$$Q_1 = 12929,28 \frac{\text{BTU}}{\text{lb combustible}}$$

4.1.8 Calor perdido en gases de escape (Q₂)

Empleando la ecuación 3.9:

$$Q_2 = mg \cdot C_{Pg} \cdot (T_g - T_{Bs}) \dots \dots \dots (\text{Ec. 4.9})$$

Donde:

mg = flujo de masa de gases

Lo calculamos empleando la ecuación 3.11:

$$mg = \frac{4(\% \text{CO}_2) + (\% \text{O}_2) + 700}{3(\% \text{CO}_2 + \% \text{CO})} \times 0,85 \dots \dots \dots (\text{Ec. 4.10})$$

$$mg = \frac{4(12,8) + 3,4 + 700}{3(12,8 + 0,3)} \times 0,85$$

$$mg = 16,32 \frac{\text{lb}_{\text{gases}}}{\text{lb}_{\text{comb.}}}$$

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

$$T_g = 350^\circ\text{C} = 662^\circ\text{F}$$

$$T_{BS} = 20^\circ\text{C} = 68^\circ\text{F}$$

Reemplazando:

$$Q_2 = 16,32 \frac{\text{lb}_{\text{gases}}}{\text{lb}_{\text{comb.}}} \times 0,24 \frac{\text{BTU}}{\text{lb-}^\circ\text{F}} (662 - 68)^\circ\text{F}$$

$$Q_2 = 2326,58 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}_{\text{combust.}}}$$

4.1.9 Cálculo del calor perdido por evaporación del agua de formación (Q₃)

Empleando la ecuación 3.12:

$$Q_3 = 9H [1(212 - T_c) + 970,3 + 0,46(T_g - 212)] \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.11})$$

Donde:

H = porcentaje en peso del hidrógeno/lb combustible

$$H = 0,15$$

$$T_c = \text{Temperatura del combustible} = 20,6^\circ\text{C} = 69^\circ\text{F}$$

$$T_g = \text{Temperatura de los gases de escape} = 350^\circ\text{C} = 662^\circ\text{F}$$

Reemplazando:

$$Q_3 = 9(0,15) [1(212 - 69) + 970,3 + 0,46(662 - 212)]$$

$$Q_3 = 1782,41 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}}$$

4.1.10 Cálculo del calor perdido por Combustión incompleta (Q4)

Calculamos empleando la ecuación 3.13:

$$Q_4 = \frac{\%CO}{\%CO_2 + \%CO} \cdot (14150 - 3960) \times 0,85 \frac{\text{BTU}}{\text{lb.comb}} \dots(\text{Ec. 4.12})$$

Donde:

$$\%CO = 0,3$$

$$\%CO_2 = 12,8$$

Reemplazando:

$$Q_4 = \frac{0,3}{12,8 + 0,3} \cdot (14150 - 3960) \times 0,85$$

$$Q_4 = 198,20 \frac{\text{BTU}}{\text{lb.comb}}$$

4.1.11 Cálculo del calor perdido por calentamiento de la humedad del aire (Q5)

Calculamos empleando la ecuación 3.14:

$$Q_5 = M \cdot Cp_v (T_g - TBS) \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.13})$$

Donde:

$$M = W \frac{\text{lb de humedal}}{\text{lb de aire}} \cdot (r_{a/c})_{\text{real}} \frac{\text{lb de aire}}{\text{lb comb.}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.14})$$

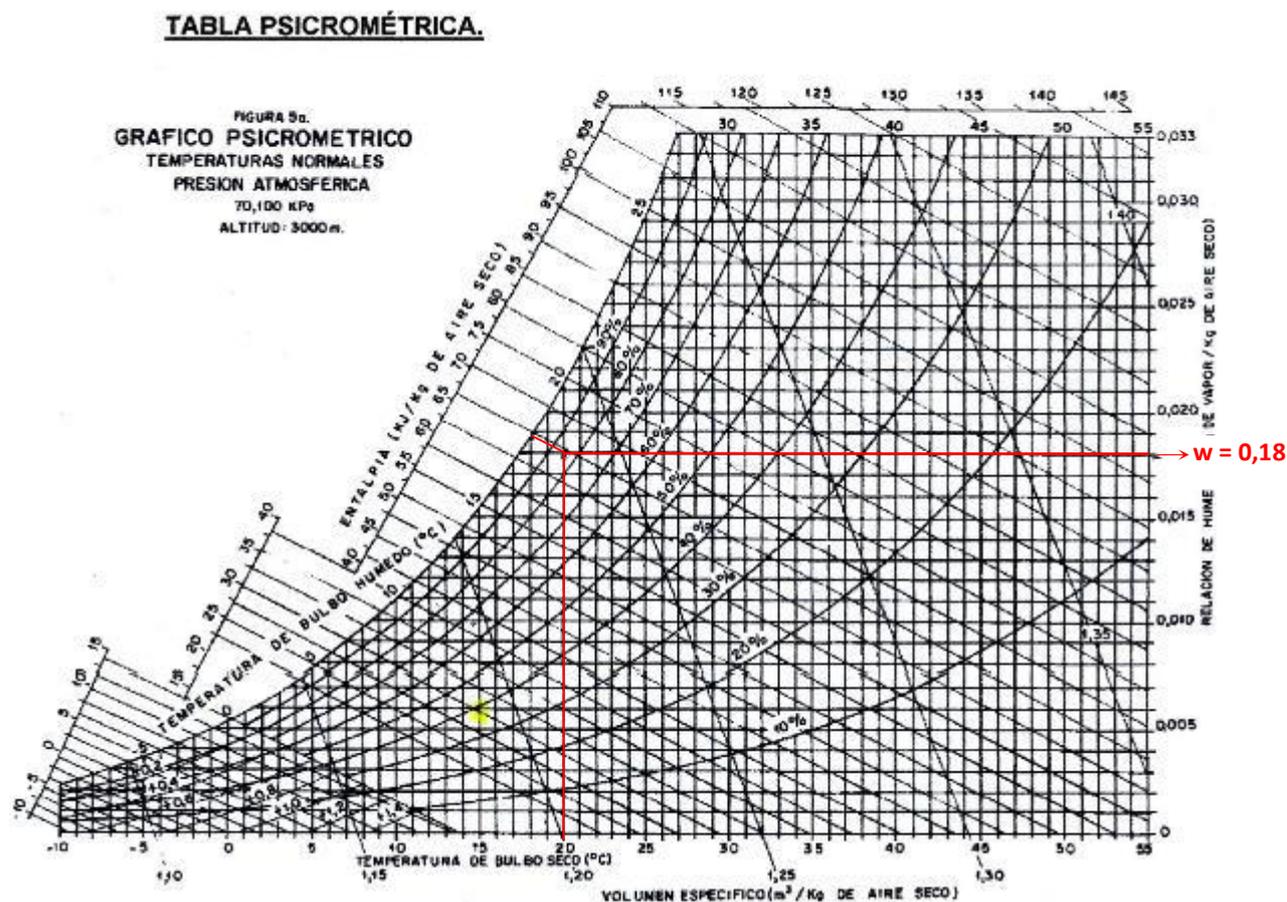
Donde:

W = relación de humedad, lo determinamos en la carta psicrométrica.

Con: TBS = 20°C

TBH = 17,8°C

Figura 4.2: Tabla Psicrométrica.



Fuente: http://frioycolor.info/Comunes/Completo_Curso_FrioCalor

De la Carta Psicrométrica:

$$W = 0,018 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb aire}}$$

$$\text{También: } (r_{a/c})_{\text{real}} = 16,88 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}}$$

Reemplazando:

$$M = 0,018 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb aire}} \times 16,88 \frac{\text{lb aire}}{\text{lb comb.}}$$

$$M = 0,3038 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb comb.}}$$

Cpv = Calor específico del vapor de agua = $0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}}$

Tg = temperatura de los gases de escape = $350^\circ\text{C} = 662^\circ\text{F}$

TBS = Temperatura de bulbo seco o del ambiente = $17,8^\circ\text{C} = 64^\circ\text{F}$

Reemplazando en la ecuación 10:

$$Q_5 = 0,3038 \frac{\text{lb vapor}}{\text{lb comb.}} \cdot 0,46 \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}} (662^\circ\text{F} - 64^\circ\text{F})$$

$$Q_5 = 83,57 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}}$$

4.1.12 Cálculo del calor perdido por radiación, convección y otros (Q6)

Calculamos empleando la ecuación 3.14:

$$Q_6 = Q_T - \sum_{i=1}^5 Q_i \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.15})$$

Donde:

$$Q_T = 19300 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}}$$

$$\sum_{i=1}^5 Q_i = 12929,28 + 2326,58 + 1782,41 + 198,20 + 83,57 = 17320,04$$

Entonces:

$$Q_6 = 19300 - 17320,04$$

$$Q_6 = 1979,96 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}}$$

4.1.13 Cálculo del HP de Caldera (HP_c)

Calculamos a través de la ecuación 3.17:

$$HP_C = \frac{Q_1}{33500 \text{ BTU/h-HP}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.18})$$

Dónde: $Q_1 = 12929,28 \text{ BTU/lb combustible}$

$$\dot{m}_c = 70,33 \text{ lb combustible/h}$$

Reemplazando:

$$HP_C = \frac{12929,28 \frac{\text{BTU}}{\text{lb combust.}} \times 70,33 \frac{\text{lb combust.}}{\text{h}}}{33500 \text{ BTU/h-HP}}$$

$$HP_C = 27,14$$

4.1.14 Cálculo del factor de evaporación (f_e)

Calculamos empleando la ecuación 3.18:

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{\Delta h_{IHPcaldero}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.19})$$

Donde:

$$h_2 = 878,50 \text{ BTU/lb}$$

$$h_1 = 27,08 \text{ BTU/lb}$$

$$\Delta h_{1HPcaldero} = 970,3 \text{ BTU/lb}$$

Reemplazando:

$$f_e = \frac{(878,50 - 27,08) \text{ BTU/lb}}{970,3 \text{ BTU/lb}}$$

$$f_e = 0,88$$

4.1.15 Cálculo de la evaporación equivalente (E_e)

Calculamos empleando la ecuación 3.19:

$$E_e = f_e \cdot \dot{m}_v \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.20})$$

Donde:

$$f_e = 0,88$$

$$\dot{m}_v = 1068 \text{ lb vapor/h}$$

Reemplazando:

$$E_e = 0,88 \left(1068 \frac{\text{lb vapor}}{\text{h}} \right)$$

$$E_e = 939,84 \frac{\text{lb vapor equivalente}}{\text{h}}$$

4.1.16 Cálculo de la producción de vapor (P_v)

Calculamos empleando la ecuación 3.20:

$$P_v = \frac{E_e}{\dot{m}_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.21})$$

Donde:

$$E_e = 939,84 \frac{\text{lb vapor equivalente}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_c = 70,33 \frac{\text{lb combustible}}{\text{h}}$$

Reemplazando:

$$P_v = \frac{939,84 \frac{\text{lb vapor equivalente}}{\text{h}}}{70,33 \frac{\text{lb combustible}}{\text{h}}}$$

$$P_v = 13,36 \frac{\text{lb vapor equivalente}}{\text{lb combustible}}$$

4.1.17 Cálculo del Rating (%R)

Calculamos empleando la ecuación 3.21:

$$\%R = \frac{\frac{Q_1}{33500 \text{ BTU/h-HP}}}{\frac{S_c}{10 \text{ pie}^2/\text{HP}}} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.22})$$

Donde:

$$Q_1 = 12929,28 \text{ BTU/lb}$$

$$S_c = 1250 \text{ pie}^2$$

Reemplazando:

$$\%R = \frac{\frac{12929,28 \text{ BTU/lb}}{33500 \text{ BTU/h-HP}}}{\frac{1250 \text{ pie}^2}{10 \text{ pie}^2/\text{HP}}}$$

$$\%R = 0,31\%$$

4.1.18 Cálculo de la eficiencia de la caldera (η)

Calculamos empleando la ecuación 3.22:

$$\eta(\%) = \frac{Q_1}{P_c} \dots\dots\dots(\text{Ec. 4.23})$$

Donde:

$$Q_1 = 12929,28 \text{ BTU/lb combustible}$$

$$P_c = 19300 \text{ BTU/lb combustible}$$

Reemplazando:

$$\eta(\%) = \frac{12929,28 \text{ BTU/lb combustible}}{19300 \text{ BTU/lb combustible}}$$

$$\eta(\%) = 66,99\%$$

4.2 Resultados del balance térmico en el diagrama de SANKEY

Los resultados de los cálculos del balance térmico de la caldera son:

$$Q_1 = 12\ 929,28 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_2 = 2\ 326,58 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_3 = 1\ 782,41 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_4 = 198,20 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_5 = 83,57 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_6 = 1\,979,96 \text{ BTU/lb combust.}$$

Para hacer el diagrama de Sankey, los calores lo expresamos en porcentaje, de acuerdo al siguiente procedimiento:

$$Q_1 = 12929,28 \text{ BTU/lb combust.}$$

$$Q_T = 193000 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}} \longrightarrow 100\%$$

$$12929,28 \frac{\text{BTU}}{\text{lb comb.}} \longrightarrow X\%$$

$$X\% = \frac{12929,28 \times 100}{193000} = 66,99\%$$

Entonces: $Q_1 = 66,99\%$

Análogamente se procedió para los siguientes calores:

Tabla 4.1: Calores calculados en el Balance Térmico en porcentaje.

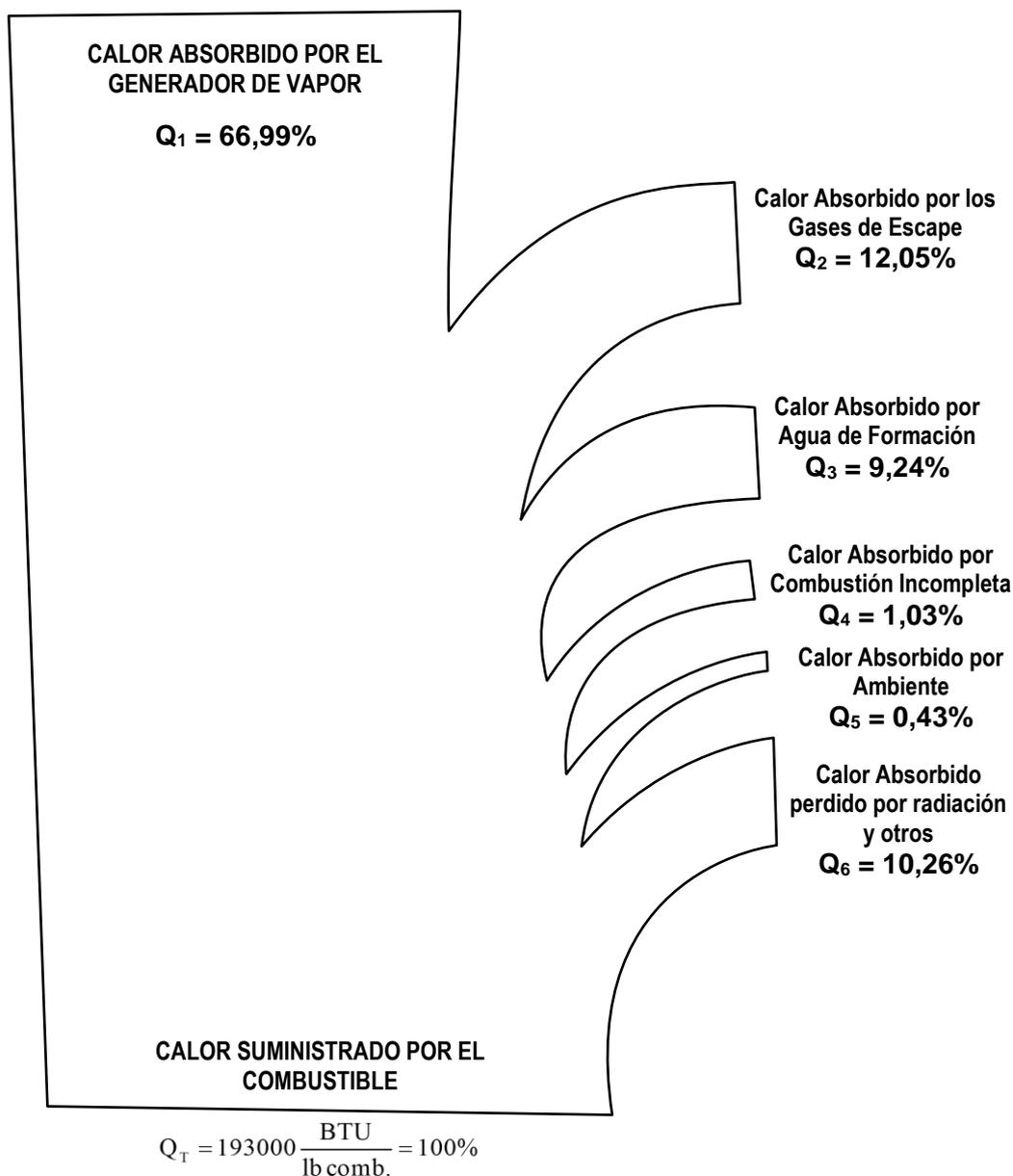
Q_i	BTU/lb combustible	$\%Q_i$
Q_1	12929,28	66,99%
Q_2	2326,58	12,05%
Q_3	1782,41	9,24%
Q_4	198,20	1,03%
Q_5	83,57	0,43%
Q_6	1979,96	10,26%

Elaboración: propia.

Resultados del Balance Térmico en el Diagrama de Sankey

Es un resumen del balance térmico que se expresa en forma gráfica.

Figura 4.3: Resultados en Diagrama de Sankey.



Elaboración: propia.

4.3 Valores Técnicos recomendados para el funcionamiento eficiente de una caldera

Para el análisis del diagrama Sankey, se recomiendan los siguientes valores:

- $Q_2 =$ calor perdido en gases de escape = 10%

- Q_3 = Calor perdido por evaporación del agua de formación = 4%
- Q_4 = Calor perdido por combustión incompleta = 0,21%
- Q_6 = Calor perdido por radiación, convección y otros = 2,5%
- No hay recomendación respecto al calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental (Q_5) porque este calor depende de las características ambientales de cada lugar donde funcione una caldera en particular.

Resultados:

Los resultados obtenidos en el balance energético o térmico de la caldera que se resumieron en el diagrama de Sankey en valores porcentuales fueron tabulados en la siguiente tabla:

Tabla 4.2: Calor útil y calores perdidos del diagrama de Sankey

Q_i^o	Calores calculados	Q_i (%)
Q_1	Calor útil	66,99%
Q_2	Calor perdido en gases de escape	12,05%
Q_3	Calor perdido por evaporación del agua de formación	9,24%
Q_4	Calor perdido por combustión incompleta	1,03%
Q_5	Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental	0,43%
Q_6	Calor perdido por radiación, convección y otros.	10,26%
Q_T	Calor o energía del Poder Calorífico del Diesel 2	100,00%

Elaboración: propia

Los porcentajes del calor útil y calores perdidos recomendados en base a experiencias técnicas para el funcionamiento óptimo de una caldera se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Porcentaje de los calores por recomendaciones técnicas para funcionamiento óptimo de calderas.

Q_i^o	Recomendaciones Técnicas sobre el Porcentaje de Calores del Diagrama de Sankey	Q_i (%)
Q_1	Calor útil	-
Q_2	Calor perdido en gases de escape	10,00
Q_3	Calor perdido por evaporación del agua de formación	4,00

Q ₄	Calor perdido por combustión incompleta	0,21
Q ₅	Calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental	-
Q ₆	Calor perdido por radiación, convección y otros.	2,5

Fuente: (UNI, 2007) Laboratorio de Ingeniería Mecánica (2007): Generador de Vapor (pp. 18-40) Lima, Editorial UNI.

Para la optimización de la eficiencia energética de la caldera pirotubular del comedor universitario se debe diagnosticar las fallas de funcionamiento de la caldera y facultar el mantenimiento y reparación respectivo para lo cual se debe comparar o contrastar los resultados del balance térmico del diagrama de Sankey de la tabla: 6, con las recomendaciones técnicas de la tabla: 7 en base a un análisis ingenieril aplicando la termodinámica y transferencia de calor, obteniéndose el siguiente diagnóstico energético:

La caldera en su funcionamiento tiene un calor útil (66,99%) deficiente, es decir relativamente menor que el que debería tener (72%) lo cual se debe a dos causas:

- 1) La pérdida de calor o energía por gases de escape calculado es 12,05% y el recomendado es 10,00%, lo cual representa un exceso de 2,05% más que el porcentaje recomendado.
- 2) La pérdida de calor o energía por convección, radiación y otro calculado es 10,26% y el recomendado es 2,5%, lo cual representa un exceso de 7,76% más que el porcentaje recomendado.

Por optimizar energéticamente la caldera se debe solucionar estos aspectos que elevarán la eficiencia de la caldera:

- 1) El sistema de refrigeración de la caldera debe reducir el calor por lo menos en un 1% más y al no hacerlo las pérdidas por gases de escape y por radiación se incrementan. Además, la caldera debe operar con un porcentaje de exceso de

aire alrededor de 10% lo que implicará una reducción de la temperatura de salida de los gases de escape y la consiguiente disminución del calor perdido. También la suciedad de las superficies de los tubos, del lado del fuego se debe limpiar pues influyen en el aumento de la temperatura de salida de los gases de escape, considerando que por cada 22°C de incremento de esta temperatura implica una pérdida cercana a un 1% de eficiencia.

- 2) Para reducir las pérdidas por radiación, convección y otros, que están en el orden de cuatro veces el recomendado se debe hacer un buen mantenimiento al cuerpo refractario y al aislamiento de la caldera, evitando puentes térmicos en el aislamiento, es decir, sin piezas de distancia (puentes térmicos) en el cuerpo cilíndrico de la caldera y aislar las aberturas de inspección, limpieza en el cuerpo de la caldera y en el colector de gases de escape.

Se debe también tratar de que la caldera opere a un mayor factor de carga, para que disminuyan estas pérdidas y aumente la eficiencia de la caldera.

Respecto a los calores perdidos por combustión incompleta el calculado es 1,03% y el recomendado es 0,21%, es decir, esta pérdida de calor es 4,9 veces el recomendado por lo que se debe disminuir para optimizar la operación de la caldera, para lo cual debe optimizarse la combustión midiendo (con instrumentos electrónicos en los gases de escape) la concentración del oxígeno como indicador del exceso de aire. Como segunda opción queda determinar la concentración del dióxido de carbono (CO_2). También se debe medir la concentración del monóxido de carbono (CO) que es un indicador de combustión incompleta, y por lo tanto determina el valor mínimo de exceso de aire en una caldera, su concentración no debe superar a 400 ppm.

La eficiencia de la caldera se aumentará elevando la temperatura del agua de alimentación debido a que se necesitará menos energía para producir el vapor. Como regla práctica, el aumentar 5°C la temperatura de alimentación de agua a la caldera implicará un aumento del 1% en la eficiencia de la caldera. Debe instalarse un intercambiador de calor utilizando la alta temperatura de los gases de escape. Para elevar la temperatura del agua de alimentación de la caldera y el aire de combustión, lo que contribuirá también a la optimización energética.

Optimización:

Desde el punto de vista energético, mecánico, económico y ambiental, la caldera del comedor universitario se encuentra utilizada en condiciones de carga inferior a la nominal, en cuanto a su eficiencia.

El ahorro de los recursos energéticos es un concepto muy importante en cualquier industria o unidad de servicios, la eficiencia de la caldera depende en gran medida de las pérdidas energéticas por radiación al medio exterior y los que ocurren en los gases de combustión.

La caldera se encuentra sobredimensionada para el nivel de consumo real, esto conlleva a que tenga un bajo factor de carga que afecta a su eficiencia energética y a la economía de la universidad. Se entiende por sobredimensionamiento la cantidad de vapor que es capaz de producir la caldera y que sobrepasa la cantidad real necesaria demandada por el consumidor.

La capacidad de producción de vapor de la caldera del comedor universitario según sus características técnicas es de 8625 Lb/h, y la producción de vapor de la caldera diariamente está en el orden de 1068 Lb/h, la alta diferencia entre la capacidad de técnica

de la caldera y la producción diaria se debe a un sobrestimamiento de capacidad durante la adquisición de la caldera probablemente a falta de un estudio adecuado.

Por consiguiente, es necesario aumentar el factor de carga de producción de vapor, lo cual necesariamente influirá en el aumento de la eficiencia de la caldera pirotubular del comedor de la UNA.

Se sabe que la eficiencia de la caldera es igual a:

$$\eta(\%) = \frac{Q_1}{P_C} * 100$$

Donde:

$$Q_1 = \frac{\dot{m}_V}{\dot{m}_C} * (h_2 - h_1)$$

P_C : Poder calorífico del diesel 2 = 19300 BTU/Lb

h_2 : 878,50 BTU/Lb

h_1 : 27,08 BTU/Lb

h_2 : 878,50 BTU/Lb

\dot{m}_C : 70,33 Lb/h

\dot{m}_V : 1068 Lb/h

Entonces, si aumentamos el factor de carga de producción de vapor de la caldera de 1068 Lb/h a 1100 lb/h, el calor útil Q_1 será igual a:

$$Q_1 = \frac{1100 \text{ Lb/h}}{70,33 \text{ Lb/h}} * (878,50 - 27,08) \text{ BTU/Lb}$$

$$Q_1 = 13316,68 \text{ BTU/Lb}$$

Por consiguiente, la eficiencia de la caldera será:

$$\eta(\%) = \frac{13316,68 \text{ BTU/Lb}}{19300 \text{ BTU/Lb}} * 100$$

$$\eta(\%) = 68,99 \%$$

Entonces la optimización de la caldera estará en el orden de:

$$\text{Optimización} = 68,99 \% - 66,99 \%$$

$$\text{Optimización} = 2\%$$

Adición de un intercambiador de calor:

A través del intercambiador la temperatura del agua de alimentación se logrará incrementar de 15°C a 75°C; y el flujo de calor que ceden los gases de escape al agua de alimentación es de 90 BTU/s, el cual es un ahorro de calor que ya no se perderá en el ambiente y será un ahorro de energía que se utilizará implícitamente en el proceso de evaporación del agua en la caldera, por consiguiente, será un calor que incrementará el calor útil Q_1 .

Considerando que la caldera funciona al día 11 horas aproximadamente, entonces el tiempo de funcionamiento en segundos será de:

$$t = 39\ 600 \text{ seg.}$$

Por consiguiente, el calor que ganará el agua de alimentación será de:

$$q = \frac{90 \text{ BTU}}{\text{seg}} * 39600 \text{ seg}$$

$$q = 3\,564\,000 \text{ BTU}$$

Pero como cada libra de combustible diésel 2 tiene 19 300 BTU:

$$q = \frac{3\,564\,000}{19\,300} \frac{\text{BTU}}{\text{lb. de combustible}}$$

$$q = 184,66 \frac{\text{BTU}}{\text{lb. de combustible}}$$

Entonces el calor útil se incrementará en:

$$Q_1: 12\,929,28 + 184,66 \text{ BTU/Lb de combustible}$$

$$Q_1: 13\,113,94 \text{ BTU/Lb de combustible}$$

Y la diferencia de la caldera se optimizará a:

$$\eta(\%) = \frac{Q_1}{P_c} * 100$$

Donde:

$$Q_1: 13\,113,94 \text{ BTU/lb comb.}$$

$$P_c: 19\,300 \text{ BTU/lb comb.}$$

Entonces:

$$\eta(\%) = \frac{13\,113,94}{19\,300} * 100$$

$$\eta(\%) = 67,95\%$$

El incremento de la eficiencia funcionando con un intercambiador de calor el cual aumentará la temperatura del agua de alimentación será de:

$$\text{Optimización} = 67,95\% - 66;99\%$$

$$\text{Optimización} = 0,96\%$$

CONCLUSIONES

Se logró desarrollar óptimamente la tesis, tanto en la parte experimental en el Comedor Universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno como el trabajo de cálculos de ingeniería de gabinete. Se cumplió el objetivo de realizar la optimización energética de la caldera pirotubular a través de la metodología experimental establecida en el Código ASME (The American Society of Mechanical Engineers), estableciéndose las siguientes conclusiones:

1. Se cumplió el objetivo de realizar el balance energético o térmico y una optimización de 2,96 % de la caldera a través del cual se realizaron los cálculos necesarios para cuantificar la distribución de la energía o calor que se libera por la combustión de una libra de petróleo diesel 2 como referencia. Los calores o energías calculados, fueron: el calor útil que es utilizado para el calentamiento del agua hasta la temperatura de ebullición y su evaporación, el calor perdido en gases de escape, calor perdido por evaporación del agua de formación, calor perdido por combustión incompleta, calor perdido por calentamiento de la humedad del aire ambiental y calor perdido por radiación, convección y otros aspectos. Estos cálculos necesarios para cuantificar la distribución de la energía nos permitieron calcular la eficiencia de la caldera en el orden de $\eta = 66,99\%$.
2. Resumimos los cálculos de ingeniería del balance energético en el diagrama de Sankey, expresándolos en porcentajes con respecto al 100% representado por la energía calorífica contenida en una libra de petróleo diesel 2 (19300 BTU/lb combustible). Los porcentajes de los calores o energías perdidas del diagrama de Sankey nos sirvieron para comparar o contrastar con los

porcentajes recomendados para el funcionamiento eficiente de la caldera, estableciéndose si la energía aprovechada y la pérdida estén entre los porcentajes prefijados por las recomendaciones técnicas.

3. Finalmente se cumplió el objetivo de diagnosticar las siguientes fallas de funcionamiento de la caldera, basado en el análisis comparativo de los porcentajes de las energías o calores calculados y los recomendados:
 - a) El sistema de refrigeración de la caldera no refrigera lo necesario.
 - b) La temperatura de salida de los gases de escape es excesiva.
 - c) La superficie de los tubos de fuego tiene suciedad lo que impide una buena transferencia de calor.
 - d) El cuerpo refractario y el aislamiento de la caldera no es eficiente.
 - e) El factor de carga de funcionamiento de la caldera es bajo.
 - f) La combustión de la caldera es deficiente.
 - g) La temperatura del agua de alimentación es baja.

Por consiguiente, para la optimización energética de la caldera se recomienda:

- a) El sistema de refrigeración debe incrementar su extracción del calor al menos en 1% más.
- b) Para reducir la temperatura de salida de los gases la caldera debe funcionar con un % de exceso de aire de 10%.
- c) Se debe hacer el mantenimiento de los tubos de fuego de la caldera, para proceder a la limpieza de la suciedad, que contribuirá a disminuir la temperatura de salida de los gases.

- d) Se debe hacer un buen mantenimiento de los refractarios y aislamiento de la caldera, evitando puentes térmicos en el cuerpo cilíndrico de la caldera y aislando adecuadamente las aperturas de inspección, limpieza en el cuerpo de la caldera y en el colector de gases de escape.
- e) El factor de carga de funcionamiento es bajo, el cual debe aumentarse para elevar la eficiencia de la caldera, lo que se logrará con la ampliación que se está haciendo en el Comedor Universitario.
- f) Se debe optimizar la combustión midiendo electrónicamente la concentración del oxígeno (O), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) que no debe superar a 400 ppm (partes por millón).
- g) Para elevar la temperatura del agua de alimentación se debe instalar un intercambiador de calor utilizando el calor de los gases de combustión.

RECOMENDACIONES

Habiéndose realizado en forma adecuada la optimización energética de la caldera pirotubular marca INTESA de 250 BHP del Comedor Universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, recomendamos:

1. Utilizar como referencia los diagnósticos de las fallas de funcionamiento de la caldera realizados en la investigación experimental de la tesis, y las recomendaciones técnicas para solucionar dichas fallas para la optimización energética de la caldera del Comedor Universitario.
2. En base a que la optimización energética de la caldera del Comedor se fundamenta en el balance energético o térmico, el cual para realizarlo es necesario conocimientos especializados de termodinámica y transferencia de calor; el diagnóstico y mantenimiento debe ser ejecutado bajo la supervisión de un ingeniero o técnico en calderas para que la optimización energética sea eficaz.
3. La metodología experimental empleada debe servir de marco referencial para continuar la investigación en el futuro, para realizar similares trabajos de investigación de optimización energética, lo cual implica ahorro de combustible y por ende un ahorro de dinero para las industrias que trabajan con calderas.
4. Desde el punto de vista académico la tesis servirá para que los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica se capaciten en la investigación de esta especialización de la Ingeniería, en la cual pueden trabajar profesionalmente en un futuro cercano.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa: fundamentos y aplicación*. Mexico: Editorial Mc Graw Hill.
- Gordillo Andía, C. (2013). *Instalaciones de Vapor*. Universidad Católica de Santa María.
- Kohan, A. (2000). *Manual de calderas*.
- Kohan, A. (2007). *Sistemas de recipientes a presión*. Nueva York: Editorial Mc Graw Hill.
- Mancebo, R., & Uribaz, P. (2006). *Software para el Diagnóstico Energético en sistemas de Generación de Vapor de agua*. Cuba: Instituto de Información Científica y Tecnológica.
- Moran, M., & Shapiro, H. (2011). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Editorial Reverté S.A.
- SERMIN S.A., E. (2014). *Charla Técnica: Operación y Mantenimiento de Calderas*. Lima.
- Shield, C. D. (2009). *Calderas: Tipos y características*. Mexico: Editorial Continental S.A.
- UNI. (2007). *Laboratorio de Ingeniería Mecánica: Generador de Vapor*. Editorial UNI.
- Vilca, L., & Llanque, F. (2005). *Implementación y evaluación de un generador de vapor tipo vertical de dos pasos para uso de laboratorio y ensayos de producción*. Universidad Nacional del Altiplano.

ANEXOS

Anexo 1: Características técnicas de los equipos en el presente estudio.

Tabla 1.1: Caldera pirotubular 250 BPH:

Marca	INTESA
Modelo	PTH-250-3-WB-D2-GLP/GN
Tipo	Pirotubular horizontal Wetback (Espalda húmeda)
Pases	Tres
Potencia	250 BHP
Capacidad calorífica	8 369 miles, BTU/Hr
Superficie de calefacción	1 250 Sq. Ft.
Capacidad de producción de vapor	8 625 lb/H a 212°F-180 psi
Presión de diseño	150 PSIA
Presión de prueba hidrostática	250 PSIG
Presión de trabajo	Regulable de 15-150 PSI
Combustible de operación	Dual (Petróleo Diesel N° 2 y GLP)
Consumo de combustible máximo	60-90 GLs/día
Eficiencia térmica	87%
Suministro eléctrico <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza • Controles 	220V/3Ø/60Hz 110V/1Ø/60Hz
Diseño	Bajo las normas del código ASME y ASTM
Funcionamiento y operación	Automático con combustión modulante
Año de fabricación	2006

Elaboración: Propia.

Tabla 1.2: Quemador

Marca	POWER FLAME
Modelo	C6-GO-30
Combustible	GAS-D2

Elaboración: Propia.

Tabla 1.3: Motor

Marca	Baldor
Modelo	M3312T
Potencia	10 HP
Revoluciones	3450 RPM
Tensión	208-230 V

Fases	3Ø
Frecuencia	60 Hz

Elaboración: Propia.

Tabla 1.4: Válvula de Salida de vapor

Marca	KOMBRACH
Accesorio	Válvula globo
Tipo	GG25-K20N
Conexión	4" – 150 PSI

Elaboración: Propia.

Tabla 1.5: Válvula de seguridad

Marca	CONBRACO
Modelo	19KHA125
Cantidad	2
Medidas	2"x2"
Presión	125 PSI
Capacidad	5609 Lb/Hr

Elaboración: Propia.

Tabla 1.6: Termómetro Chimenea

Marca	CIMPA
Dial	4"
Conexión	½ "
Rango	0-600°C

Elaboración: Propia.

Anexo 2: Operación y mantenimiento de la caldera pirotubular serie PTH

Operación

a) Arranque diario de un caldero

1. Controle el nivel de agua, abra las llaves de prueba de control de nivel para que entre aire al caldero.
2. Abra las válvulas de alimentación de combustible y agua.
3. Conecte la llave de interrupción principal del caldero.
4. Espere a que empiece a subir la presión. Cierre la llave de purga de aire.
5. Espere a que la presión suba al punto que ha sido regulado y que apague el quemador.
6. Abra la válvula de vapor lentamente.

b) Parada diaria

1. Cierre la válvula de vapor.
2. Desconecte el interruptor del panel.
3. Cierre la válvula de combustible.

c) Regulación de la presión de trabajo.

La presión de arranque del quemador se regula con el tornillo superior izquierdo de presuretrol. La escala izquierda (marcada por un lado en LBS/pulgada cuadrada) y por otro lado en Kg/cm²) indica la presión a la que arranca el quemador si baja la presión del caldero de 0-15 PSI.

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

d) Pruebas

Prueba de la fotocelda:

Estando el quemador en funcionamiento, se desenrosca la fotocelda y se tapa lentamente con la mano. La llama debe apagarse después de 3 a 4 segundos y la luz de flama del programador debe apagarse.

Prueba de control de nivel de agua:

Estando el quemador funcionando se abrirá parcialmente la válvula de purga de la columna de nivel. Se ira observando constantemente el descenso de nivel en el tubo de vidrio.

Cuando el nivel haya descendido a 3/4" debajo de lo normal, deberá arrancar la bomba de agua. Se pondrá en marcha nuevamente el quemador.

Mantenimiento

Cada 8 horas:

1. Purga de fondo del caldero: (se debe vigilar constantemente el nivel de agua en el tubo de vidrio mientras se hace la purga de fondo, el nivel no debe bajar del mínimo permisible; las purgas de fondo deben hacerse cuando el consumo de vapor es mínimo).
2. Purgar el control de nivel de agua cuando haya presión.
3. Purgar el tubo de vidrio de nivel de agua.

Semanalmente:

1. Hacer la prueba de control de agua.
2. Probar el funcionamiento de la válvula de seguridad levantando con la mano.

Mensualmente:

1. Engrasar la bomba de agua.

2. Hacer una limpieza al quemador, el rotor, la roleta, al cabezal de ignición, el tubo de mira de la fotocelda y el lente de la fotocelda.
 3. Las boquillas deberán ser desarmadas para limpiar el filtro que tienen. Debe mantenerse la posición de los electrodos y su separación.
 4. Limpiar los filtros de petróleo y agua. Esta limpieza debe ser más frecuente cuando el caldero es nuevo. La frecuencia de limpieza será mayor si las condiciones lo exigen.
- a) Línea de agua, vapor y petróleo
- Las fugas de las tuberías de agua, vapor y petróleo deben ser eliminadas tan pronto se presenten.
 - Las fugas de la línea de vapor se subsanarán con la tubería sin presión.
- b) Control químico del agua de alimentación
- La dureza del agua debe ser controlada diariamente.
 - La dureza debe ser 0 max. 1 (grado alemán).
 - El pH del agua también debe ser controlada diariamente, debe fluctuar entre 10.5 y 11.5.
 - Se debe hacer un análisis mensual del agua de alimentación.
- c) Recomendaciones
1. El tanque diario de petróleo debe estar en una altura máxima de 1.20 m mínimo de 0.80 m y una distancia de 3 m con salida de retorno de 1/2". Debe ponerse una tubería flexible en succión y retorno del quemador para la vibración.
 2. El tanque de agua debe estar cerca del caldero y de una distancia aproximada. La tubería de succión de la bomba de agua debe ser mayor diámetro que la entrada de la misma y con una válvula check.

Calentador de agua

a) Operación

- Después de revisar todas las entradas y salidas del calentador, asegúrese que todo esté entubado adecuadamente, llene la sección de almacenaje del calentador de agua con la válvula manual de ingreso de agua fría.
- Verificar la correcta instalación de las líneas de vapor desde la sala de calderas hasta el punto de ingreso al calentador.
- Aperturar la válvula de ingreso de vapor al calentador.
- Verificar el correcto funcionamiento de los controles de operación del calentador, tales como termómetros, válvula reductora de presión, filtros, válvula termostática.
- Verificar el correcto funcionamiento de la línea de recirculación de agua.
- Verificar la correcta operación de la válvula de purga de fondo.

b) Mantenimiento

Mantenimiento preventivo (mensualmente)

- Para realizar el cambio de algún accesorio, verifique previamente que las líneas de vapor se encuentren fuera de operación.
- Realizar mantenimiento a los accesorios del equipo tales como válvula termostática, válvula reductora de presión, calibración de termómetros si este fuera el caso.

Mantenimiento anual:

- Realizar la inspección del registro de entrada de hombre para ver el estado de la empaquetadura del mismo.

- Realizar una inspección interna al equipo para ver el estado del mismo verificando si existe picaduras, en el caso de que exista algún daño deberá enfibrarse nuevamente el interior del equipo.

c) Recirculación

- Siempre que se abastezca de agua caliente para procesar a algún punto distante, el agua en la línea conectora se enfriará, hacer lo necesario para sacar agua fresca antes de que se obtenga la caliente; en algunas aplicaciones donde las líneas son largas y grandes esto podría ser un factor molesto, pero se puede corregir fácilmente instalando una bomba de circulación.

Anexo 3: Fallas más comunes en calderas pirotubulares

Tabla 3.1 Fallas más comunes en calderas pirotubulares:

SÍNTOMA	CAUSA	CORRECCIÓN
No hay chispa	Mal ajuste de los electrodos. Se carbonizan los electrodos. Transformador en mal estado. Electrodos estrellados. Línea aterrizada.	Ajustarlos correctamente. Levantarlos para que no los bañe el combustible. Repararlo o cambiarlo. Cambiarlos. Corregir defecto.
Hay chispa y combustible, sin embargo, no enciende	Están desajustados los electrodos y no hacen contacto con el combustible	Ajustarlos para que hagan contacto.
Ausencia de combustible en los inyectores.	Falta de combustible en el tanque. Válvulas de paso cerradas. Filtro obstruido. Tiene aire la bomba. Bomba descompuesta. Válvula solenoide descompuesta. Boquillas obstruidas. Tubería obstruida.	Llenar el tanque. Abrir las válvulas Lavar el filtro. Purgar bomba de combustible Repararla. Reparar o cambiar. Limpiar el cedazo y el difusor. Limpieza interior o reposición.
Mala verificación de flama	Fotocelda en mal estado. Ducto de fotocelda bloqueado. Pantalla de fotocelda sucia. Falso contacto.	Reponer fotocelda. Liberar obstrucciones. Limpiar la pantalla. Verificar zapatas y conexiones.
Mala combustión.	Exceso de humo negro. Exceso de humo blanco.	Reducir proporción de combustible. Reducir proporción de aire.
Fugas en registros	Están flojas las tuercas. Empaque defectuoso. Asientos sucios con sarro	Apretarlas (sin presión en la caldera). Cambiar empaque. Limpieza profunda y cambio de empaque.
Fugas en conexiones	Conexión floja.	Poner cinta teflón y apretar.
Fugas en la purga	Los asientos en las válvulas están sucios. Los asientos en las válvulas están desgastados.	Limpieza de asiento, Asentarlos o cambiar válvula.
Fugas en estoperos	Falta empaque grafitado	Colocar empaque y apretar (sin presión en la línea)

Fuga en la tapa posterior	Fusible de seguridad fundido. Lagrimen los tubos flux. Ruptura interior de un tubo.	Reponerlo por uno nuevo. Rotarlos y expandirlos, o cambiarlos. Reponerlo.
Fuga en control de nivel	Fuelle roto. Empaques en mal estado. Cuerpo poroso.	Cambiarlo por uno nuevo. Cambiarlos. Cambiar el control.
La bomba de agua no inyecta y no funciona el motor	Se botó el interruptor termomagnético. Switch manual abierto. Bobina el arrancador magnético. Platinos flameados. Capsula de mercurio rota. Turbina de la bomba gastada. Cuña de la flecha defectuosa. Cole flexible en mal estado. Válvula de retención defectuosa. Tubería de acceso a la caldera está tapada. Tubería de acceso al control de nivel esta tapada.	Reestablecerlo o cambiar el relevador bimetalico. Cerrarlo. Cambiar por una nueva. Reponerlos por nuevos. Cambiarla. Cambiar la turbina. Cambiarla. Cambiarlo. Cambiarla. Limpiar obstrucciones. Limpiar obstrucciones.
La caldera se llena completamente de agua	Flotador de control de nivel perforado. Corto en la capsula de mercurio. Incrustamiento que obstruye el flotador. Platinos muy flameados, no se desconectan, se quedan pegados.	Reponerlo. Cambiar la capsula de limpieza interior. Cambiar los platinos.
Falla en el control de presión	Capsula de mercurio carbonizada. Fuelle de control de presión dañado. Control de presión desnivelado. Cortocircuito en el alambrado. Tubería de acceso al control, obstruida.	Cambiar la capsula. Reponerlo. Ajustar a lo deseado. Reparar anomalía. Efectuar limpieza de tubería.

Fuente: Guía Técnica de Operación y Mantenimiento de Generadores de Vapor- ISSSTE.